

На правах рукописи



ГОДИН Павел Александрович

**ОБОСНОВАНИЕ МОБИЛЬНЫХ ПОДПОРНЫХ СООРУЖЕНИЙ
КОМПЛЕКСНОГО НАЗНАЧЕНИЯ ДЛЯ МАЛЫХ ВОДОТОКОВ**

Специальность: 05.23.07 – «Гидротехническое строительство»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Новочеркасск – 2013

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Южно-Российский государственный технический университет» и федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Новочеркасская государственная мелиоративная академия»

Научный руководитель — кандидат технических наук, доцент
Кашарин Денис Владимирович

Официальные оппоненты: **Иванов Владимир Михайлович**, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВПО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова», заведующий кафедрой теплотехники, гидравлики, водоснабжения и водоотведения

Лаврентьев Вадим Леонидович,
кандидат технических наук, доцент,
ФГБОУ ВПО «Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)», профессор кафедры гидротехнических сооружений и гидравлики

Ведущая организация — ФГБОУ ВПО «Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет»

Защита состоится «18» июня 2013г. в 14 часов на заседании диссертационного совета ДМ 212.171.03 в ФГБОУ ВПО «Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)» по адресу: 630008, г. Новосибирск, ул. Ленинградская, 113.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Новосибирского государственного архитектурно-строительного университета (Сибстрин).

Автореферат разослан

«26» апреля 2013г.

Учёный секретарь диссертационного совета
кандидат технических наук, доцент

Дзюбенко Л. Ф.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Согласно проведённому анализу, в настоящее время вблизи малых водотоков Российской Федерации расположено около 90% сельскохозяйственных объектов и населённых пунктов. Многие из них являются территориально разрозненными и удалёнными от централизованных инженерных сетей, сезонно-действующими объектами небольшой энергоёмкости (фермерские хозяйства, коттеджи, малые предприятия и т.д.), поэтому для их водо- и энергоснабжения экономически целесообразно использовать местные водные ресурсы – малые реки и каналы. В большинстве своём они являются равнинными, с глубиной до 1,5 метров в меженный период и средним многолетним расходом менее 5 м³/с. Эти водотоки наиболее уязвимы при антропогенном воздействии, поэтому требуется достаточная пропускная способность их русла с целью сохранения экологического состояния, обеспечения транспорта наносов, нереста рыбы, предотвращения затопления прилегающих территорий в период половодий и паводков. В то же время для надёжного водо- и энергоснабжения необходимо аккумулировать речной сток. В связи с этим актуальна разработка мобильных подпорных сооружений комплексного назначения (МПСКН) для создания сезонного водохозяйственного узла с автономным энергообеспечением на базе низконапорной мембранно-вантовой плотины из композитных материалов, устанавливаемой на каналах или малых реках с глубинами до 1,5 м. Условия создания и использования данных конструкций предъявляют к ним такие требования как: свободный пропуск водного потока в период половодий и паводков, мобильность, сборно-разборность, низкая материалоёмкость и малая стоимость, простота монтажа и эксплуатации.

Исследования проводились в рамках НИОКР №7050p/9666-3 «Разработка экологически безопасных технологий, моделей и устройств комплексной переработки энергии», а также в рамках Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы, НИР по теме: «Исследования и анализ технологических схем и конструкций энергетических комплексов на базе ВИЭ для индивидуального децентрализованного энергоснабжения» (государственный контракт № 02.740.11.0476), а также в соответствии с тематическим планом НИР ФГБОУ ВПО НГМА по теме 03.01.01 «Разработать технологии проектирования, эксплуатации и управления мелиоративными системами, обеспечивающими воспроизводство природно-ресурсного потенциала агроландшафта».

Цель исследований заключается в разработке новых технических решений и обосновании методов расчёта сезонно-действующих мобильных подпорных сооружений комплексного назначения для автономного водо- и энергоснабжения децентрализованных потребителей, расположенных вблизи малых водотоков.

Основные задачи исследований:

- провести анализ существующих конструкций водоподпорных сооружений и гидроагрегатов для малых водотоков, их теоретических и экспериментальных исследований;
- разработать конструкции МПСКН для малых водотоков, обеспечивающие водо- и энергоснабжение объектов малой энергоёмкости;
- провести математическое моделирование напряжённо-деформированного состояния водоподпорной оболочки и гидравлических усло-

вий подхода потока в верхнем бьефе для оптимизации параметров сооружения, обеспечивающих минимальные потери напора и увеличение номинальной мощности гидроагрегата;

- выполнить лабораторные и натурные исследования варианта конструкции, выбранного в ходе математического моделирования конфузора, сравнить с данными, полученными в ходе численного моделирования, и на их основании получить зависимости для определения параметров МПСКН;

- разработать методику проектирования предложенных конструкций МПСКН для малых водотоков.

Научную новизну работы составляют:

- новые конструкции МПСКН на основе мембранно-вантовой плотины, гидроагрегата и конфузора, защищённые патентом на изобретение (пат. RU 2378451), с более высокими показателями скорости возведения, эффективности выработки электроэнергии, меньшим влиянием на экологию водотока по сравнению с существующими конструкциями;

- на основе результатов численного моделирования условий подхода потока в верхнем бьефе обоснована необходимость установки гибкого конфузора, обеспечивающего минимальные потери энергии;

- впервые на основе проведённого численного моделирования и результатов экспериментальных исследований МПСКН обоснована конфигурация и конструкция гибкого конфузора и рисбермы в зависимости от гидравлических условий работы;

- впервые выполнен сравнительный анализ результатов экспериментальных и натурных исследований МПСКН и на их основе получены зависимости по определению геометрических параметров конструкции.

Практическую ценность работы составляют:

- разработаны сезонно-действующие МПСКН, обеспечивающие водо- и энергоснабжение децентрализованных потребителей вблизи малых водотоков;

- разработанное руководство по проектированию, строительству и эксплуатации МПСКН с применением композитных материалов, обеспечивающих высокую эффективность работы при различных условиях эксплуатации, утверждённое в «Южный специализированный научный Центр по проектированию объектов мелиорации и водного хозяйства», рекомендовано для применения в водохозяйственном строительстве.

Внедрение МПСКН осуществлялось на Ольгинском полигоне Ростовской области, экономический эффект внедрения составил 60 тыс. руб. на одно сооружение.

Достоверность полученных результатов обосновывается: численным моделированием с использованием существующих гидромеханических решений для потока реальной несжимаемой жидкости, результаты которого подтверждены значительным объёмом экспериментальных данных, полученных в ходе лабораторных исследований; использованием методов математической статистики и программных средств при обработке результатов экспериментов; применением аттестованной измерительной аппаратуры и приборов; удовлетворительной сходимостью натурных и экспериментальных исследований с результатами других авторов.

Основные положения, выносимые на защиту:

- новые конструкции МПСКН с гибким конфузorzом;
- эмпирические зависимости по определению конфигурации водоподпорной оболочки и конфузора из композитных материалов, параметров гидроагрегата для различных условий работы;
- методика расчёта и проектирования МПСКН и алгоритм подбора конструкции для различных условий установки, полученных на основе математического моделирования и экспериментальных исследований;
- эксплуатационные характеристики МПСКН, полученные в ходе исследований внедрённой конструкции.

Личный вклад автора заключается в разработке, научном обосновании и усовершенствовании технических решений МПСКН; проведении численного моделирования, лабораторных и натурных исследований; получении экспериментальных зависимостей по определению параметров МПСКН, разработке методики проектирования и внедрении.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались на заседаниях кафедры «Гидротехнические сооружения» ФГБОУ ВПО НГМА (2006-2012 г.); кафедр «Тепловые электрические станции»; «Водного хозяйства предприятий и населенных мест» ФГБОУ ВПО ЮРГТУ (2012 г.); на научно-технических конференциях, проводимых в НГМА (2007 – 2012г.); всероссийской научно-практической конференции «Энергосберегающие технологии в АПК» (г. Пенза, 2007 г.); международной конференции «Проблемы повышения продуктивности мелиоративных земель» (г. Новочеркасск, 2008 г.); международной конференции «Информационные технологии в обследовании эксплуатируемых зданий и сооружений» (ЮРГТУ, 2009 г.); всероссийской конференции «Социально-экономические аспекты современного развития АПК: опыт, проблемы, перспективы» (г. Саратов, 2009); IV всероссийской выставке-ярмарке научно-исследовательских работ, научно-инновационных разработок и проектов студентов, аспирантов и молодых учёных высших учебных заведений Российской Федерации «ИННОВ – 2009», семинаре ФГБОУ ВПО НГСУ (Сибстрин) 2012 г. На итоговой сессии программы «У.М.Н.И.К» по представленной работе «Проектирование мобильных подпорно-регулирующих ГЭС для водохозяйственного строительства» автор признан победителем (2008 г.).

Публикации. Основные положения диссертации опубликованы в 5 работах, в том числе 3 статьи в журналах и изданиях, рекомендуемых ВАК Минобрнауки России, патент на изобретение (пат. RU 2378451).

Структура и объём диссертации. Диссертация состоит из введения, 5 глав, общих выводов, приложения и списка литературы из 145 наименований, в том числе 11 зарубежных. Работа содержит 195 страниц текста, из них 179 основного текста, включая 111 рисунков, 19 таблиц и 10 приложений.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, сформулированы цель и задачи, указаны методы исследования, определены научная новизна и практическая ценность результатов, изложены основные положения, выносимые на защиту, приведены сведения об апробации основных результатов.

В первой главе на основе анализа литературных источников приведена оценка современного состояния и перспектив развития конструкций низкона-

порных сооружений для малых водотоков, а также энергоустановок, основанных на использовании природных возобновляемых источников энергии (ВИЭ) и устраиваемых в труднодоступных, удалённых от централизованных электрических сетей районах, для электроснабжения объектов малой энергоёмкости. Определены факторы, характеризующие автономных водо- и энергопотребителей: территориальная разобщённость; малая мощность и индивидуальный характер нагрузки; уровень квалификации персонала, обслуживающего энергоустановки; необходимость создания низконапорного сезонного сооружения комплексного назначения. На основании оценки условий работы мобильных гидроэнергоустановок различного типа, а также требований потенциальных потребителей для последующей разработки выбраны мобильные, автономные микро ГЭС, применяемые в качестве сезонных водоподпорных сооружений на естественных и искусственных малых водотоках, в составе низконапорной плотины.

В ходе проведённого анализа конструкций низконапорных сооружений для малых водотоков обосновано применение мембранно-вантовой плотины в качестве водоподпорного элемента, которая обеспечивает подпор до 4 метров и имеет ряд преимуществ: возможность возведения в кратчайшие сроки, простоту и удобство эксплуатации, низкую материалоемкость. Теоретические исследования и расчёт мягких незамкнутых оболочек, входящих в состав мембранно-вантовой плотины, рассмотрены в работах Бондаренко В. Л., Волосухина В. А., Затворницкого О. Г., Кашарина В. И., Кашариной Т. П., Кузнецова Е. С., Розанова Н. П., Сергеева Б. И., Степанова П. М., Хуберяна К. М., Цивинной И. М., Шумакова Б. Б., Щедрина В. Н. и др. Из зарубежных авторов следует отметить работы Анвара Н. О., Бинние А. М., Мика Л., Отто Ф., Павберы Р. Д., Тростеля Р., Харрисона Х. Б., Хитха Н. М. и других учёных и специалистов.

Для определения параметров МПСКН на базе мембранно-вантовой плотины из композитных материалов требуется проведение исследований совместной работы водоподпорной оболочки, конфузора и турбины, так как изменяются условия похода потока в верхнем бьефе и сопряжения в нижнем по сравнению с существующими.

Анализ известных конструкций малых и микроГЭС Бирюкова Е. С., Блинова Б. С., Гудикова Н. А., Ленева Н. И., Логинова М. И., Новикова Ю. М., Кашарина Д. В. и других показал перспективность применения конструкции на основе мембранно-вантовой плотины из композитных материалов и переносного гидроагрегата с поперечно-струйной турбиной Банки для малых водотоков. Исследованиям турбин этого типа посвящены работы Агуерре С., Агуерре Р., Котенкова И. В., Сарате Ф., Станисция С. и др.

Преимущество МПСКН заключается в том, что она может быть установлена в короткие сроки (от 2 до 24 часов в зависимости от её параметров, технологии возведения, с учётом опыта внедрения мембранно-вантовых плотин). Кроме этого, такая конструкция мобильная, может использоваться многократно, проста в изготовлении, имеет низкую стоимость и материалоемкость. Определено, что в данной конструкции эффективность использования гидроэнергетического потенциала водотока снижена из-за неоптимального, с точки зрения гидравлики, подхода потока к турбине.

Проведённый обзор научно-технической литературы и выводы, сделанные в первой главе, предопределили направление конструктивных решений,

конкретизировали цель и задачи исследований, обеспечение водоснабжения и энергоснабжения децентрализованных потребителей.

Во второй главе на основе анализа известных технических решений микро и малых ГЭС, определена область их применения, достоинства и недостатки. Проведён анализ характеристик и условий работы гидроагрегатов для микро и малых ГЭС, в результате которого автором предложено в качестве гидроагрегата для МПСКН использовать поперечно-струйные турбины, работающие при частоте оборотов 250...400 об/мин, расходах от 0,02 до 3 м³/с и напорах от 1 м.

В главе приведено описание конструкций МПСКН на основе мембранно-вантовой плотины из композитных материалов с переносным гидроагрегатом, из-за значительных потерь напора при подходе к которому снижается эффективность использования энергии водного потока. В связи с этим автором предложена новая конструкция МПСКН с конфузором из композитных материалов (пат. RU 2378451), обеспечивающая минимальные потери напора, мобильность, оптимальные условия подхода потока (рис. 1).

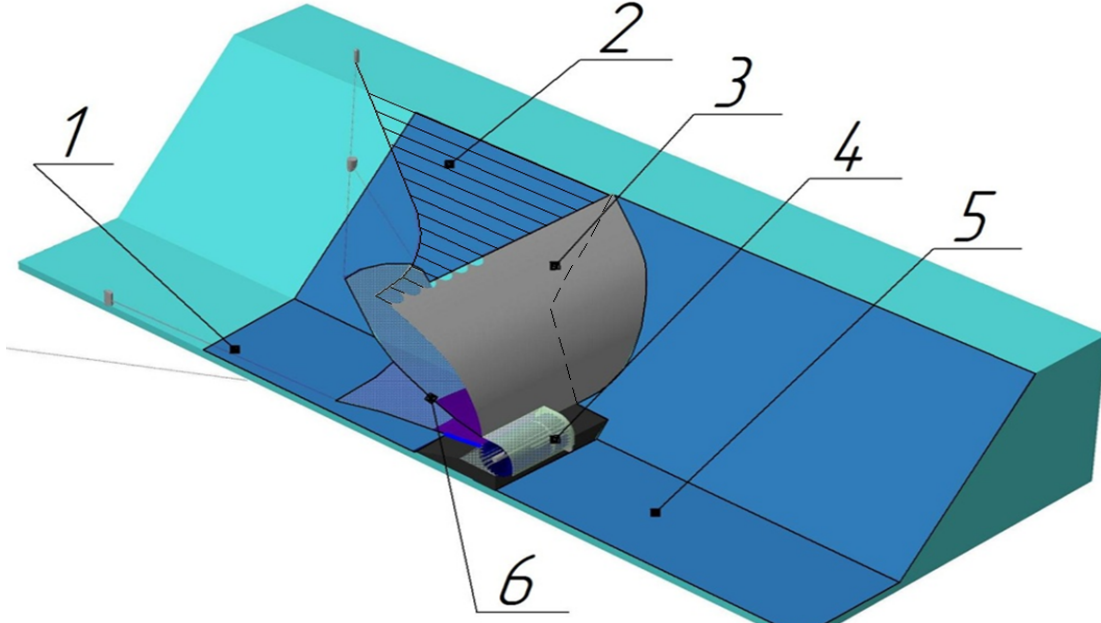


Рис. 1. Общий вид установки МПСКН с гибким конфузором из композитных материалов (пат. RU 2378451):

1 – понур; 2 – вантовая система; 3 – водоподпорная оболочка;
4 – гидроагрегат; 5 – рисберма; 6 – гибкий конфузор

Конструкция МПСКН с гибким конфузором обеспечивает подпор уровней воды в водотоке от 1 до 4 м и производимую мощность до 160 кВт при пролёте в диапазоне от 1 до 50 м, с учётом опыта внедрения мембранно-вантовых плотин и возможного гидроэнергетического потенциала водотока.

Сооружение снабжено гибким конфузором с рёбрами жесткости, который закреплён с помощью вант, береговых анкерных опор и русловых анкеров. Конфузор прикреплён к гидроагрегату совместно с водоподпорной мембраной, закреплённой к дополнительным русловым анкерным опорам с помощью гибких связей. Положение водоподпорной мембраны, зависящее от уровня воды в верхнем бьефе, регулируется за счёт изменения длины гибких связей (рис. 1).

Предложены новые технические решения, предусматривающие защиту конструкции от наносов; водосброс и рыбопропуск; установку гидроагрегата на

грунтоармированном основании или наполняемой оболочке и др., которые подробно описаны в диссертации. На основании существующих и разработанных технических решений составлена классификация МПСКН, которая приведена во второй главе.

Для изготовления водоподпорной оболочки используется тканевый композитный материал, который представляет собой матрицу из эластомера с определённым распределением в ней армирующих волокон. Выполнен анализ существующих материалов, на основе которого выбран композитный материал *UNISOL 630*, обладающий высокими прочностными и эксплуатационными свойствами, характеристики которого приведены в диссертации. Применение этого материала позволит увеличить надёжность конструкции, уменьшить затраты на её изготовление, сократить сроки установки и демонтажа.

В третьей главе выполнен анализ известных методик расчёта элементов мембранно-вантовых конструкций из композитных материалов и поперечно-струйного гидроагрегата. Для определения очертания водоподпорной оболочки при различных углах касательной к узлу крепления и гребню $\Phi_{кр}, \Phi_{гр}$ выбрана система трёх нелинейных уравнений, предложенная Волосухиным В. А. и Кашариным В. И., которая наиболее соответствует экспериментальным данным, расчётная схема приведена на рисунке 2.

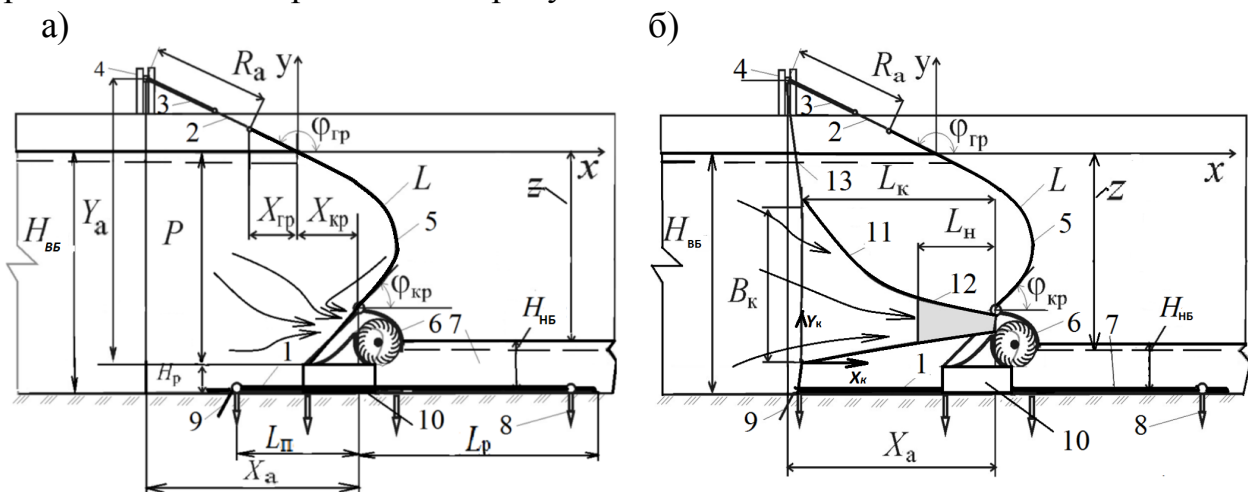


Рис. 2. Расчётные схемы исследуемых конструкций:

a – схема МПСКН без конфузора; *b* – схема МПСКН с конфузором: 1 – понур; 2 – ванты – оттяжки; 3 – ванта–подбор; 4 – береговые анкерные опоры; 5 – водоподпорная оболочка; 6 – гидроагрегат; 7 – рисберма; 8 – русловые анкера; 9 – узел крепления понура; 10 – основание гидроагрегата; 11 – гибкий конфузор; 12 – жёсткий насадок; 13 – крепление конфузора

Расчёт параметров вантовой фермы выполняется по известным зависимостям:

$$\text{тангенс угла между вантой-оттяжкой и вантой-подбора} \quad \text{tg}\beta_n = \frac{V \cdot \text{tg}\beta}{\sum_{i=1}^n P_{Bi}}; \quad (1)$$
$$\text{усилие в ванте подбора} \quad N = \sqrt{(V \cdot \operatorname{tg} \beta)^2 + \left(\sum_{i=1}^n P_{\text{би}} \right)^2}; \quad (2)$$
$$\text{общая длина вант-оттяжек} \quad l = \sqrt{a_{n-1}^2 + \frac{\left[a_{n-1} \sum_{i=1}^{n-1} (P_{Bi} \operatorname{ctg} \beta) \right]^2}{V^2}}, \quad (3)$$

где β_n – угол между вантой-оттяжкой и вантой-подбора; V – усилие в ванте-подбора; P_v – усилие в ванте-оттяжке, β – угол наклона ваны подбора.

Оболочка крепится к вантовой системе, гидроагрегату и основанию. Предельная нагрузка $P_{пр}$ на анкер, при которой происходит его вырывание, определяется из условия равновесия сил для момента срыва с учётом деформированного состояния берегового анкера по формуле Коровникова Т.Н.:

$$P_{пр} \cos(P_{пр}/K_n l - \beta) = \alpha P_{пр} \sin(P_{пр}/K_n l - \beta) \operatorname{tg} \varphi + F_o, \quad (4)$$

где φ – угол наклона хорды; β – угол наклона силы $P_{пр}$ к горизонту; F_o – начальное усилие в узле крепления ваны-оттяжки; $P_{пр} = K_n / \varphi$; K_n – коэффициент пропорциональности, $K_n = 7,55$ кН/м определён опытным путём.

Устойчивость МПСКН на гибком флютбете для любого поперечного очертания сечения русла обеспечивается следующим условием:

$$\frac{R}{F} = \frac{2(f + R_k) \cdot L_n \cdot [\rho(0,5 \cdot z - t) + \rho_n \cdot t]}{\rho(H_{вб}^2 - H_{нб}^2)}, \quad (5)$$

где R – сила сопротивления сдвигу, H ; F – равнодействующая горизонтальной проекции силы гидростатического давления, H ; f – коэффициент трения флютбета о грунт основания; R_k – коэффициент, учитывающий реакции анкеров; L_n – длина понура, м; z – геометрический перепад, м; ρ и ρ_n – соответственно плотность воды и материала гибкого понура, кг/м³; t – толщина понура, м.

Так как мембранно-вантовая плотина относится к IV классу, для обеспечения надёжной работы сооружения должно выполняться условие $R/F \geq 1,10$.

В результате теоретических исследований автором получено уравнение для определения мощности турбины в ваттах, в зависимости от частоты вращения:

$$N_t = \rho \cdot \frac{n^2 \cdot D^2}{\varphi^2 \cdot 171,902} \cdot Q \cdot \eta, \quad (6)$$

где n – частота вращения турбины, с⁻¹; H_t – напор на турбине, м; D – диаметр турбины, м; φ – коэффициент скорости; Q – расход воды, м³/с; η – коэффициент полезного действия.

По результатам теоретических исследований определены задачи численного моделирования. Математическое моделирование конструкции, на основании существующих зависимостей позволило определить оптимальные параметры оболочки и вантовой системы. Углы к касательным оболочки нижнего края составляют $\varphi_{кр} = 85^\circ$ и верхнего $\varphi_{пр} = 160^\circ$, и высота оболочки $P = 0,9$ м, при которых она работает нерационально (вследствие увеличения нагрузки на оболочку), но это позволяет снизить потери напора при подходе к гидроагрегату. Далее производилось численное моделирование водоподпорной оболочки, в результате которого определён характер изменения формы оболочки, распределения напряжений под действием гидростатического давления, необходимое для определения проектного положения и дальнейшего сравнения с экспериментальными данными.

Параметры выходного сечения гибкого конфузора соответствуют размерам подводящего аппарата турбины: ширина 0,69 м, высота 0,07 м при расходе 0,01...0,07 м³/с и напоре на турбине 0,1...0,65 м, с диаметром турбины 0,2 м. Для предварительного определения продольного сечения конфузора в плане было произведено численное моделирование по программе COMSOL

Multiphysics, позволяющей методом конечных элементов на основе осредненного по Рейнольдсу уравнения Навье-Стокса (RANS) для реальной несжимаемой жидкости определить параметры и структуру потока при подходе к гидроагрегату более точно, чем существующие аналитические зависимости (рис. 3).

При моделировании движения потока принято следующее уравнение:

$$\nabla_t u = 0; L_{entr} \nabla_t \times \left[pI - \eta (\nabla_t u + (\nabla_t u)^T) \right] = -\eta p_{entr}, \quad (7)$$

где ∇ – оператор Гамильтона; $\nabla_t u$ – функция скорости по времени; L_{entr} – ширина подводящего русла; p – давление в точке; T – время; η , I – коэффициенты, учитывающие неравномерность распределения скоростей и давления; p_{entr} – давление на входе.

Граничные условия на выходе приняты по уравнению:

$$\eta [\nabla u + (\nabla u)^T] n = 0, p = p_0. \quad (8)$$

Движение жидкости в канале описывается уравнением:

$$\rho u \times \nabla u = \nabla \times \left[pI + \eta (\nabla u + (\nabla u)^T) \right] + F, \nabla \times u = 0, \quad (9)$$

где F – векторное поле массовых сил.

Результаты численного моделирования продольного сечения конфузора сопоставимы с данными, полученными С. М. Слиским. При расчёте продольного сечения конфузора можно исходить из очертания свободной поверхности струи, вытекающей из-под тонкой стенки. Оптимальным очертанием продольного сечения конфузора принята эллиптическая форма. На основе результатов моделирования потока при подходе к гидроагрегату (рис. 3) и существующих положений по определению его поперечного сечения в программе *Solid Works* построены трёхмерные модели вариантов конфузора различной длины.

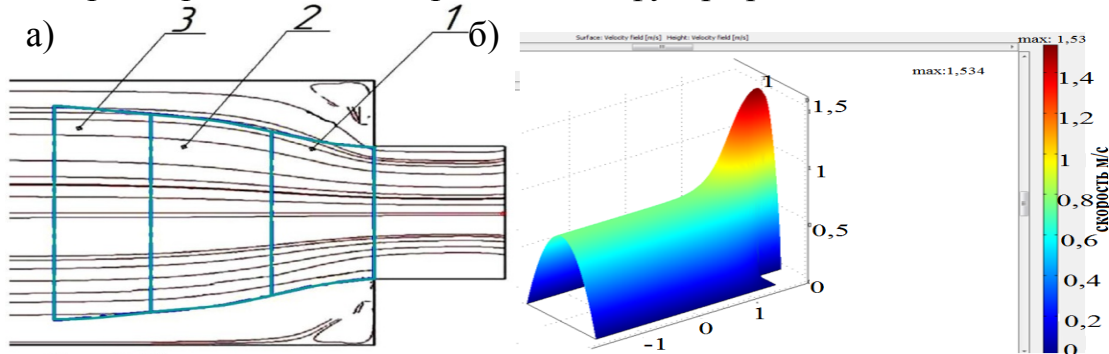


Рис. 3. Численное моделирование потока при подходе к гидроагрегату:

- а) линии тока в верхнем бьефе сооружения: 1,2,3 – варианты конфузора в плане различной длины; б) распределение скоростей при подходе к гидроагрегату

На следующем этапе решалась пространственная задача с целью выявления оптимального варианта конфузора. С использованием программного обеспечения *COSMOS Flo Xpress* (приложение *Solid Works*), в котором применяется уравнение Сен-Венана для описания установившегося движения реальной несжимаемой жидкости с применением метода конечных объёмов. Численное моделирование позволило определить скоростную структуру и распределение гидродинамического давления потока, действующего на конфузор.

Оптимальная форма конфузора была определена из условия наименьших потерь напора при его минимальных параметрах (рис. 4).

В процессе анализа распределения гидродинамического давления установлено, что наибольшие деформации конфузора могут наблюдаться при макси-

мальном расходе $0,07 \text{ м}^3/\text{с}$ и напоре $0,65 \text{ м}$, вследствие образования области пониженного давления.

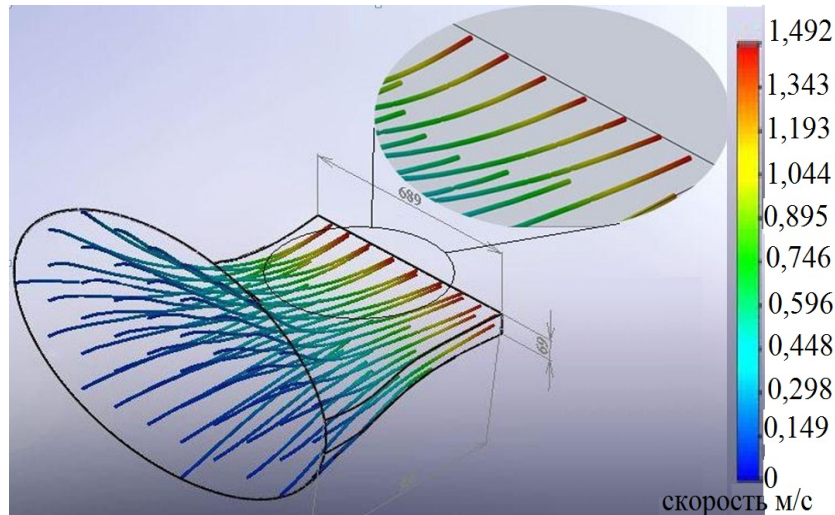


Рис.4. Численная модель рациональной формы конфузора с указанием скоростной структуры потока при расходе $0,07 \text{ м}^3/\text{с}$

Для определения деформации конфузора выполнялось численное моделирование при расходе $0,07 \text{ м}^3/\text{с}$ с помощью программы *APM Win Machine* методом конечных элементов при допущениях: оболочка является безмоментной; используемый композитный материал является однородным (рис. 5).

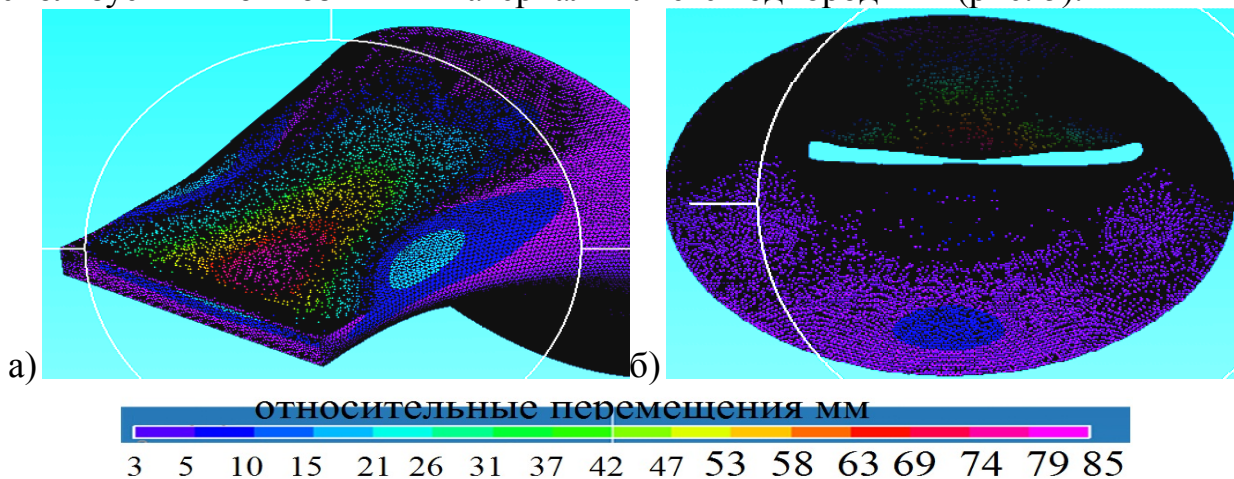


Рис. 5 Численное моделирование деформации конфузора:

а) вид снизу; б) вид спереди

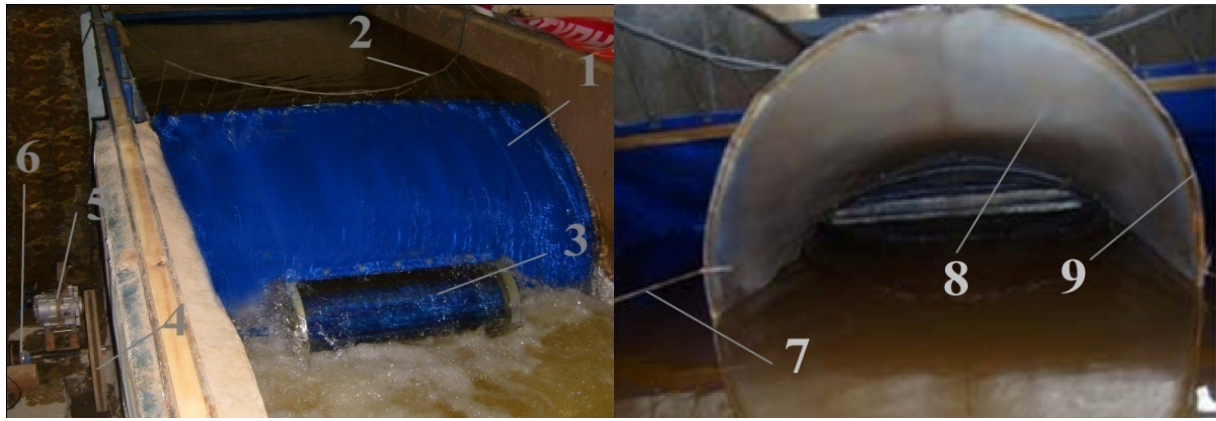
В результате моделирования установлено, что максимальные деформации в конфузоре возникают на нижнем участке, равном $1/3$ его длины. Для предотвращения деформации эту часть целесообразно изготавливать из более жесткого материала.

Четвёртая глава содержит результаты экспериментальных исследований работы МПСКН на физической модели в лаборатории кафедры гидротехнических сооружений ФГБОУ ВПО НГМА. Внешний вид лабораторной установки представлен на рисунке 6.

Модель МПСКН размещалась в гидравлическом бетонном лотке шириной – $1,5 \text{ м}$, высотой – $1,2 \text{ м}$, длиной – 10 м . Минимальный допустимый масштаб моделирования:

$$\alpha_{min} = (30 \dots 50) \cdot \sqrt[3]{V_n^2 \cdot R_n^2} = 11 \dots 15, \quad (10)$$

где V_n – скорость в натуре; R_n – гидравлический радиус в натуре



а)

б)

Рис. 6 Лабораторная установка:

а) общий вид установки: 1 – оболочка; 2 – вантовая система; 3 – гидроагрегат; 4 – ременная передача; 5 – генератор 6 – датчик частоты вращения б) – вид со стороны верхнего бьефа: 7 – оттяжки конфузора; 8 – оболочка конфузора; 9 – ребро жёсткости конфузора.

Масштаб модели принят 1:4 в соответствии с параметрами лотка и натурального сооружения, высота модели равна 0,95 м (рис. 7). В выбранном диапазоне расходов наблюдается автомодельность по числу Рейнольдса:

$$Re_r = V \cdot R / \nu \geq 11000, \quad (11)$$

где V – средняя скорость потока, м/с; R – гидравлический радиус, м; ν – коэффициент кинематической вязкости м²/с.

На основании этого, в качестве основного был выбран критерий Фруда, масштабные коэффициенты моделирования приведены в диссертации.

В главе приведены расчёты по обоснованию условий моделирования, методика эксперимента и результаты расчётов по определению относительных погрешностей измерений глубин и скоростей потока, которые не превышали 3%.

При прохождении потока через турбину его энергия уменьшается, изменяются условия сопряжения бьефов, в связи с этим проводились экспериментальные исследования с целью определения условий сопряжения потока в нижнем бьефе и параметров рисбермы (рис.7).

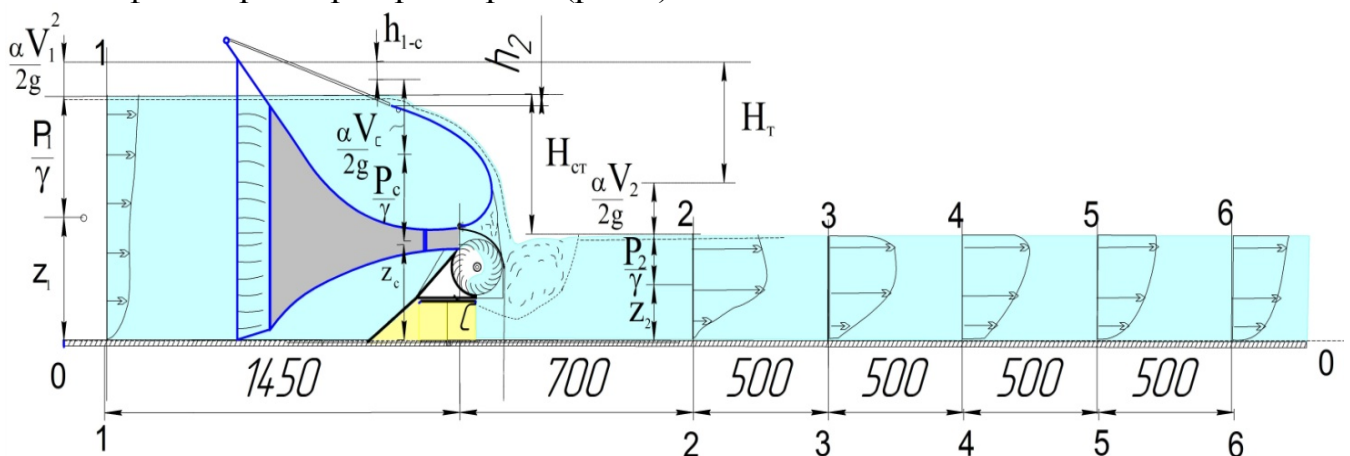


Рис. 7. Схема экспериментальной установки с результатами замеров скоростей

Для определения гидравлических условий работы сооружения в верхнем и нижнем бьефах производились: измерения направления и значения скоростей потока микровёртушкой Х–6 одноточечным, двухточечным и трёхточечным

способами (вторичным прибором являлся частотомер); определения уровней воды в створах – шпигенмасштабом; измерения потерь напора h_{l-c} при подходе к турбине – пьезометром; визуализация линий тока фиксировалась при помощи нитей; измерения расхода – по мерному водосливу. В ходе проведения эксперимента определялись очертания формы конфузора при помощи координатника, а водоподпорной оболочки – при помощи фотометрической съёмки на основании этих данных графоаналитическим способом определялась статическая нагрузка на оболочку.

Частота вращения вала турбины определялась при помощи датчика, состоящего из диска с 60-ю отверстиями и фотоэлемента, и выводом сигнала на частотомер.

Выполнены три серии опытов с изменением расхода в диапазоне от 10 до 70 л/с. В первой серии проводилось исследование сооружения без конфузора. На основании сопоставления полученных результатов по форме оболочки и структуре потока в верхнем бьефе с известными данными по мембранно-вантовым плотинам установлено, что нагрузка на водоподпорную оболочку и понурную часть соответствует условиям работы мембранно-вантовой плотины с водовыпускным устройством, таким образом при расчёте параметров понура можно использовать существующие зависимости.

Во второй серии исследовалась конструкция с конфузором, обоснованная в результате численного моделирования и выполненная из композитного материала *UNISOL 650*. Сравнение экспериментальных данных формы конфузора с результатами численного моделирования подтвердило целесообразность установки жёсткой вставки.

В результате аппроксимации координат, описывающих форму конфузора, получена следующая эмпирическая зависимость, описывающая верхнее и нижнее очертания конфузора без жёсткой вставки и состоящей из двух частей:

$$y_k = k_1 x_k^4 + k_2 x_k^3 + k_3 x_k^2 + k_4 x_k + k_5, \quad (12)$$

где x_k, y_k – координаты точек оболочки; k_1, k_2, k_3, k_4, k_5 – эмпирические коэффициенты в уравнении.

Коэффициенты в уравнении (12), а также максимальные деформации конфузора Δ_{\max} от при различных режимах работы МПСН приведены в таблице 1. Таблица 1 – Эмпирические коэффициенты для расчёта формы конфузора

Тип конструкции	$Q, \text{ м}^3/\text{с}$	очертание	Эмпирические коэффициенты					R^2	Δ_{\max} эксп. мм.	Δ_{\max} расч. мм.
			$k_1, 1/\text{м}^3 \cdot 10^{-9}$	$k_2, 1/\text{м}^2 \cdot 10^{-6}$	$k_3, 1/\text{м}$	k_4	$k_5, \text{м}$			
конфузор без жёсткой вставки	0,07	верхнее	3	-6	0,0047	-2,084	716,9	0,998	31	29
		нижнее	0,2	-0,5	0,0001	0,272	2,984	0,999	35	34
	0,06	верхнее	2	-5	0,004	-1,898	719,6	0,999	30	28
		нижнее	2	-2	0,0008	0,149	3,058	0,989	34	34
	0,05	верхнее	2	-4	0,0036	-1,804	724,9	0,999	23	22
		нижнее	0,2	-0,5	0,0002	0,194	0,521	0,999	27	25
конфузор с жёсткой вставкой	0,07	верхнее	2	-6	0,005	-2,210	719,3	0,998	19	18
		нижнее	-0,1	0,5	-0,0007	0,47	1,889	0,997	23	20
	0,06	верхнее	2	-4	0,004	-1,953	721,2	0,999	17	16
		нижнее	0,2	-0,2	-0,0002	0,339	-0,304	0,999	20	19
	0,05	верхнее	2	-4	0,0035	-1,797	724,9	0,999	15	14
		нижнее	0,2	-0,4	0,0002	0,201	0,397	0,999	18	17

R^2 – достоверность аппроксимации.

Сравнение экспериментальных данных максимального отклонения конфузора от его исходного положения Δ_{\max} и данных, полученных в ходе численного моделирования с помощью программы *APM WinMachine*, показало незначительные расхождения: погрешность результатов не превышает 7%.

Отмечено, что при работе сооружения с конфузуром без жёсткой вставки наблюдаются его деформации, приводящие к существенным потерям напора.

На основании полученных результатов экспериментальных исследований определены условия сопряжения бьефов, построены зависимости отношения глубины в верхнем бьефе к периметру оболочки от отношения глубины в нижнем бьефе к периметру оболочки при различных отношениях критической глубины h_k к периметру водоподпорной оболочки L (рис. 8).

Определено, что при $H_{\text{вб}} > -22,6 \cdot \frac{H_{\text{нб}}^2}{L} + 9,5 \cdot H_{\text{нб}} - 0,2 \cdot L$ образуется ото-

гнанный гидравлический прыжок, при $H_{\text{вб}} < -22,6 \cdot \frac{H_{\text{нб}}^2}{L} + 9,5 \cdot H_{\text{нб}} - 0,2 \cdot L$

образуется затопленный гидравлический прыжок, который является наиболее безопасным, для оценки условий сопряжения бьефов получены графики $H_{\text{вб}}/L = f(H_{\text{нб}}/L)$ (рис. 8). При режиме работы с образованием затопленного гидравлического прыжка, гасители энергии не предусматриваются. Длина рисбермы L_p , с учётом проведённых экспериментальных исследований, а также опыта проектирования мембранных плотин рекомендуется равной: $L_p \geq 4 \cdot P$.

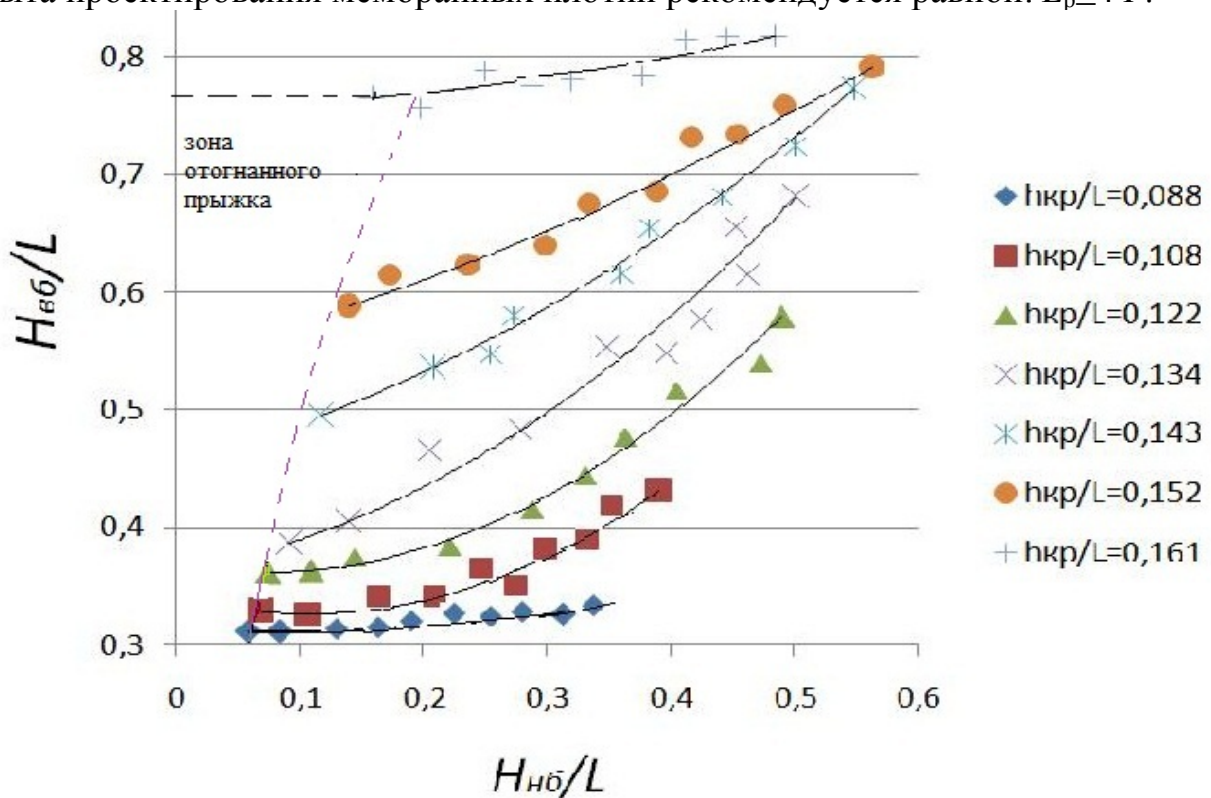


Рис. 8. График зависимости отношения глубины в верхнем бьефе к периметру оболочки от отношения глубины в нижнем бьефе к периметру оболочки при различных критических глубинах

Результаты экспериментальных исследований позволили выполнить сравнительный анализ работы конструкции МПСКН. За счёт применения гиб-

кого конфузора наблюдается увеличение частоты вращения турбины, что свидетельствует о более эффективной утилизации энергии водного потока (рис. 9).

По данным исследований были получены эмпирические зависимости частоты вращения турбины экспериментальной установки с различными условиями подхода потока в верхнем бьефе:

1. Без конфузора:

$$n = -109,66(H_T/B)^2 + 330,37(H_T/B) + 52,58, R^2 = 0,9754, \quad (13)$$

где n – частота вращения турбины, об/мин; B – ширина турбины, м; H_T – напор на турбине, м; R^2 – достоверность аппроксимации;

2. С конфузором:

$$n = -334,78(H_T/B)^3 + 84,29(H_T/B)^2 + 331,36(H_T/B) + 54,61, R^2 = 0,9517; \quad (14)$$

3. С конфузором с жёсткой вставкой:

$$n = -108,94(H_T/B)^2 + 361,73(H_T/B) + 55,33, R^2 = 0,9823. \quad (15)$$

Для определения связи частоты оборотов n (об/мин) от отношения уровней воды верхнего и нижнего бьефов $H_{г.б.}/H_{н.б.}$ и расхода Q (м³/с) были аппроксимированы данные при работе конструкции с конфузором при различных расходах в виде нижеприведённой зависимости:

$$n = (16634 Q^2 - 1116Q + 28,44) \cdot H_{г.б.}/H_{н.б.} - 54340Q^2 + 6335Q - 32,57. \quad (16)$$

Диапазоны применения полученной зависимости следующие:

$$35 \leq n \leq 350; 0,01 \leq Q \leq 0,07 \text{ м}^3/\text{с}.$$

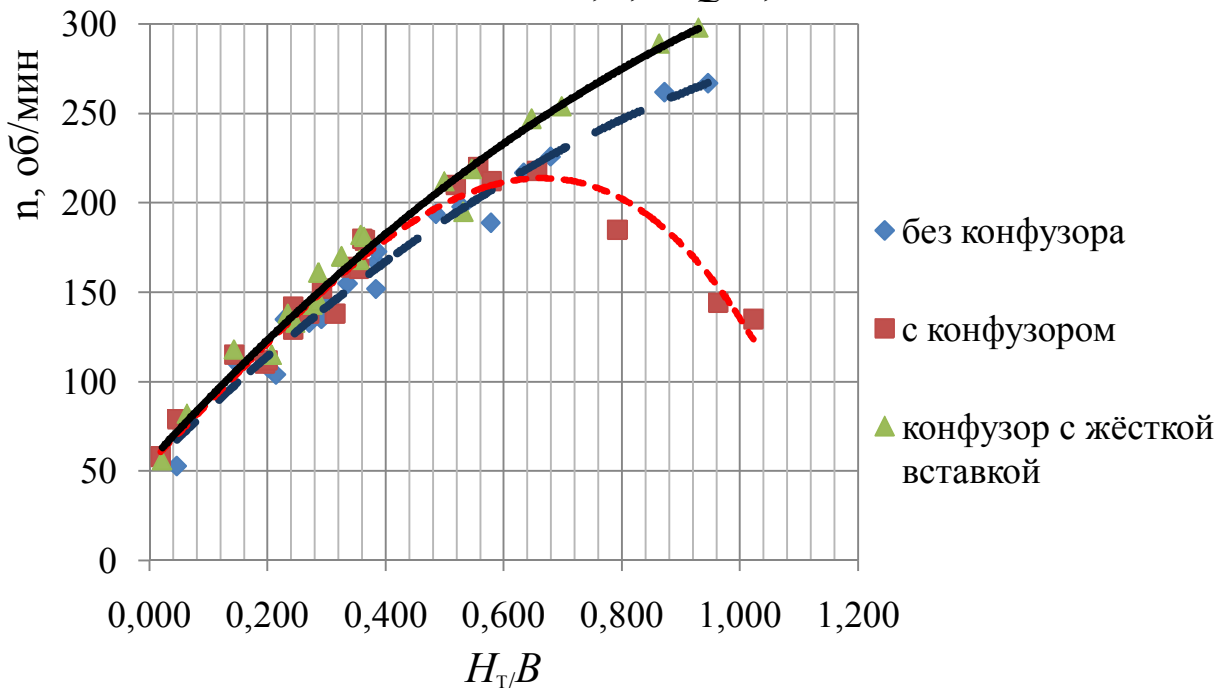


Рис. 9. – Эмпирические зависимости частоты вращения n от отношения напора на турбине H_T к её ширине B

Как видно из графика, при работе сооружения с конфузором без жёсткой вставки при $H_T/B \geq 0,6$ наблюдалось снижение частоты вращения, вызванное деформацией конфузора, что подтвердили данные численного моделирования.

На основании исследований получены эмпирические зависимости, описывающие форму оболочки при различных условиях работы конструкции:

$$y = k_1 x^6 + k_2 x^5 + k_3 x^4 + k_4 x^3 + k_5 x^2 + k_6 x + k_7, \quad (17)$$

где y, x – координаты точек формы оболочки;

$k_1, k_2, k_3, k_4, k_5, k_6, k_7$ – эмпирические коэффициенты в уравнении (табл. 2).

Таблица 2 – Данные для расчёта формы водоподпорной оболочки

Условия работы конструкции	$Q, \text{ м}^3/\text{с}$	Эмпирические коэффициенты							R^2
		$k_1, 1/\text{м}^5$	$k_2, 1/\text{м}$	$k_3, 1/\text{м}^3$	$k_4, 1/\text{м}^2$	$k_5, 1/\text{м}$	k_6	$k_7, \text{м}$	
при отсутствии влияния нижнего бьефа на оболочку*	0,050	-21700,0	85385,0	-17127,0	13564,4	-45,3	-0,3	0,0	0,971
	0,060	-5259,5	4705,5	-1548,8	287,3	-15,9	-0,3	0,0	0,960
	0,070	-4359,5	1805,5	-1780,8	117,3	-14,9	-0,3	0,0	0,980
при влиянии нижнего бьефа на оболочку	0,050	-262,7	-21,2	-21,8	0,5	-1,1	-0,5	0,0	1,000
		0,0	0,0	0,0	0,0	-783,6	472,8	-72,0	0,994
	0,070	-7594,9	6336,7	-1998,1	290,4	-20,1	0,1	0,0	0,998
		0,0	0,0	0,0	0,0	2846,3	1836,2	295,0	0,997

* отмечен случай, когда оболочка рассчитывается с применением двух зависимостей (в первой строке даны коэффициенты для расчёта формы верхней, а во второй – для нижней части)

В пятой главе приводится методика расчёта, проектирования и эксплуатации сооружения. Составлен алгоритм для выбора схемы гидроэнергетического сооружения и определения его основных конструктивных параметров. Для обеспечения мобильности конструкции и простоты установки, при потенциальной мощности водотока более 50 кВт и ширине более 10 метров необходимо принимать схему многосекционного МПСН.

Для предварительного определения высоты водоподпорного сооружения и других его параметров рекомендуется пользоваться разработанной автором номограммой (рис. 10). Исходными данными, в зависимости от задач проектирования, могут служить уровень нижнего бьефа, уровень верхнего бьефа, периметр оболочки.

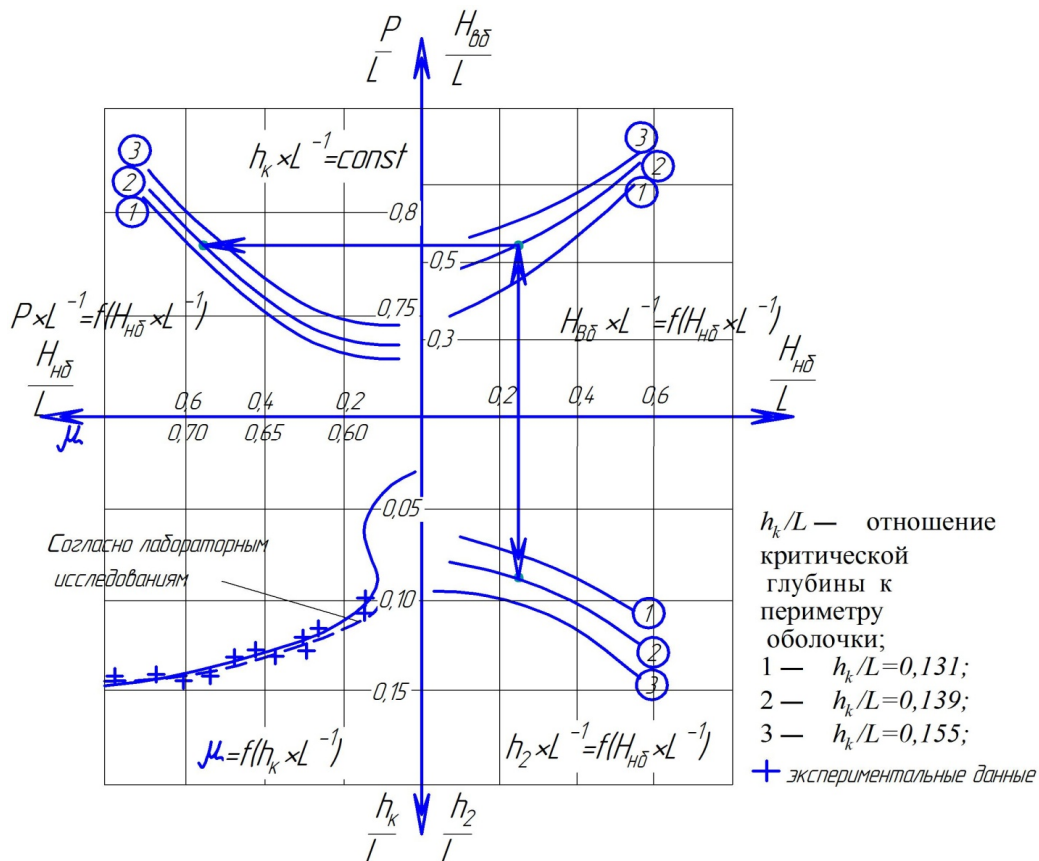


Рис. 10. Номограмма для построения эксплуатационных характеристик МПСН: P – высота оболочки, м; h_2 – напор на водоподпорной оболочке, м; μ – коэффициент расхода

В главе приведены результаты ведомственных испытаний предложенной конструкции гидроэнергетического сооружения, установленного на Ольгинском полигоне Ростовской области (рис. 11).

В качестве гидроагрегата использовался мотор-редуктор 1МПз2-50. Сравнение данных, полученных в ходе натурных исследований, с экспериментальными и результатами численного моделирования, показало погрешность в пределах 7-10%.



а) в сложенном виде;

б) вид со стороны нижнего бьефа

Рис. 11. Натурные испытания МПСКН

При расчёте экономических показателей базовым вариантом принималась конструкция микроГЭС фирмы «ИНСЕТ», напор обеспечивался грунтовой плотинкой, при этом годовой экономический эффект от внедрения нового гидроэнергетического сооружения составил 60 тыс. руб.

Основные выводы и результаты работы

1. В результате проведённого анализа существующих конструкций малых и микроГЭС, низконапорных сооружений для малых водотоков, а также их теоретических и экспериментальных исследований определены требования к разрабатываемой конструкции: установка в водотоки с глубиной, не превышающей 1,5 метра в меженный период и средним многолетним расходом менее $5 \text{ м}^3/\text{с}$; мобильность; малое воздействие на экосистему; обеспечение свободного пропуска паводков и половодий; аккумуляирование стока в меженный период для надёжного водо- и энергоснабжения потребителей малой энергоёмкости.

2. В соответствии с установленными требованиями разработано новое научно обоснованное техническое решение конструкции МПСКН с гибким конфузуром сезонного действия в составе мембранно-вантовой плотины с гидроагрегатом в виде поперечно-струйной турбины Банки для малых водотоков с глубиной до 1,5м и расходом до $2,24 \text{ м}^3/\text{с}$ (согласно законам подобия), защищённое патентом на изобретение (пат. RU 2378451).

3. Выполнено математическое моделирование элементов конструкции МПСКН, в результате которого определены: условия подхода потока в верхнем бьефе; параметры водоподпорной оболочки; параметры гибкого конфузора, область его деформации, что позволило обосновать предварительные параметры жёсткой вставки, равной $1/3$ его длины, и условия работы гидроагрегата.

4. На основании проведённых экспериментальных и натурных исследований и сравнения их с данными, полученными в ходе численного моделирования, уточнены параметры элементов конструкции, определены расчётные зависимости, разработана методика расчёта параметров предложенной конструкции

МПСКН для напоров до 3,5 м и расхода до 2,24 м³/с, разработана схема много-секционной МПСКН для больших расходов и пролётов более 10 метров.

5. В результате выполненных комплексных исследований, а также анализа условий размещения и установки сооружения разработано руководство по проектированию, строительству и эксплуатации МПСКН утверждённое в «Южном специализированном научном Центре по проектированию объектов мелиорации и водного хозяйства».

6. Внедрение и ведомственные испытания МПСКН мощностью 2 кВт выполнено на Ольгинском полигоне Аксайского района Ростовской области. Сравнение ведомственных и экспериментальных данных показало достаточную сходимость с результатами численного моделирования в пределах 7...10%, экономический эффект составил 60 тыс. руб. на одно сооружение в сравнении с конструкцией ГЭС фирмы «ИНСЕТ».

Список работ, опубликованных по теме диссертации:

1. Кашарин Д. В. Исследование условий работы мобильных гидроэлектростанций и создание алгоритма расчёта их оптимальных параметров / Кашарин Д. В., **Годин П. А.** // Вестн. ВолгГАСУ . 2009. Вып. 13. - С. 174 -180. (автор – 50%).

2. Кашарин Д. В. Экспериментальные исследования мобильных гидроэнергетических сооружений для малых водотоков / Кашарин Д. В., **Годин П. А.** // Гидротехн. стр-во. – 2009. – № 6. – С. 36-42. (автор – 50%).

3. Мобильное гидроэнергетическое сооружение многоразового использования пат. RU 2378451 Рос. Федерация: МПК E02B7/02, E02B9/00 / Д. В. Кашарин, **П. А. Годин**; заявитель и патентообладатель Д. В. Кашарин – №2007132596; заявл. 8.05.2008; опубл. 10.01.2010, Бюл. № 3. – 2 с.: ил. (автор – 50%).

4. Кашарин Д. В. Повышение надежности водо- и энергоснабжения удаленных объектов за счет применения мобильных подпорных сооружений комплексного назначения / Кашарин Д. В., **Годин П. А.**, Годин М. А., Кореновский М. А.// Научный журнал Российского НИИ проблем мелиорации. - 2012. - № 2. - С. 95-105. (автор – 50%)

5. **Годин П. А.** Использование современных методов математического моделирования и технология возведения мобильного подпорно-регулирующего гидроэнергетического сооружения / **Годин П. А.**, Годин М. А., Кашарин Д. В. // Информационные технологии в обследовании эксплуатируемых зданий и сооружений: материалы IX Междунар. науч. практ. конф., г. Новочеркасск, 11 сентября 2009 г. /Юж.-Рос. гос. техн. ун-т (НПИ). -Новочеркасск: ЮРГТУ, 2009. – С. 58–63. (автор – 30%).

6. **Годин П. А.** Децентрализованное энергоснабжение объектов малой энергоёмкости на основе гибридной энергоустановки с системой аккумулирования энергии / **Годин П. А.**, Годин М. А. // Вестн. ВолгГАСУ . 2013. Вып. 30 (49). – С. 69–76 (автор – 75%).

Подписано в печать 23.04.2013г. Формат 60х84^{1/16}

Объём 1,0 уч. изд. листов. Тираж 100 экз. Заказ № ____

Типография НГМА, 346428, г. Новочеркасск, ул. Пушкинская, 111