

На правах рукописи

СЕЛИВЕРСТОВ Владимир Александрович

**МЕТОДИКА ОБОСНОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ
ВОДОПРИЕМНО-ВОДОВЫПУСКНЫХ УСТРОЙСТВ
ГИДРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК**

05.14.08 – Энергоустановки на основе возобновляемых видов энергии

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2010

Работа выполнена в Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Самарский государственный архитектурно-строительный университет»

Научный руководитель доктор технических наук, профессор
Бальзанников Михаил Иванович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Елистратов Виктор Васильевич

кандидат технических наук, доцент
Коновалов Александр Борисович

Ведущая организация ГОУ ВПО «Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет»

Защита состоится «23» декабря 2010 г. в 16:00 на заседании диссертационного совета Д 212.229.17 при ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет» по адресу: 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, корп. 2, ауд. 411.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»

Автореферат разослан «19» ноября 2010 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.229.17
д. т. н.

 Сидоренко Г.И.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Важным направлением развития энергетики является широкое использование электрических станций на основе возобновляемых видов энергии, в том числе гидроэнергетических установок (ГЭУ).

Водопроводящий тракт ГЭУ представляет собой сложный комплекс сооружений (элементов) для забора воды из водоема, подвода ее к гидроэнергетическому оборудованию и последующего отвода. Состав сооружений водопроводящих трактов и их конструкции весьма разнообразны, однако ко всем элементам предъявляется общее требование – обеспечение наименьших потерь напора водного потока, а, следовательно, мощности.

В ответственном элементе водопроводящего тракта средненапорной ГЭУ – в водоприемно-водовыпускном устройстве доля потерь может достигать 25 % всех потерь. Значительные величины потерь обусловлены сложностью конструкции этих устройств, из-за чего в потоке образуются отрывные течения и циркуляционные области. Особенно сложным является течение в водоприемнике-водовыпуске ГАЭС из-за реверсивности его работы. Именно для этих электростанций важно правильно выбрать наиболее рациональные параметры водоприемно-водовыпускных устройств, обеспечивающие наилучшие энергетические характеристики для обоих режимов работы станции.

Таким образом, повысить эффективность ГЭУ можно за счет обоснованного назначения оптимальных параметров элементов водоприемно-водовыпускных устройств ГЭУ, а также использования более эффективных конструктивных решений, улучшающих условия работы этих устройств и повышающих их энергетические показатели.

В связи с этим, актуальным направлением исследований в настоящее время является разработка и совершенствование методов технико-экономического обоснования параметров водоприемно-водовыпускных устройств гидроэнергетических установок с учетом особенностей и условий их функционирования, а также разработка предложений и обоснование применения более эффективных конструкций этих устройств, в которых исключаются или уменьшаются отрывные течения и циркуляционные области, служащие источником повышенных потерь.

Цель диссертационной работы – разработка методики технико-экономического обоснования параметров водоприемно-водовыпускных устройств гидроэнергетических установок с учетом конструктивных особенностей и условий эксплуатации на основе исследований их конструкций.

Основные задачи исследований. Для достижения сформулированной цели в работе были поставлены и решены следующие основные задачи:

1. Выполнен анализ существующих конструктивных решений водоприемно-водовыпускных устройств ГЭУ, методов обоснования их параметров и результатов экспериментальных исследований по выявлению влияния их конструктивных особенностей на энергетические показатели.

2. Разработаны предложения по усовершенствованию конструкций водоприемно-водовыпускных устройств ГЭУ с целью улучшения их энергетических характеристик и повышению эффективности работы.

3. Разработана методика технико-экономического обоснования параметров водоприемно-водовыпускных устройств ГЭУ, позволяющей учитывать их конструктивные особенности, местные специфические условия эксплуатации и современные экономические условия.

4. Выполнен комплекс экспериментальных исследований эффективных конструкций водоприемно-водовыпускных устройств ГЭУ на математических и физических моделях, определены энергетические характеристики их работы и выявлены их наиболее рациональные параметры.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. На основе анализа конструктивных решений уточнена классификация водоприемно-водовыпускных устройств ГЭУ по направлениям их совершенствования и по конструктивному признаку. В частности, предложено выделить дополнительный подтип водоприемно-водовыпускных устройств, к которому отнесены конструкции, имеющие потоконаправляющие устройства, обеспечивающие исключение (уменьшение) вихревых областей в потоке.

2. Разработана методика технико-экономического обоснования параметров водоприемно-водовыпускных устройств гидроэнергетических установок с учетом конструктивных особенностей и условий их эксплуатации для современных экономических условий.

3. Предложены и исследованы новые эффективные конструкции водоприемно-водовыпускных устройств ГЭУ: водоприемника (Патент № 2389846), водоприемника-водовыпуска (Патент № 2389847) и водоприемного устройства (Патент № 2392378 и № 87431).

4. На основе экспериментальных исследований получены данные о влиянии параметров водоприемно-водовыпускных устройств ГЭУ и параметров их потоконаправляющих элементов на энергетические характеристики для турбинного и насосного режимов работы.

Личный вклад автора заключается в проведенном анализе научных публикаций по конструктивным решениям водоприемно-водовыпускных устройств ГЭУ и результатам их исследований; в разработке новых конструкций водоприемно-водовыпускных устройств, защищенных патентами на изобретения; в разработке методик проведения экспериментальных исследований моделей новых конструкций водоприемно-водовыпускных устройств; в создании экспериментального стенда; непосредственном проведении экспериментальных исследований, обработке полученных опытных данных и анализе результатов исследований о влиянии основных параметров водоприемно-водовыпускных устройств ГЭУ; разработке основных положений методики технико-экономического обоснования параметров водоприемно-водовыпускных устройств ГЭУ.

Практическая значимость исследований состоит в использовании полученных результатов для обоснования основных параметров эффективных конструкций водоприемно-водовыпускных устройств ГЭУ при выполнении проектов строительства или реконструкции водопроводящих трактов ГЭУ.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Уточненная классификация водоприемно-водовыпускных устройств ГЭУ по конструктивному признаку и по направлениям развития их конструкций.

2. Методика технико-экономического обоснования параметров водоприемно-водовыпускных устройств ГЭУ, позволяющая учитывать конструктивные особенности и местные специфические условия эксплуатации в современных экономических условиях.

3. Результаты экспериментальных исследований предложенных автором конструкций водоприемно-водовыпускных устройств ГЭУ при работе в турбинном и насосном режимах.

4. Результаты оценки эффективности новых конструктивных решений водоприемно-водовыпускных устройств ГЭУ, использующих потоконаправляющие элементы и обеспечивающих повышение энергетических показателей ГЭУ: водоприемника с изменяющейся формой водоприемной камеры и возможностью исключения влияния пазов; водоприемника-водовыпуска с разделителями водного потока, обеспечивающими изменение раструбности водоприемно-водовыпускной камеры; водоприемного устройства с дополнительными камерами, служащими для исключения образования циркуляционных областей в водном потоке.

Достоверность научных результатов подтверждается соответствием полученных результатов исследований существующим современным научным представлениям, использованием в диссертационной работе научно обоснованных и апробированных методик выполнения работ, совпадением данных, полученных в экспериментальных исследованиях при математическом моделировании с результатами, полученными на физической модели.

Апробация результатов работы. Основные положения работы докладывались на региональных и международных научно-технических конференциях и совещаниях: Всероссийская XXX научно-техн. конф «Актуальные проблемы современного строительства» (Пенза, 1999 г.), Международная научно-техническая конференция «Научные проблемы энергетики возобновляемых источников» (Самара, 2000 г.), Международная научно-техническая конференция «Гидротехника и гидроэнергетика: проблемы строительства, эксплуатации, экологии и подготовки специалистов» (Самара, 2002 г.), Miedzynarodowa konferencja naukowa II Okragly stol Hydroenergetyki Wisla-Wolga «Kaskady elektrowni wodnych na rzekach Europy» (Wloclawek, 2004 г.), с 57-ой по 67-ю научно-технические конференции по итогам НИР ГОУ ВПО «СГАСУ».

Реализация работы. Результаты исследовательской работы внедрены Центральным производством ОАО «Инженерный Центр Энергетики Поволжья» при проектировании новых и реконструкции существующих водоприемно-водовыпускных устройств гидроэнергетических установок, а также в учебный процесс ГОУ ВПО «Самарский государственный архитектурно-строительный университет» при выполнении дипломного и курсового проектирования студентов, обучающихся по специальности «Гидротехническое строительство».

Публикации. Основные результаты и положения диссертации опубликованы в 17 печатных работах, в том числе в 4 периодических изданиях, рекомендованных ВАК. Имеется 3 патента на изобретения и один патент на полезную модель.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, списка литературы из 125 наименований, в том числе 10 на иностранном языке. Работа содержит 157 страниц машинописного текста, 71 рисунок и 4 таблицы. Общий объем работы – 161 страница.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертации, научная новизна, сформулированы цель и основные задачи исследований, приведены сведения о личном вкладе автора, практической значимости результатов работы и ее апробации.

В **первой главе** диссертации приведен аналитический обзор публикаций, отражающих конструктивные решения по водоприемно-водовыпускным устройствам ГЭУ, проанализированы основные направления совершенствования водоприемных устройств, повышающие эффективность использования энергии водного потока. Рассмотрены методы обоснования и результаты экспериментальных исследований водоприемных и водовыпускных устройств.

Большой вклад в развитие гидроэнергетики внесли известные ученые Ю.С. Васильев, Д.С. Щавелев, В.И. Виссарионов, М.М. Гришин, Ф.Ф. Губин, А.Р. Березинский, С.М. Слиссский и многие другие. В работах, помимо принципов проектирования, в том числе показано, что важнейшим и необходимым условием эффективной работы ГЭУ является рациональная компоновка и обоснованный выбор параметров элементов водопроводящего тракта.

В водопроводящий тракт ГЭУ входят водоприемные, водовыпускные, транспортирующие и другие сооружения. Состав сооружений водопроводящих трактов и конструкции их элементов весьма разнообразны, однако ко всем элементам предъявляется одинаковое требование – обеспечение наименьших потерь напора водного потока, а, следовательно, мощности.

Развитию конструкций элементов водопроводящего тракта и повышению эффективности использования энергии водного потока в водоприемных устройствах гидроэнергетических установок посвящены научные работы Ю.С. Васильева, В.И. Виссарионова, Г.А. Претро, Д.С. Щавелева, В.Я. Каре-

лина, Г.И. Кривченко, В.В. Елистратова, М.И. Бальзанникова, С.А. Березинского, И.Е. Михайлова и многих других ученых.

Анализ научных публикаций показал, что в существующей систематизации конструкций водоприемно-водовыпускных устройств ГЭУ используются различные признаки. На наш взгляд важнейшими из них являются: классификация по конструктивному признаку, а также по направлениям совершенствования конструкций. Однако, принятые классификации не в полной мере учитывают современные научные достижения. В работе показана целесообразность развития основных направлений совершенствования конструкций водоприемно-водовыпускных устройств, добавив еще одно – восьмое направление, к которому предлагается отнести новые конструкции, использующие комбинированные решения (например, и повышение динамичности и измельчение и т.п.).

Проблемами технико-экономического обоснования гидроэнергетических объектов и элементов водопроводящего тракта занимались крупнейшие проектные и научно-исследовательские организации и вузы. Основные методы обоснования развиты в работах ученых Н.В.Арефьева, Б.Л.Бабурина, Л.С. Беляева, П.П. Долгова, А.З. Захидова, А.Н. Зейлигера, Т.Л. Золоторева, В.Я. Карелина, Ю.С. Васильева, М.М. Гришина, Ф.Ф. Губина, Г.И. Кривченко, Д.С. Щавелева, Б.Л. Эрлихмана и многих других.

Основываясь на анализе научных публикаций можно заключить, что при технико-экономическом обосновании параметров водоприемно-водовыпускных устройств для каждого типа устройства следует выделять основные параметры – геометрические параметры первого уровня, которые присущи практически всем типам конструкций и от которых существенно зависят энергетические и экономические показатели водопроводящего тракта ГЭУ, а также параметры второго уровня (второстепенные), влияние которых на энергетические и экономические показатели водоприемного устройства ГЭУ не столь значительное.

В результате проведенного обзора выявлено, что наибольшее распространение получил метод сравнительной экономической эффективности. Однако в своих рекомендациях авторы не в полной мере учитывают условия работы ГЭУ и конструктивные особенности водоприемно-водовыпускных устройств.

Ведущая роль в изучении условий работы элементов водопроводящих трактов ГЭУ на основе экспериментальных исследований принадлежит научным школам Ленинградского политехнического и Московского инженерно-строительного институтов, а также «Проектно-изыскательский и научно-исследовательский институт «Гидропроект» имени С.Я. Жука» и ОАО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева». Наиболее полный анализ результатов экспериментального изучения этих сооружений содержатся в трудах А.Р. Березинского, М.М. Гришина, Ф.Ф. Губина, Ю.С. Васильева, В.Б. Дульнева, С.И. Егоршина, Н.И. Ефимова, Н.Г. Назарова, В.А. Орлова, Н.П. Розанова,

С.М. Слисского, И.И. Иванова, А.Б. Коновалова, Л.А. Кароля, И.Е. Михайлова, Г.А. Претро, Л.Б. Шеймана, М.И. Бальзанникова, В.В. Елистратова и др.

В качестве энергетических характеристик водоприемно-водовыпускных устройств ГЭУ используются различные параметры. На наш взгляд, для оценки свойств этих устройств целесообразно использовать следующие параметры: приведенные относительные потери напора и потери мощности.

На основе проведенного анализа показано, что в ответственном элементе водопроводящего тракта средненапорной ГЭУ – в водоприемно-водовыпускном устройстве доля потерь может достигать 25 % от всех потерь. Потери обусловлены сложностью конструкции этих устройств, из-за чего в потоке образуются отрывные течения и циркуляционные области. Особенно сложным является течение в водоприемнике-водовыпуске ГАЭС из-за реверсивности его работы. При этом в насосном режиме потери на расширение потока и выходные потери составляют более 70 % общих потерь в водовыпускном устройстве. Поэтому именно для этих электростанций важно правильно выбрать наиболее рациональные параметры водоприемно-водовыпускных устройств, обеспечивающие наилучшие энергетические характеристики. Особое внимание следует уделить насосному режиму работы.

Таким образом, применение усовершенствованных конструктивных решений водоприемных сооружений может обеспечить получение значительного энергетического и экономического эффектов при эксплуатации ГЭУ за счет создания условий более эффективного использования энергии водного потока.

Во второй главе изложена методика обоснования параметров водоприемно-водовыпускных устройств ГЭУ на основе метода сравнительной экономической эффективности и метода интегрального эффекта.

В работе предложено применять различные подходы для обоснования основных и второстепенных параметров водоприемно-водовыпускных устройств ГЭУ. В качестве основных параметров приняты: длина водоприемной камеры устройства L и угол наклона потолочного элемента β (раструбность водоприемной камеры). Для характеристики наличия специальных устройств, обеспечивающих улучшение энергетических характеристик водоприемного сооружения и их количества, использован параметр n (например, количество разделителей потока в водоприемной камере).

Для случая использования метода сравнительной экономической эффективности оптимизационная задача записана в виде целевой функции:

$$\sum \Delta Z(L, \beta, n) \rightarrow \min . \quad (1)$$

Приняты ограничения:

А) на интервалы изменения параметров:

$$\begin{aligned} L_{\min} &\leq L \leq L_{\max}, \\ \beta_{\min} &\leq \beta \leq \beta_{\max}, \\ n_{\min} &\leq n \leq n_{\max}, \end{aligned} \quad (2)$$

где L_{\min} и β_{\min} – минимальные значения соответственно длины водоприемной камеры и угла наклона потолочного элемента, L_{\max} и β_{\max} – их максимальные значения, n_{\min} и n_{\max} – минимальное и максимальное количество дополнительных специальных устройств.

Кроме того учитываются ограничения:

Б) на области совместного изменения параметров;

В) функциональные ограничения.

Ограничения вытекают из требований накладываемых на характеристики режимов работы ГЭУ.

В суммарные дополнительные расчетные затраты включаются:

$$\sum \Delta Z = (\Delta Z_{\text{вод}} + \Delta Z_C + \Delta Z_Y) + \sum \Delta \Pi, \quad (3)$$

где $\Delta Z_{\text{вод}}$ – дополнительные расчетные затраты по водоприемно-водовыпускному устройству, ΔZ_C – то же, по сопряженным объектам, ΔZ_Y – то же, по специальному дополнительному устройству, обеспечивающему улучшение его энергетических свойств, $\Delta \Pi$ – стоимость дополнительно потерянной электроэнергии.

Приняты допущения: дополнительные капитальные вложения осуществляются единовременно в начальном периоде; значениями дополнительных издержек по водоприемно-водовыпускному устройству, сопряженным объектам и специальному дополнительному устройству пренебрегаем.

В итоге критерий технико-экономического обоснования основных параметров водоприемно-водовыпускного устройства записан в виде:

$$E\Delta K_{\text{вод}}(L, \beta, n) + E\Delta K_C(L, \beta, n) + E\Delta K_Y(L, \beta, n) + \Sigma \Delta \Pi(L, \beta, n) \rightarrow \min, \quad (4)$$

второстепенных параметров:

$$\Delta K_{\text{вод}} + \Delta K_C + \Delta K_Y \rightarrow \min. \quad (5)$$

Величина $\Delta \Pi$ определяется по известной формуле:

$$\Delta \Pi = a\gamma \Delta \mathcal{E}, \quad (6)$$

где γ – тариф за 1 кВт-ч электроэнергии, a – коэффициент, учитывающий расход электроэнергии на собственные нужды, $\Delta \mathcal{E}$ – объем дополнительно потерянной электроэнергии:

$$\Delta \mathcal{E} = \Delta N T_N, \quad (7)$$

$$\Delta N = 9,81\eta Q \Delta h, \quad (8)$$

где ΔN – дополнительно потерянная мощность, T_N – число часов использования установленной мощности в год, η – коэффициент полезного действия, Q – расчетный расход, Δh – дополнительные потери напора в водоприемно-водовыпускном устройстве, имеющие место вследствие изменения

его параметров.

Значения величины Δh в зависимости от варьируемых параметров (9)

$$\Delta h(L, \beta, n)$$

определяются в результате экспериментальных исследований.

Блок-схема алгоритма оптимизационных расчетов приведена на рис. 1. Алгоритм включает три основных этапа: 1 – ввод исходных данных для расчета, 2 – выполнение расчета и 3 – выполнение анализа и вывод результатов. Подробная характеристика каждого этапа приведена в диссертации.

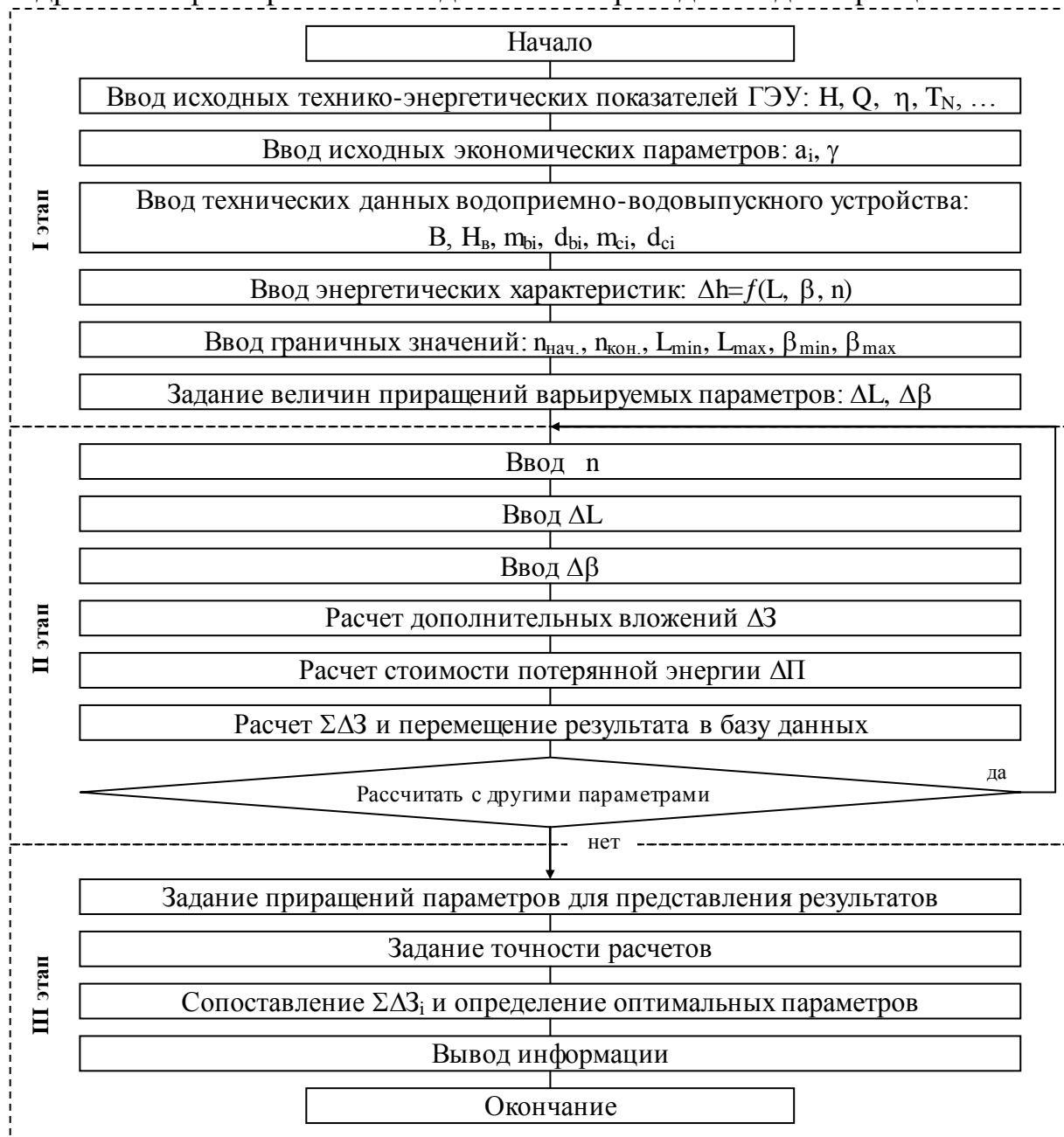


Рис. 1 – Блок-схема алгоритма обоснования параметров водоприемно-водовыпускного устройства

Если необходимо учесть насосный режим работы ГЭУ, то критерий (4) записывается в виде:

$$E\Delta K_{\text{ВОД}}(L, \beta, n) + E\Delta K_C(L, \beta, n) + E\Delta K_Y(L, \beta, n) + \Sigma\Delta\Pi_{\text{ТР}}(L, \beta, n) + \Sigma\Delta\Pi_{\text{НАС}}(L, \beta, n) \rightarrow \min .(10)$$

В диссертации приводится также методика обоснования параметров водоприемно-водоотпускных устройств ГЭУ с использованием метода интегрального эффекта.

Местные условия эксплуатации предложено учитывать за счет использования «тарифного», «компенсирующего», «потребительского» или «рыночного» метода расчета стоимости потерянной электроэнергии.

В **третьей главе** рассмотрены и охарактеризованы новые конструктивные решения по водоприемно-водоотпускным устройствам ГЭУ, в том числе, предложенные и обоснованные автором, приведена уточненная классификация водоприемно-водоотпускных устройств ГЭУ по конструктивным признакам.

В диссертационной работе показано, что важная роль в повышении эффективности работы водоприемно-водоотпускных устройств ГЭУ принадлежит применению дополнительных потоконаправляющих устройств, обеспечивающих исключение (уменьшение) циркуляционных областей в потоке.

В связи с этим, при непосредственном участии автора разработаны и обоснованы новые конструктивные решения водоприемно-водоотпускных устройств ГЭУ, на которые получены патенты на изобретения. В частности, водоприемника с изменяющейся формой водоприемной камеры и возможностью исключения влияния пазов, водоприемника-водоотпуска с разделителями водного потока, водоприемного устройства с дополнительными камерами (рис. 2-4).

Изменение формы водоприемной камеры водоприемно-водоотпускного устройства (рис. 1) обеспечивается за счет автоматического исключения пазов. Для этого в пазах предусмотрены дополнительные ниши, в которых размещены потоконаправляющие элементы в виде гибких пластин и пружинные элементы, а затворы снабжены отжимными катками.

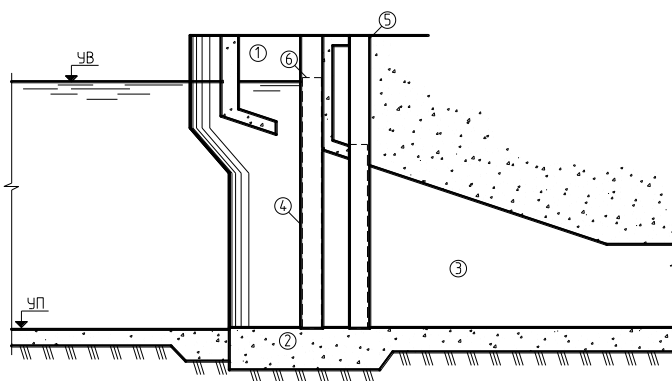


Рис. 2 – Водоприемно-водоотпускное устройство с автоматически закрывающимися пазами: 1 – бык, 2 – порог, 3 – водоприемно-водоотпускная камера, 4 – паз ремонтного затвора, 5 – паз быстродействующего затвора, 6 – потоконаправляющие элементы, УВ – отметка уровня воды, УП – отметка порога

При подъеме затвора пазы автоматически закрываются этими пластинами, что исключает образование в водном потоке циркуляционных областей и уменьшает потери напора, а, следовательно, увеличивает выработку электроэнергии ГЭУ в турбинном режиме или уменьшает потребление электрической энергии в насосном режиме. При опускании затвора пластины занимают место в нишах под воздействием отжимных катков.

В водоприемнике-водовыпуске предложено использовать разделители потока и размещать их в водоприемной камере наклонно к горизонтальной плоскости. Разделители могут выполняться полыми с возможностью изменения своей толщины, включающими концевые и промежуточные балки и эластичную оболочку в виде замкнутой полости (рис 3).

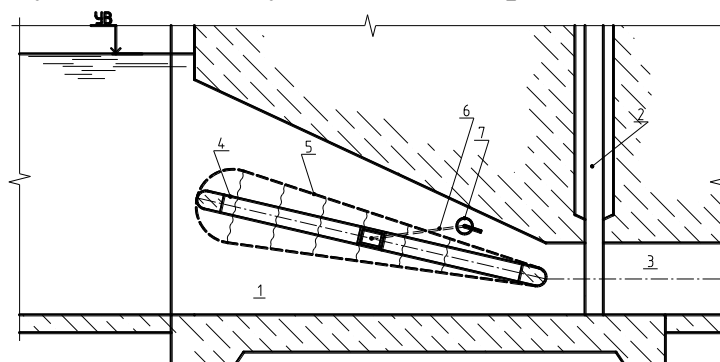


Рис. 3 – Водоприемник-водовыпуск с разделителем потока:
 1 – водоприемная камера; 2 – паз затвора; 3 – водовод;
 4 – потоконаправляющий элемент; 5 – эластичная оболочка;
 6 – трубопровод; 7 – управляющий элемент

Разработанное конструктивное решение обеспечивает возможность изменять раструбность водоприемной камеры в зависимости от режима работы ГЭУ (турбинного или насосного) и создавать, тем самым, наилучшие условия в водоприемнике-водовыпуске.

В водоприемных устройствах с дополнительными камерами предусмотрено изменение формы поперечного сечения примыкающего к водоприемной камере колена (рис. 4).

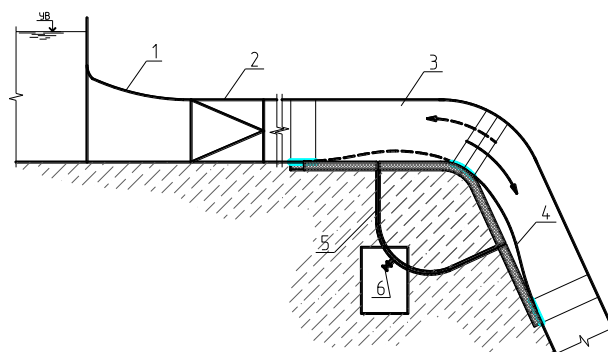


Рис. 4 – Водоприемное устройство с отводящим участком, изменяющим форму сечения: 1 – водоприемная камера;
 2 – переходный участок; 3 – колено; 4 – эластичная оболочка;
 5 – управляющий водопровод; 6 – регулирующее устройство

Для этого потоконаправляющий элемент предложено выполнить в виде эластичной оболочки и разместить на внутренней выпуклой стороне водовода на участках выше и ниже колена. При помощи регулирующего и управляющего устройств изменяется давление в верхней и нижней камерах потоконаправляющей оболочки и их очертание. За счет этого обеспечиваются наиболее выгодные поперечные сечения водовода без образования циркуляционных областей в потоке как в турбинном, так и в насосном режимах.

На основании анализа особенностей новых эффективных конструкций водоприемно-водоотпускных устройств ГЭУ автором предложено внести уточнение в их классификацию по конструктивным признакам. В частности, показана целесообразность выделения дополнительного подтипа – водоприемно-водоотпускного сооружения с потоконаправляющими устройствами, обеспечивающими исключение (уменьшение) циркуляционных областей.

В **четвертой главе** описываются методики проведения математических и лабораторных исследований, исследованные математические и физические модели водоприемно-водоотпускных устройств, приводятся описание экспериментальной установки для исследований физической модели водоприемно-водоотпускных устройств и условия моделирования.

В основу анализа условий моделирования водоприемно-водоотпускных устройств ГЭУ на гидравлическом стенде положены принципы и рекомендации, обоснованные в трудах В.А. Веникова, М.П. Гилярова, А.П. Зегжды, М.В. Кирпичева, Н.В. Лебедева, И.И. Леви, В.М. Лятхера, Л.И. Седова, А.М. Прудовского и других ученых.

При моделировании устройства на гидравлическом стенде в качестве основного критерия принят критерий Эйлера при условии превышения минимального значения числа Рейнольдса. Обычно для исследований неравномерных потоков на напорных моделях число Re_{min} принято обеспечивать не менее 10^4 . При этом течение считается автомодельным. В нашем случае число $Re=11800$. В работе была проведена специальная серия методических опытов, позволяющая оценить характеристики потока и определить требуемый расход воды и скорости потока в рабочей области модели.

При выполнении численного эксперимента с применением программного средства «ANSYS» предусматривалось изменение геометрических параметров модели. Варьировались: длина водоприемно-водоотпускной камеры L от 1,5 до 7, угол наклона потолочного элемента конфузورного (диффузорного) участка β в широком диапазоне (от 0^0 до 90^0), высота входного участка водовода H и относительная высота входного отверстия камеры H_B . В камере предусматривалось размещение потоконаправляющих элементов.

Результаты численного эксперимента с применением программного средства «ANSYS» сопоставлены с результатами исследований физической модели на экспериментальном стенде с аналогичными основными геометрическими параметрами. Их хорошая сходимость свидетельствовала о получении достоверных результатов.

В пятой главе приведены результаты исследований водоприемно-водовыпускных устройств ГЭУ и их анализ. Описаны результаты этапа методических исследований на математических моделях с применением программного средства «ANSYS» и физических моделях на экспериментальном стенде, а также основных этапов исследований. Приводится анализ полученных результатов исследований водоприемно-водовыпускных устройств для насосного и турбинного режимов ГЭУ.

Методические опыты позволили обосновать выбор границ подводящего и отводящего участков модели и диапазона скоростей потока воды в исследуемом рабочем участке моделей.

Результаты исследований предложенной автором конструкции водоприемного устройства с разделителями потока показали следующее.

Для турбинного режима работы ГЭУ при малых углах конфузорности (наклона потолочного элемента) значительно увеличивается неравномерность потока на начальном участке водоприемной камеры вплоть до образования циркуляционных областей. При значительных углах существенно повышается неравномерность потока во входном участке водовода. Наилучшие энергетические условия в водоприемно-водовыпускной камере соответствуют углам в диапазоне 28° - 35° .

Для насосного режима работы в водоприемно-водовыпускной камере без разделителей потока малые значения углов диффузорности (наклона потолочного элемента) не обеспечивают уменьшение потерь напора потока в выходном сечении, а при больших углах образуются циркуляционные области и существенно увеличиваются потери напора выходящего потока. Это обусловлено двумя факторами: 1) расходом энергии потока на его циркуляцию и 2) ростом выходных потерь из-за увеличения неравномерности скоростей потока в выходном сечении водовыпускной камеры. Наилучшие энергосберегающие условия обеспечиваются при углах 12° - 9° . При этом большие значения соответствуют меньшей длине камеры $L \leq 3H$, средние – $L = (3-7)H$, а меньшие – $L = \geq 7H$. При использовании камер значительной длины рекомендовано применять переменную диффузорность.

Для турбинного режима работы размещение тонкостенных разделителей потока в водоприемно-водовыпускной камере существенного влияния на условия течения не оказывают. Структуры скоростей потока для этого случая представлены на рис. 5, а, б. При использовании разделителя потока переменной толщины наблюдалось незначительное увеличение скорости потока во входном сечении камеры (рис. 5, в).

Для насосного режима работы ГЭУ установка разделителей потока в водоприемно-водовыпускной камере оказывает существенное положительное влияние при увеличенных общих углах диффузорности. Выявлены оптимальные значения углов для отдельных секций. Так, при одном разделителе наилучшие условия работы наблюдались при углах, составляющих для каждой секции 8° - 10° и общим $\beta = 16^{\circ}$ - 20° . При размещении двух разделителей оптимальный общий угол β составил 21° - 27° , а для каждой секции – 7° - 9° .

Использование разделителя потока переменной толщины обеспечивало безотрывный поток в водовыпускной камере устройства при общем β до 30° , а каждой отдельной секции до 10° - 12° . При этом угол раскрытия разделительного элемента достигал 6° . Пример работы такого разделителя представлен на рис. 6.

Известно, что в выходном сечении водовыпускной камеры имеют место выходные потери, которые зависят не только от скорости выходного потока, но и от неравномерности распределения их по сечению:

$$h_{\text{вых}} = \alpha V^2 / 2g .$$

При большей неравномерности потока больше и выходные потери. В диссертационной работе подробно проанализировано влияние указанных выше варьируемых параметров водоприемно-водовыпускного устройства на коэффициент Кориолиса. Обработка и анализ результатов исследований позволили получить зависимости величины α , характеризующего неравномерность водного потока, от угла наклона потолочного элемента β .

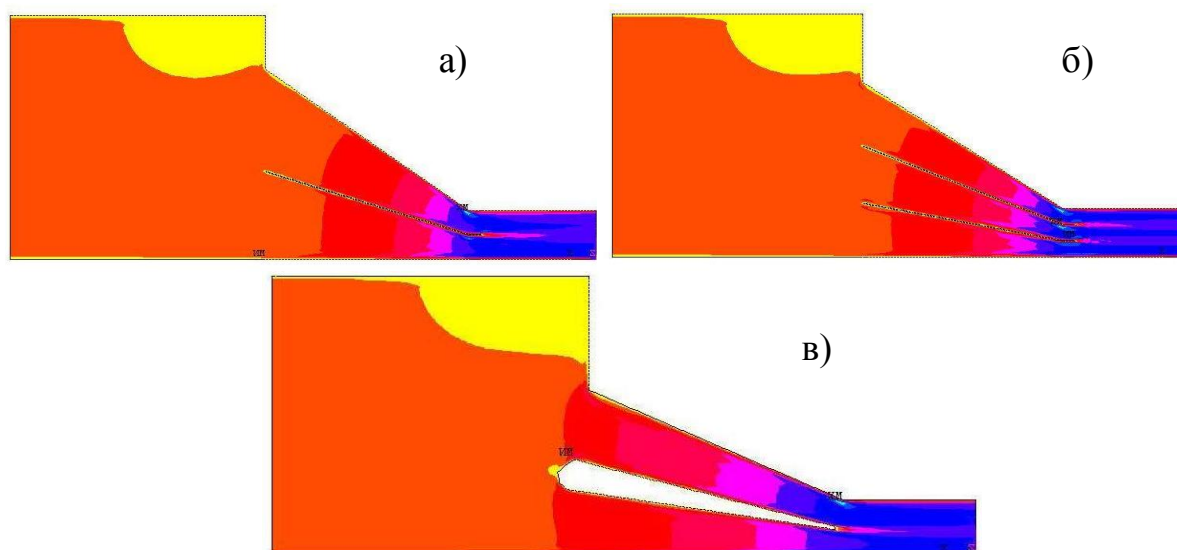


Рис. 5 – Турбинный режим:

- а) с одним разделителем , $L = 4H$, $\beta = 36^\circ$;
- б) с двумя разделителями потока, $L = 4H$, $\beta = 33^\circ$,
- в) с разделителем переменной толщины, $L = 4H$, $\beta = 24^\circ$.

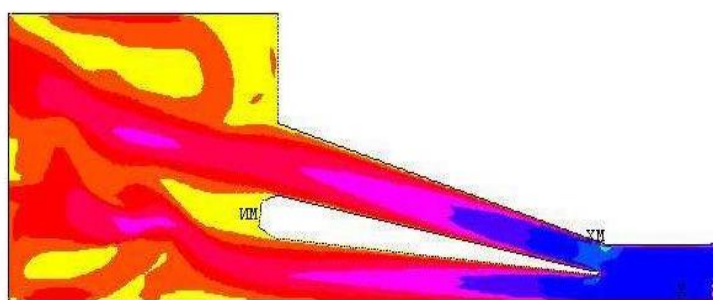


Рис. 6 – Насосный режим с разделителем потока переменной толщины, $L = 7H$ и $\beta = 18^\circ$

Пример графиков зависимости α для насосного режима работы водоприемно-водоотпускного устройства без разделителей потока приведен на рис. 7. Коэффициент α увеличивается значительно: для $L = 3H$ от 1,26 до 2,18 при изменении β от 6° до 12° , а для $L = 5H$ от 1,29 до 3,15.

Аналогичные зависимости получены для водоприемно-водоотпускного устройства с одним и двумя разделителями потока. Однако, значения коэффициента α при тех же общих углах β значительно меньше. Так при $\beta = 18^\circ$ и $L = 5H$ величина α при введении одного разделителя уменьшается с 3,14 до 1,87, т.е. в 1,7 раза, а при использовании двух разделителей – с 3,14 до 1,43, т.е. уже в 2,2 раза.

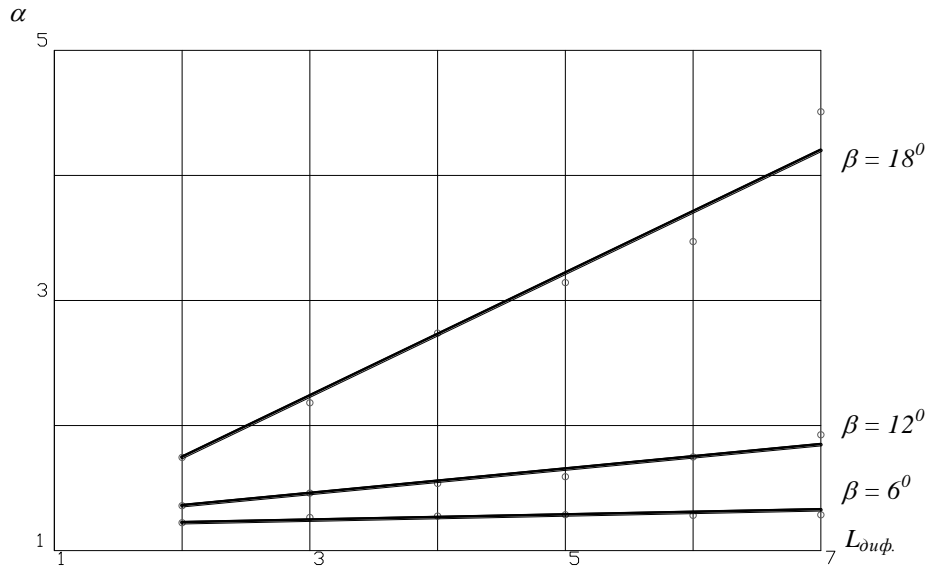


Рис. 7 – Графики зависимостей $\alpha = f(\beta, L_{\text{диф}})$ для насосного режима водоприемно-водоотпускного устройства без разделителей потока

Влияние основных параметров водоотпускной камеры на выходные потери представлены на рис. 8.

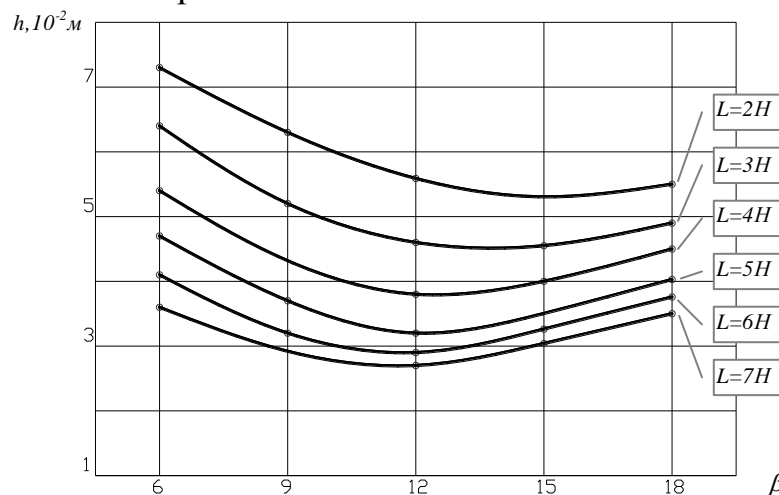


Рис. 8 – Графики зависимостей $h = f(L, \beta)$ для насосного режима

Исследования турбинного режима работы водоприемно-водоотпускного устройства позволили получить зависимость коэффициента

α от угла наклона потолочного элемента β . Из них следует, что при увеличении β от 0° до 28° коэффициент α во входном сечении водоприемно-водовыпускной камеры уменьшается с 1,52 до 1,15 и при дальнейшем увеличении угла β практически не изменяется. Однако во входном участке водовода за камерой коэффициент α начинает возрастать только при превышении угла β более 35° и достигает наибольшего значения 1,53. Это свидетельствует, о том, что наилучшие энергосберегающие условия в водоприемно-водовыпускной камере соответствуют углам β в диапазоне 28° - 35° .

Введение разделителей потока в водоприемной камере практически не увеличивает неравномерность потока по сравнению с водоприемно-водовыпускным устройством без разделителей.

Таким образом, из полученных результатов следует, что для одной и той же длины камеры (например, $L = 5H$) введение разделителя позволит увеличить угол раструбности до 24° без увеличения коэффициента α в насосном режиме и без ухудшения условий работы в турбинном режиме. Это значительно снизит выходные потери. Так же при введении разделителей появляется возможность уменьшить длину водовыпускной камеры без изменения коэффициента α , а, следовательно, уменьшить ее материалоемкость и капитальные вложения на строительство.

В **шестой главе** приведены результаты расчетов по реализации разработанной методики технико-экономического обоснования параметров водоприемно-водовыпускных устройств для средненапорной ГЭУ, примеры расчетов энергетической эффективности разработанных автором конструкций водоприемно-водовыпускных устройств.

Алгоритм методики обоснования параметров водоприемно-водовыпускного устройства реализован на ПЭВМ. Расчеты выполнены для средненапорной гидроустановки (на примере Загорской ГАЭС).

На рис. 9 приведены графики результатов расчетов по выбору параметров водоприемно-водовыпускного устройства ГЭУ.

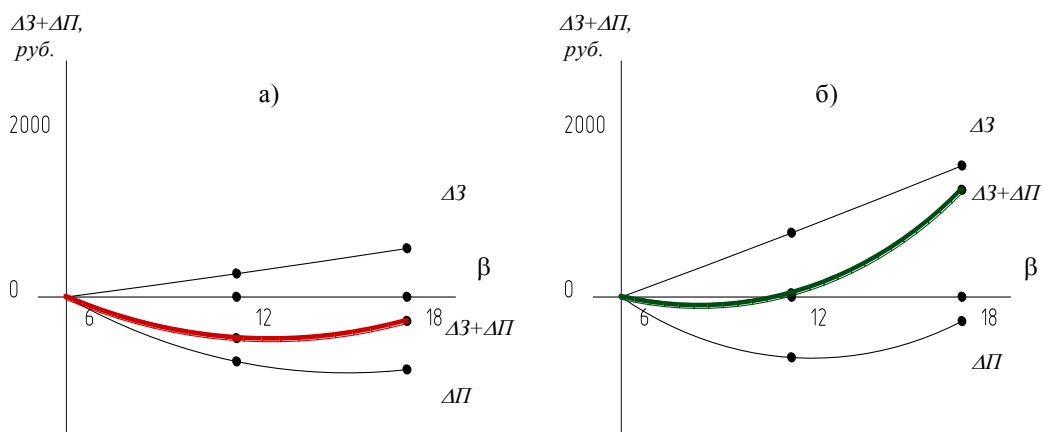


Рис. 9 – Оптимизационные графики зависимостей ΔZ , $\Delta \Pi = f(\beta)$ для водоприемника-водовыпуска без дополнительных устройств:
а) для $L = 2H$, б) для $L = 5H$

В диссертации выполнены также расчеты по экономической оценке эффективности применения предложенных новых конструктивных решений водоприемно-водовыпускных устройств ГЭУ.

Для водоприемного устройства с изменяющейся формой водоприемной камеры за счет исключения влияния пазов уменьшение потерь напора ГЭУ, работающей в турбинном режиме обеспечит получение дополнительной мощности около 12 кВт. При числе часов использования установленной мощности в турбинном режиме 2000 часов, дополнительная выработка электроэнергии только для одного агрегата составит около 24 тыс. кВт-ч, а для всей станции (6 гидроагрегатов) – более 140 тыс. кВт-ч. Экономия электроэнергии ГЭУ при ее работе в насосном режиме будет достигать 132 кВт-ч.

Приведены также расчеты по энергетической эффективности для водоприемно-водовыпускного устройства с разделителями потока.

Выполненные расчеты подтвердили целесообразность использования эффективных конструкций.

В **заключении** сформулированы основные выводы и результаты по диссертационной работе.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Выполнен анализ конструкций водоприемно-водовыпускных устройств гидроэнергетических установок, результатов их исследований и методов обоснования параметров, который выявил наличие значительного количества новых разработанных конструктивных решений по этим устройствам, позволяющих повысить эффективность использования энергии водного потока и работы ГЭУ в целом, а также показал необходимость разработки уточненной методики технико-экономического обоснования параметров водоприемно-водовыпускных устройств, учитывающей их конструктивные особенности и условия эксплуатации. В обоснованиях рекомендовано выделять основные и второстепенные параметры.

2. Уточнена классификация водоприемно-водовыпускных устройств ГЭУ по направлениям развития конструкций, а также по конструктивному признаку. Предложено выделить дополнительное направление совершенствования – комбинированное. При классификации по конструктивному признаку показана целесообразность выделения дополнительного подтипа – с потоконаправляющими устройствами, обеспечивающими исключение (уменьшение) циркуляционных областей в потоке.

3. Разработана методика технико-экономического обоснования параметров водоприемно-водовыпускных устройств ГЭУ, позволяющая учитывать конструктивные особенности и местные условия их эксплуатации. При выполнении оптимизационных расчетов на основе метода сравнительной экономической эффективности в качестве критериев оптимизации рекомендовано использовать выражения (4) и (5) соответственно для обоснования основных и второстепенных параметров водоприемно-водовыпускных

устройств ГЭУ. Местные условия эксплуатации предложено учитывать за счет использования «тарифного», «компенсирующего», «потребительского» или «рыночного» метода расчета стоимости потерянной электроэнергии.

4. Разработаны и обоснованы новые конструкции водоприемно-водовыпускных устройств ГЭУ, обеспечивающие исключение (уменьшение) циркуляционных областей в потоке и повышение эффективности работы ГЭУ в турбинном и насосном режимах: водоприемника с изменяющейся формой водоприемной камеры и возможностью исключения влияния пазов; водоприемника-водовыпуска с разделителями водного потока, обеспечивающими изменение раструбности водоприемно-водовыпускной камеры; водоприемного устройства с дополнительными камерами. На предложенные конструкции получены патенты на изобретения.

5. Выполнены комплексные экспериментальные исследования разработанных конструкций водоприемно-водовыпускных устройств ГЭУ на математических и физических моделях, на основании которых определены их наиболее рациональные параметры. Исследованиями выявлено, что:

для турбинного режима работы ГЭУ наилучшие энергетические параметры соответствуют углам конфузорности водоприемно-водовыпускной камеры в диапазоне 28° - 35° . С уменьшением этого угла увеличивается неравномерность потока на начальном участке камеры, а при его увеличении неравномерность потока возрастает во входном участке водовода;

для насосного режима работы наилучшие энергосберегающие условия в водоприемно-водовыпускной камере отвечают углам, составляющим 12° - 9° . Большее значение соответствует длине камеры $L \leq 3H$, среднее – $L = (3-7)H$, а меньшее – $L \geq 7H$. При использовании камер значительной длины рекомендовано применять переменную диффузорность;

установка разделителей потока в водоприемно-водовыпускной камере при работе ГЭУ в насосном режиме уменьшает потери напора в водовыпускной камере с большими углами диффузорности. При установке одного разделителя потока оптимальными углами β являются 16° - 20° (для каждой секции 8° - 10°), а при размещении двух разделителей – 21° - 27° (для секций 7° - 9°).

6. С использованием разработанной автором методики выполнен расчет по обоснованию параметров водоприемно-водовыпускного устройства средненапорной ГАЭС, а также проведена оценка эффективности применения предложенных новых конструктивных решений водоприемно-водовыпускных устройств ГЭУ. Расчеты подтвердили целесообразность использования эффективных конструкций.

**Список работ, опубликованных по теме диссертации:
публикации в научных изданиях, рекомендованных ВАК:**

1. Селивёрстов В.А. Результаты исследований водоприемного устройства гидроэнергетической установки с использованием программы «Ansys» [Текст] / В.А. Селивёрстов // Научно-технические ведомости СПбГПУ. – 2009. - № 4-2 (89). - С. 149-153.

2. Бальзанников М.И. Влияние конструкции водоприемного устройства ГАЭС на потери энергии при его работе в насосном режиме [Текст] / М.И. Бальзанников, В.А. Селивёрстов // Вестник МГСУ. - 2010. - № 1. - С. 175-181.

3. Бальзанников М.И. Исследования влияния разделителей потока для применения в водоприемных устройствах гидроэнергетических установок [Текст] / М.И. Бальзанников, В.А. Селивёрстов // Вестник СамГТУ. Серия «Технические науки». - 2009. - № 3 (25). - С.199-205.

4. Бальзанников М.И. Особенности выбора основных параметров конструкции водовыпускного сооружения секционного типа крупной насосной станции [Текст] / М.И. Бальзанников, В.А. Селивёрстов // Промышленное и гражданское строительство. - 2010. - № 8. - С. 20-22.

патенты:

5. Бальзанников М.И. Патент 2389846 Российская Федерация, МПК E02B9/00 Водоприемник / М.И. Бальзанников (RU), В.А. Селивёрстов (RU). - № 2008143016, заявл. 29.10.2008; опубл. 20.05.2010.

6. Бальзанников М.И. Патент 2389847 Российская Федерация, МПК E02B9/04 Водоприемник-водовыпуск / М.И. Бальзанников (RU), В.А. Селивёрстов (RU). - № 2008143011, заявл. 29.10.2008; опубл. 20.05.2010.

7. Бальзанников М.И. Патент 2392378 Российская Федерация, МПК E02B9/02 Напорный водовод гидроаккумулирующей электростанции / М.И. Бальзанников (RU), В.А. Селивёрстов (RU). - № 2009112154, заявл. 01.04.2009; опубл. 20.06.2010.

8. Бальзанников М.И. Патент 87431 Российская Федерация, МПК E02B9/00 Напорный водовод гидроаккумулирующей электростанции / М.И. Бальзанников (RU), В.А. Селивёрстов (RU). - № 2009112657, заявл. 06.04.2009; опубл. 10.10.2009.

публикации в научных изданиях:

9. Селивёрстов В.А. Влияние потоконаправляющих элементов на характеристики водовыпусков насосных станций [Текст] / В.А. Селиверстов // Научные проблемы энергетики возобновляемых источников. Сборник трудов Международной научн.-техн. конф. / СамГАСА. - Самара, 2000. - С. 101-102.

10. Евдокимов С.В. Экспериментальные исследования энергоустановок на напорных моделях [Текст] / С.В. Евдокимов, В.А. Селиверстов // Актуальные проблемы в строительстве и архитектуре. Материалы региональной 59-й научно-техн. конф. – Самара, 2002 г. - С.384-387.

11. Селивёрстов В.А. Анализ традиционных и новых компоновочных и конструктивных решений водопроводящих трактов энергетических устано-

вок [Текст] / В.А. Селивёрстов // Гидротехника и гидроэнергетика: проблемы строительства, эксплуатации, экологии и подготовки специалистов. Сборник трудов Международной научн.-техн. конф. / СамГАСА. – Самара, 2002. – С. 158 – 160.

12. Евдокимов С.В. Новые конструктивные решения элементов водопроводящего тракта гидроэнергетических установок [Текст] / С.В. Евдокимов, В.А. Селивёрстов // Актуальные проблемы в строительстве и архитектуре. Образование. Наука. Практика: материалы региональной 60-й научн.-техн. конф. / СамГАСА - Самара, 2003. - С. 46-49.

13. Селивёрстов В. А. Конструктивные решения элементов проточной части лопастных насосов [Текст] / В.А. Селиверстов // Актуальные проблемы в строительстве и архитектуре. Образование. Наука. Практика: материалы региональной 61-й научн.-техн. конф. по итогам НИР за 2003 г. Часть 2 / СамГАСА. – Самара, 2004. - С. 82-87.

14. Евдокимов С.В. Повышение конкурентоспособности малых гидроэнергетических установок в современных условиях [Текст] / С.В. Евдокимов, В.А. Селиверстов // Miedzynarodowa konferencja naukowa. II Okragly stol Hydroenergetyki Wisla-Wolga. Wloclawek. 4-6.10.2004.

15. Селивёрстов В.А. Разработка методики проведения лабораторных исследований потоконаправляющих элементов гидроэнергетических установок [Текст] / В.А. Селивёрстов // Актуальные проблемы в строительстве и архитектуре. Образование. Наука. Практика: материалы региональной 62-й научн.-техн. конф. по итогам НИР за 2004 г. Часть 2 / СамГАСА. – Самара, 2005. - С. 82-87.

16. Бальзанников М.И. Техничко-экономическое обоснование параметров конструкции водоприемника ГЭС [Текст] / М.И. Бальзанников, В.А. Селивёрстов // Традиции и инновации в строительстве и архитектуре. Материалы 67-й Всероссийской научн.-техн. конф. по итогам НИР за 2009 г. / СГАСУ. - Самара, 2010. - С. 531-533.

17. Селивёрстов В.А. Исследование водоприемных устройств в программе «ANSYS» [Текст] / В.А. Селивёрстов // Традиции и инновации в строительстве и архитектуре. Материалы 67-й Всероссийской научн.-техн. конф. по итогам НИР за 2009 г. / СГАСУ. - Самара, 2010. - С. 548-550.