Global Journal of Researches in Engineering: E
Civil and Structural Engineering
Volume 24 Issue 1 Version 1.0 Year 2024
Type: Double Blind Peer Reviewed International Research Journal
Publisher: Global Journals
Online ISSN: 2249-4596 & Print ISSN: 0975-5861

Hydraulic Engineering in Dam-Type Tidal Power Plant Designs

By Alexander Yerkhov
Russian State Geological Exploration University

Abstract- During the years of Soviet power, several tidal power plants were procured on the territory of the RSFSR, but only one was built - experimental, despite several promising projects - interest in TPP fell. Economic and demographic trends suggest an impending shortage of energy resources in the world, and now in the foreign press they are increasingly discussing the results of the work of existing TPP, studying the options for the layout of stations, the advantages and disadvantages of various types of hydraulic turbines; the development of the theory of tidal power plants is a problem of energy, construction science (and construction sciences), as well as engineering: hydrology, geology, geodesy, geotechnics, ecology, hydraulics, etc., at each stage of the life cycle of significant in different ways - before the commissioning of the structure in the priority of engineering and construction sciences, and the emphasis in this work is on the main aspect of the life cycle of the design stage, while the scientific novelty is to designate the engineering hydraulics of TPP as a complex problem of system analysis.

Keywords: tide, pool, dam, hydraulic turbine, impeller, blade, power, energy, pressure, operation.

GJRE-E Classification: JEL Code: Q25

HYDRAULICENGINEERINGINDAMTYPETIDALPOWERPLANTDESIGNS

Strictly as per the compliance and regulations of:

Hydraulic Engineering in Dam-Type Tidal Power Plant Designs

ИНЖЕНЕРНАЯ ГИДРАВЛИКА В ПРОЕКТАХ ПРИЛИВНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ ПЛОТИННОГО ТИПА

Alexander Yerkhov

Abstract- During the years of Soviet power, several tidal power plants were procured on the territory of the RSFSR, but only one was built - experimental, despite several promising projects - interest in TPP fell. Economic and demographic trends suggest an impending shortage of energy resources in the world, and now in the foreign press they are increasingly discussing the results of the work of existing TPP, studying the options for the layout of stations, the advantages and disadvantages of various types of hydraulic turbines; the development of the theory of tidal power plants is a problem of energy, construction science (and construction sciences), as well as engineering: hydrology, geology, geodesy, geotechnics, ecology, hydraulics, etc., at each stage of the life cycle of significant in different ways - before the commissioning of the structure in the priority of engineering and construction sciences, and the emphasis in this work is on the main aspect of the life cycle of the design stage, while the scientific novelty is to designate the engineering hydraulics of TPP as a complex problem of system analysis.

Keywords: tide, pool, dam, hydraulic turbine, impeller, blade, power, energy, pressure, operation.

Аннотация- **В годы советской власти на территории РСФСР было запроектировано несколько приливных электростанций, но построена только одна – опытная, несмотря на несколько перспективных проектов, – интерес к ПЭС упал. Экономико-демографические тенденции наводят на мысль о предстоящем дефиците энергоресурсов в мире, и уже сейчас в зарубежной печати всё больше обсуждают результаты работы действующих ПЭС, изучают варианты компоновок станций, достоинства и недостатки разных типов гидротурбин; развитие теории приливных электростанций – проблема энергетики, строительной науки (и строительных наук), а также инженерных: гидрологии, геологии, геодезии, геотехники, экологии, гидравлики и т.д., на каждом этапе жизненного цикла значимых по-разному, – до ввода сооружения в эксплуатацию в приоритете инженерные и строительные науки, и акцент в данной работе делается на основном аспекте жизненного цикла этапа проектирования, научная же новизна – обозначить инженерную гидравлику ПЭС как комплексную проблему системного анализа.**

Ключевые слова: прилив, бассейн, плотина, гидротурбина, рабочее колесо, лопасть, мощность, энергия, напор, эксплуатация.

Author: Candidate of Technical Sciences, Russian State Geological Exploration University. e-mail: a-erhov@yandex.ru

I. Введение

Ограничение ресурсов по ископаемому топливу и глобальное потепление, вызванное эмиссией парниковых газов [1], заставляют бедные ресурсами и социально ответственные страны обращаться к альтернативным природным энергетическим источникам: солнечной радиации, ветровым потокам, морским волнам, однако сила их действия носит вероятностный характер, поскольку определяется погодными условиями, – морской прилив предсказуем относительно – наступает периодически два раза в сутки в большинстве регионов и один – в некоторых, при этом суммарная энергия приливов составляет 3 ТВт[2] при КПД преобразования 35 %, что способно удовлетворить часть мирового спроса на электричество, однако, хотя глобальный приливной потенциал значителен, лишь в нескольких районах задействован [1]. Морская энергия заключена не только в приливах в виде потенциальной энергии разных уровней воды, но и в поверхностных волнах ветрового воздействия, а также включает термальную энергию температурных полей различных глубинных зон, – отраслевое значение имеют приливы. Энергию приливам даёт асимметрия гравитационных возмущений и океанические течения: 1) согласно модели Ньютона-Лапласа, лунная гравитация из-за значительного диаметра Земли не одинакова в ближних и дальних точках и неравномерно воздействует на её поверхность, и такое притяжение образует перемещающиеся за движущейся Луной (и Солнцем) горбы и спады поверхности водных масс, которые у материковых берегов создают приливы и отливы; 2) по динамической модели вращение планеты создаёт в океанах обратно-встречные течения из-за возникающего в результате действия силы Кориолиса инерционного движения водных масс, образуя водоворотные зоны

[1] Увеличение выработки электроэнергии в мире более чем в два раза за последние 30 лет с преобладанием доли горючих ископаемых связано исключительно со странами Азии, где наиболее ощутим и ожидаемо прогнозируем рост численность населения; за тот же период концентрация диоксида углерода в атмосфере воздухавозросла на 25%.

[2] Европа: 12 ГВт – от Норвежского и Северного до Средиземного и Эгейского морей, Китай: 13,9 – от Жёлтого до Восточно- и Южно-Китайского морей, Индия: 8 – от Аравийского моря до Бенгальского залива, РФ: 90 – Баренцево и 20 – Белое моря и т.д.

размером, определяемым орографией – береговым и донным рельефом, и поскольку морские берега России воспринимают приливную волну в двух точках – географических регионах: на побережье Баренцева и Белого морей, куда волна доходит от вихря северной части Атлантики, и на протяжённой береговой линии от Берингова до Охотского морей – от двух совместно действующих вихрей Тихого океана, есть только два экономических района РФ – Северный и Дальневосточный, где проектирование ПЭС целесообразно (при условии, что здесь сохранится дефицит электроэнергии при вы соком экономическом

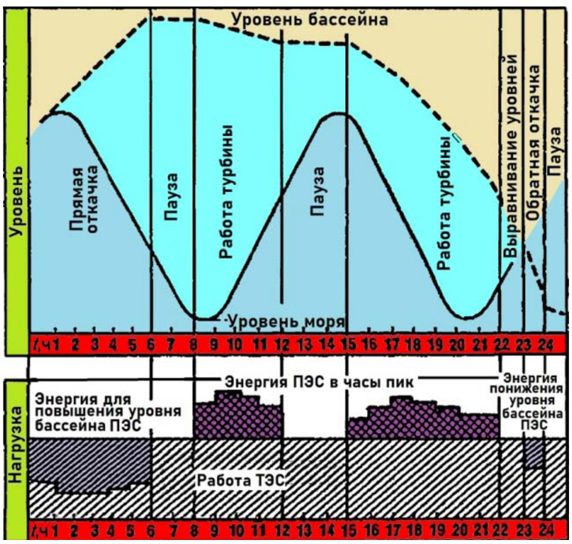


Рис. 1: Энергетические диаграммы ПЭС

уровне, и они будут работать в составе единой энергосистемы (рис. 1)). При приливно-отливном движении воды образуется солитон с амплитудой прилива до 6 м на Севере и 13 на Дальнем Востоке, что соответствует низконапорным ГЭС, однако, поскольку сейчас в приоритете атомные проекты, даже низкая себестоимость производства энергии и безопасность для окружающей среды, в сравнении с углеродной энергетикой, не стали аргументом для разработки новых проектов строительства приливных станций. И, казалось бы, в таком контексте, актуальность темы должна определяться выявлением преимуществ сравнения с АЭС (плавучего или иного типа), но важно заглянуть и в будущее, поскольку ископаемое топливо небезгранично, и кризис природных ресурсов станет отправной точкой возврата интереса к ПЭС; мировой нефтяной кризис 1970-х гг. открыл эпоху приливной энергетики, но только сейчас гидротурбины с горизонтальной осью диаметром 5-8 м стали настолько совершенны, что наряду с ветроэнергетическими появились в многочисленных зарубежных проектах ПЭС – ни что так не способствует научному обоснованию, как коммерциализация ВИЭ.

Главными достоинствами ПЭС являются низкая стоимость обслуживания – <0,5%, высокая эксплуатационная готовность – >95%; основные недостатки: очень высокая стоимость установленной мощности – в десять-сто раз выше других источников, долгий срок строительства – 5-15 лет, низкий коэффициент нагрузки – 22-35% [2], – проблемы инженерно-технического и проектно-технологического характера рассматриваются ниже.

II. Материалы и Методы

Приливная энергия используется по всему миру, но неравномерно: в Австралии, Великобритании, Канаде, Китае, США, Франции. В РФ проекты экспериментальных ПЭС рассматривали с 1930-х гг., причём Кислогубская опытная малая мощностью 1,7 МВт была построена (в 1968 г. первоначальной мощностью 0,4 МВт); другие проекты не были реализованы [3]: Северная в Баренцевом море, Лумбовская и Мезенская в Белом, Пенжинская и Тугурская в Охотском (таблица 1), – на исходе СССР в 1990 г. автор данной статьи в составе солнечногорской изыскательской экспедиции Гидропроекта проводил сейсморазведочные работы по исследованию скального основания под плотину проектируемой ПЭС Северная и геофизические исследования на Шантарских островах под проект Тугурской станции, но случившиеся за этим в стране социально-экономические неурядицы прервали ход работ[3]; для реализации проектов, помимо главных экономических, должны быть решены частные инженерные задачи.

Таблица 1: Проекты ПЭС РСФСР

Станция	Прилив ср. (м)	Площадьбассейна (км^2)	Установленна ямощность (МВт)	Годовойобъем электроэнергии (ТВтч/г)	Годовой Коэффициент загрузки(%)
Северная	4,2	5,6	12	0,024	24
Лумбовская	4,2	70	320	0,7	24
Тугурская	4,7	1800	8000	27,6	24
Мезенская*	10	2640	11400	39	34
Пенжинская**	11 и 13,4	20530	108500	250	25

**В том же заливе проектировались Кулойская и Беломорская станции.*

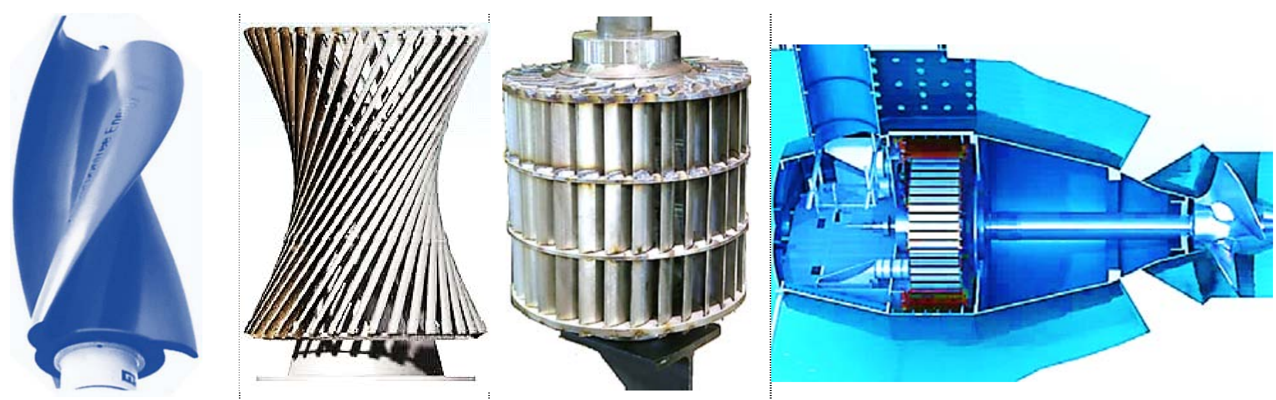
***Суммарно два бассейна.*

[3] И сохранились ли отчёты о результатах изысканий доподлинно не известно: государственные проектные институты распадались или перепрофилировались, их имущество по большей части ликвидировалось.

Проблема 1 – устойчивость плотины

Безотказность конструкции плотины при постоянных и временных нагрузках определяется силами сопротивления материалов и конструкций, не допускающими предельных состояний: 1) разрушения, потерю устойчивости формы, 2) предельных деформаций, колебаний, трещин и их раскрытия в конструкциях. Расчёт напряжённо-деформированного состояния (НДС) тела плотины при воздействии на неё внешних нагрузок, а также температурных волн и солнечной радиации, химических веществ и соединений в виде действия реакций, определяемых составом внешней среды и изменением свойств частиц конструкций при старении материалов, биологических процессов в виде биодеградации из-за действия грибов, водорослей, микроорганизмов, определяется совокупностью напряжений и деформаций, целиком характеризующих напряжённое состояние частиц тела плотины, – эту совокупность записывают в виде тензоров напряжений и деформаций конкретной конструкции и решают с применением средств вычислительной техники. Инженерная гидравлика напрямую не связана с методами компьютерного 3-D моделирования НДС численными методами, но ассоциируется с гидростатическими задачами ГТС, при этом в составе расчёта могут использовать отдельные решения: на сдвиг, напряжений по горизонтальному сечению и т.д.; методику гидростатических расчётов можно применять и для других элементов ГТС ПЭС: подпорных стенок, устоев... Наиболее актуальны и имеют принципиальное значение расчёты по определению устойчивости плотины на сдвиг и напряжения в основании. Исходные данные в расчёте: высота плотины $H_{пл}$ [м], глубина H, плотность бетона γ [кг/м^3], предел прочности грунта основания [Мпа], коэффициент трения бетона о грунт f, удельное сцепление грунта c [кПа], заложение откосов m, класс сооружения [КС]; искомая характеристика – ширина плотины B [м]. Расчёт сил и их плеч ведут относительно середины основания на основе действия группы сил: *вертикальных*: *а*) собственный вес плотины, определяемый по площадям плоских геометрических фигур, получаемым разбивкой её поперечного профиля, умноженным на плотность бетона, *б*) составляющие сил гидростатического давления воды, действующий на подводные грани плотины (с обратной стороны на подошву плотины действует сила фильтрационного противодавления – площадь эпюры, умноженная на объёмную массу воды), и *горизонтальных*: суммарное гидростатическое давление со стороны моря и бассейна (особым вопросом является расчёт флютбета проточной части ПЭС для защиты основания от размыва под действием скоростного напора и предупреждения фильтрационных деформаций, а также наличия и глубины противофильтрационной и дренажной завесы $h_{зав}$). В решении составленного уравнения необходимо учитывать нормативные показатели коэффициентов устойчивости и минимальные значения главных напряжений у верха плотины.

Особенности конструкции плотин ПЭС раскрыты в следующем разделе.

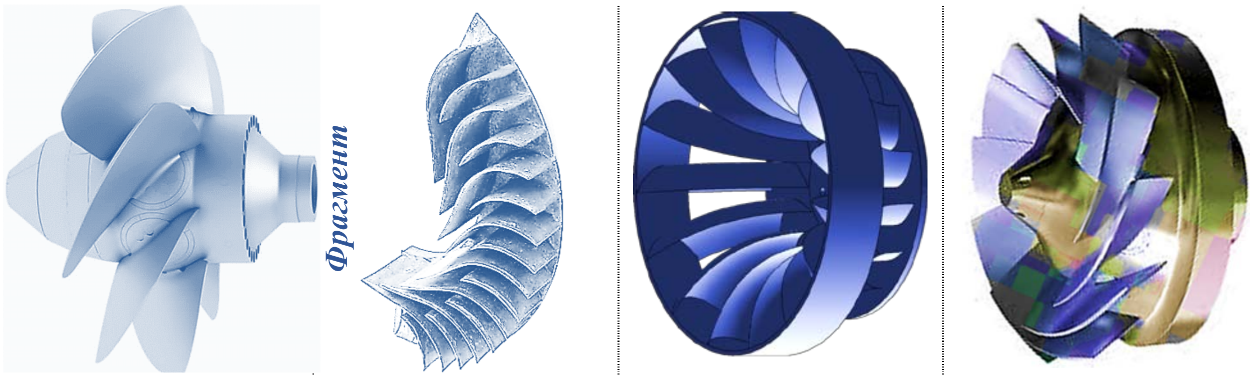


Савониуса(ортогональная)–от1,2м–от15кВт	Горлова (геликоидная) – эффективность 35 %	Банки(ортогональная)– от 2 м–1кВт-15кВт	Колбовая(капсульная, грушеобразная, трубчатая)– от 3 до 10м

Рис. 2: Низконапорные гидротурбины

Проблема 2 – необходимость эффективного управления скоростным напором

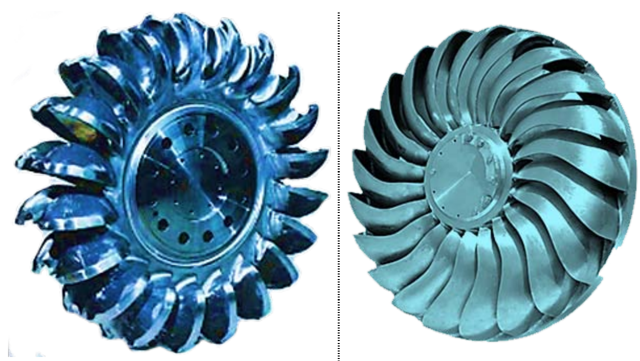
Рабочие скорости приливного течения – 2-3 м/с (дают 4-13 кВт/м^2), бо́льшие (>3,0) оказывают чрезмерную нагрузку на оборудование – на рабочее колесо, меньший напор – экономически неэффективен, – напор определяет тип роторной турбины с характерным рисунком гидродинамического профиля лопатки; применение средне и высоконапорных требует конструкторских доработок, экономических обоснований. Таким образом, первую проблему можно интерпретировать как создание эффективных, надёжных приливных агрегатов и их совершенствование: 1) турбина Савониуса (рис. 2) с рабочим колесом обычно 2-4 лопасти отличается от колбовой ротором двигателя на внешнем контуре рабочего колеса и статором в центре, что имеет преимущества при переменном напоре, дешевле и проще в монтаже и обслуживании[4], – теоретически имеет бо́льшую инерцию , и, значит, более устойчива, но может работать только в отлив, и не может применяться для накачки[5]; 2) в турбине Банки вода ударяет в лопасти, поступая поперечно оси, поворачивает относительно её и выходит, то есть лопасть воспринимает воздействие дважды, – эффективность невысока, подходят для небольших станций до 300 кВт, и имеют проблемы с вибрацией; 3) колбовую турбину, названную из-за формы гидроагрегата, на ПЭС применяют чаще из-за высокого КПД при низком напоре (до 90%), малого размера, низкой стоимости и реверсивности, позволяющей вырабатывать энергию как в прилив,



Каплана(радиально-аксиальная)– от 3 м–600кВт-2МВт | Томсона(радиально-аксиальная)– от 6 м–15кВт-4МВт | Фре(э)нсиса(радиально-аксиальная)–от7м–250кВт-2,5МВт | Дериаз(ис)а(диагональная)– от 4 м–до215МВт

Рис. 3: Среднескоростные типы рабочих колёс

так и в отлив, они отличаются надёжностью и высокими рабочими характеристиками, имеют низкие эксплуатационные затраты, – технология колбовых турбин хорошо отработана; 4) турбины средней скорости вращения[6] (рис. 3) можно адаптировать под различные гидравлические характеристики, однако они малопроизводительны в режиме насоса, потому что относительно короткие лопасти, расположенные под большим углом, создают нестабильное течение и приводят к чрезмерному замедлению потока (что видно по несовпадению рабочих точек режимов турбина/насос), однако конструкция турбины Дериаза, как разновидность Каплана с лопастями не перпендикулярно направленными к оси, а под углом, направляет поток диагонально – по образующей к вершине конуса, и несоответствие между прокачкой и генерацией решает, поскольку не возникают пульсации давления и кавитация [4]; турбина/насос Дериаза способна работать также при переменных скоростях вращения, что позволяет иметь в 1,5 раза бо́льшую входную мощность, чем у турбин Френсиса; пропеллерная турбина Каплана с возможностью поворота лопасти относительно своей оси ранее (в СССР) называли по конструкции «поворотно-лопастной»; 5) высоконапорные (рис. 4) отличаются высокой скоростью при низком расходе: если удельная скорость выходит за критический диапазон, вращение замедляется и мощность падает [5].



Пел(ь)тона (ковшовая) – от 40 м – 30 кВт-4 МВт; | Тюрго – от 35 м – 30 кВт-2 МВт.

Рис. 4: Типы высоконапорныхгидротурбин

[4] Первоначально Кислогубская ПЭС работала на колбовой турбине мощностью 400 кВт, но в 2006 г. была модернизирована до экспериментальной ортогональной Савониуса 1,7 МВт (два агрегата), причём эффективность турбины Савониуса признаётся ниже колбовой.

[5] Самая большая диаметром 8,2 м и мощностью 17,8 МВт при КПД 89% работает на канадской ПЭС Аннаполис (зал. Фанди).

[6] Скорость вращения зависит от удельной скорости гидротурбины, частоты и числа пар полюсов генератора, при этом удельная скорость должна обеспечивать такую же скорость генератора.

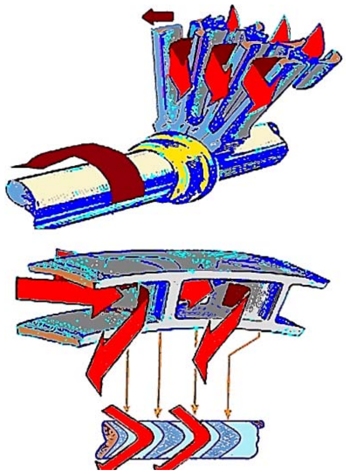


Рис. 5: Реактивный и импульсный потоки

Проблема 3 – необходимость выверенной ориентации рабочего колеса турбины в водоводе

Общее наблюдение – вертикальная ориентация вала гидротурбины большого диаметра лучше подходит для реактивных – Каплана, Дериаза, горизонтальное – импульсных – Пелтона (рис. 5); впрочем, изменение формы лопасти по длине – от центра к переферии – способно обеспечивать в одном колесе оба режима, что для требующих повышенных технических характеристик турбин, работающих в составе современного технологичного оборудования необходимо. *а*) Турбины с горизонтальной осью ориентированы валом ротора параллельно потоку, и поскольку, коэффициент их мощности достигает 40%, на большинстве ПЭС установлены именно они, что не означает отсутствия недостатков: стоимость турбины и конструкции выше, ортогональных, генерация энергии возможна только в одном направлении, что требует двух турбинных групп – на прилив и отлив. *б*) Турбины ортогональные с поперечно ориентированной осью: Банки-Митчелла или Особергера – при простоте конструкции, сказывающейся на стоимости, имеют высокий КПД – 80%, надёжны и просты в эксплуатации; КПД важнейший показатель турбины, в том числе, по признаку ориентации, – турбины с вертикальной осью и, например, пассивным переменным углом наклона лопасти для лучшего угла атаки (турбина Кобольда – рис. 6 – может иметь номинальную мощность >150 кВт), удерживающим аэродинамический профиль в положении наибольшей подъёмной силы, обеспечивая максимальную касательную силу для наибольшей мощности, – переменный угол добавляет 3% мощности.

Проблема 4 – неравномерность выработки электроэнергии из-за нерегулярности потока, вызванной длительными паузами прилив/отлив.

Оптимизации путём равномерного распределения выходной мощности (рис. 1) с повышением коэффициента нагрузки турбин выше 60% некоторым образом могут способствовать многоячеистые бассейны, более гибко реагирующие на изменение напора – отбор мощности должен осуществляться от отдельных турбин или их групп, и, таким образом, турбины нижних и верхних бассейнов работают синхронно-циклично по напору – море-бассейн$_1$-бассейн$_2$-море, как одна электростанция; и также станция может дооснащаться гидроаккумуляторами.

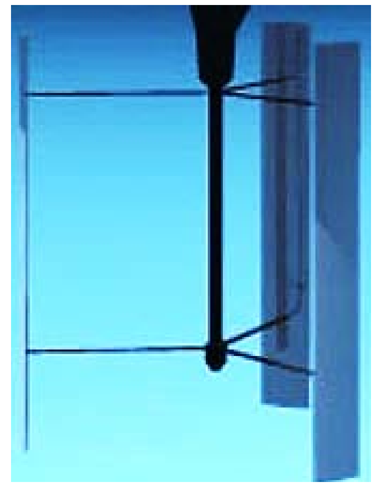


Рис. 6: Турбина Кобольда

Проблема 5 – недостаточная эффективность преобразования энергии.

Связана со второй проблемой, и решается усложнением конструкции гидротурбин – важно для оптимизации работы станции. Эффективность ПЭС определяется технико-экономическими показателями, то есть минимальными затратами на производство электроэнергии, тогда как КПД турбин – эффективностью в отношении преобразования энергии – зависит от условий работы турбин, и максимальна, если турбина работает с расчётной нагрузкой (рис. 7), – при неполной или перегрузке КПД падает, и рекомендуют турбины Дериаза или Каплана.

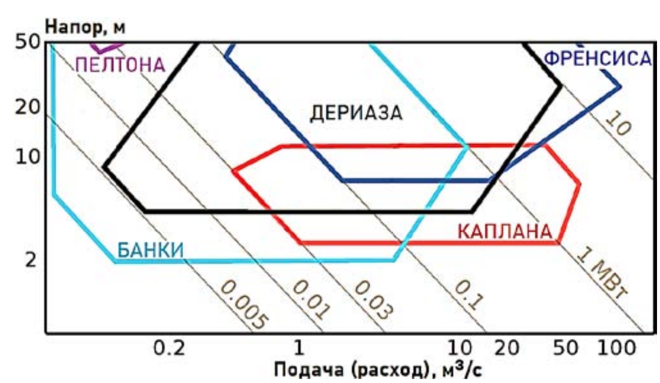


Рис. 7: Сравнение некоторых типов турбин. Эффективность

Проблема 6 – тяжёлые условия эксплуатации гидротурбин по ряду показателей, например, наличию шуги, активно идущих биологических/химических процессов.

Требует изменения свойств материалов или характера процессов путём особых технологических мероприятий – для повышения надёжности оборудования. Большинство ПЭС имеют напорные плотины для накопления и эффективной выработки энергии турбинами, работающими в одну или обе стороны, – их конструкция должна обеспечивать КПД турбин 80-90% и бесперебойную работу в течение десятилетий, для чего поверхности конструктивных элементов, соприкасающиеся с внешней средой, покрываются защитными лаками от биообрастаний, подключаются к системе катодной защиты от коррозии и т.д. [6].

Проблема 7 – изменение экологического равновесия.

Плотина ПЭС, перекрывая вход в естественную бухту/залив/фьорд/губу/лиман/эстуарий и даже лагуну, но не пролив, образует бассейн, отделённый от моря, и имеющий различный с ним гидрологический режим (рис. 1), нарушая сложившуюся экосистему и в определённых случаях вызывая социальные проблемы, поскольку ограничивается доступ к лежбищам и ареалам обитания держащихся у берега морских животных – млекопитающих, моллюсков и др., изолируются места нереста и пути миграции ихтиофауны, а также сужаются возможности судоходства, – и тем не менее, последствия преодолимы, что должно отражаться в проектах, при этом учитывать надо то, что воздействия на дикую природу могут быть прямыми и косвенными.

Проблема 8 – влияние на прибрежно-морской наносный режим и переформирование дна за счёт отложений твёрдого стока рек.

Седиментация уменьшает приливную зону (площадь и объём) бассейна; в зависимости от источника аккумуляция донных отложений и эрозия способны оказать негативное воздействие как на работу сооружений ПЭС, так и на окружающую среду.

Эти проблемы с разной степенью важности определяются потоками отно сительно плотины и в рабочей зоне гидротурбин, – в проектах ПЭС гидравлика сооружений (плотины (потенциальная энергия прилива/отлива), турбинного водовода (кинетическая энергия скоростного напора), а также механических машин (механическая работа гидротурбин)) с вопросами электроэнергетики взаимосвязана: плотина – главное сооружение ПЭС с решающей долей инвестиционных затрат – имеет в теле на турбинном водоводе работающую на перепаде давлений горизонтально или вертикально ориентированную турбину, соединённую посредством вала с коротким и большим в диаметре электрогенератором (рис. 8 [7]), индуцирующим ЭДС, и имеющим, ввиду низкой частоты вращения, несколько пар полюсов, соединённых через трансформатор с сетью. И, следовательно, концепция с анализом и техническое обслуживание с эксплуатацией в жизненном цикле станции имеют приоритетное научно-теоретическое и утилитарно-прикладное значение.

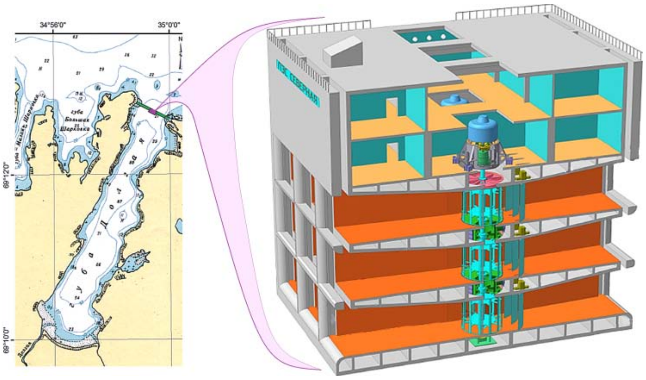


Рис. 8: Многоярусный ортогональный гидроагрегат диаметром рабочих колёс 5 м на примере проекта ПЭС Северная

Для каждого сооружения ПЭС важны, но рутинны конкретные технические параметры: размеры, тип грунта, используемый строительный материал, особенности конструкции, – они общедоступны и не обсуждаются.

III. Результаты

a) Решение проблемы 1 – расчёт конструкции плотины

В зарубежной литературе плотину ПЭС чаще называю «заграждением», вкладывая в это понятие значение несущественности сил давления воды со стороны «бьефов» – гидростатический напор воды настолько мал и одинаков в противофазе с обеих сторон, что в максимуме Δh составляет считанные метры, поэтому от речных плотин их отличает кубоидная форма (рис. 9), а по конструктивному исполнению – это ячеистые плотины с плоскими перекрытиями, в гидротехнике обычно называемые «облегчёнными»; по материалу – бетонные/ железобетонные сооружения.

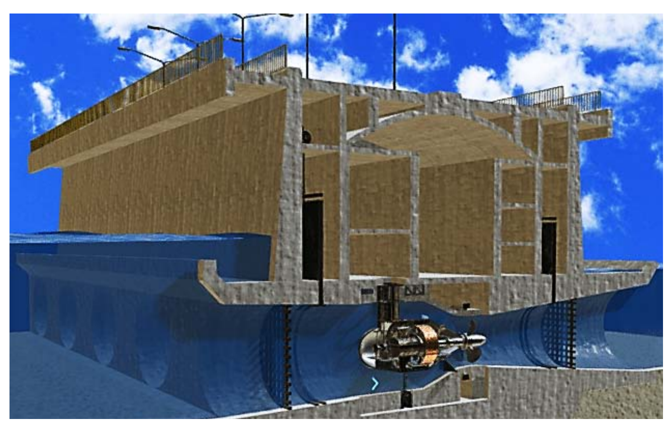


Рис. 9: 3-Dмодель saVRee обычного заграждения ПЭС с в ряд расположенными турбинами

Ячеистые низконапорные плотины стали разрабатывать в СССР с середины 30-х годов; размеры ячеек – 1,5×1,5-6×6 м, толщина стенок – 0,1...0,6 м, способ монтажа – монолитный или сборно-монолитный железобетон (с расходом арматуры – 20...30 кг на м^3

бетона) с соединением элементов сваркой и бетонированием. Положение и форма ячеек сказывается на напряженном состоянии конструкции плотины, что позволяет корректировать напряжения в теле и основании, методом предварительного напряжения повышать сжимающие напряжения у напорных граней. Верхнюю часть такой плотины рассчитывают, как гравитационную, нижнюю – как массивную раму с жёсткими узлами и заделкой в основании[7].

Помимо экономии бетона, ячеистая плотина имеет ряд других достоинств: удобные цементация швов, сбор и отвод инфильтрационной воды, управление температурным режимом, возможность коммуникации.

b) Решение проблемы 2 – расчёт турбинных агрегатов

1. *Энергетический потенциал прилива в исходных данных расчёта водовода гидротурбин.*

Разница уровней закладывает в приливную волну потенциальную энергию, которая в прилив выше, чем в отлив, поэтому в оценке приливной энергии следует рассматривать два случая: вращение турбины за счёт падающей воды, и поднимающейся. Энергию приливного цикла в работе ПЭС определяет инженерное решение по размещению плотины; приняв амплитуду – напор на плотину – как разницу уровней Δh ($-\Delta h$), а площадь бассейна обозначив как A [м^2], потенциальную энергию прилива выражают в виде E=mgΔh2=AρΔhgΔh2=AρgΔh22 [Дж], и мощность приливной энергии – N=EΔt=12AρgΔh2Δt [Вт], а если предположить полный переход потенциальной энергии в кинетическую, скорость приливного течения из N=12mu2=12ρHlu3 равна u=32NHl, где H – глубина прилива, l – пройденное приливной волной расстояние в пределах ПЭС,Δ t – продолжительность падения или подъёма уровня, то есть половина приливной фазы. Вес поднятой и опущенной приливом воды составляет G=γHA, где γ – удельный вес морской воды, равный 1025 [кг/м^3], и максимальная расчётная мощность ПЭС P=280AH2 [кВт], то есть накопленная энергия пропорциональна квадрату глубины прилива, высоты плотины.

Пример расчёта бассейна Пенжинской ПЭС:

определить теоретическую запасённую энергию и среднюю мощность при средней высоте прилива по северному и южному бассейнам 12,2 м, площади бассейнов 20 530 000 000 м^2 и времени прилива 6 ч, – $E = 0{,}5A\rho gh^2$ = 0,5·20 530 000 000 [м^2]·1025 [кг/м^3]·9,8 [м/с^2]·12,2^2 [м] = 1,53472·10^{16} [Дж], $P = E/t$ = 1,53472·10^{16} [Дж]/6 [ч]/3,6·10^6 [кВт·ч/Дж] ≈ 710 517 [МВт], при том что плотинные гидроагрегаты по проекту должны производить 108 500 МВт.

Турбина с генератором – наиболее чувствительная критически значимая составляющая ПЭС.

2. *Кинетическая энергия турбинного водовода в энергии осевых турбин.*

В водоводе, соединяющем море и бассейн, устанавливают турбину, мощность потока в которой Nп=gQHт [кВт], где Hт=C1ucos1gη – рабочий напор турбины, позволяет турбине развить мощность Nт=Mω, где M=ρQC1cos1R1-C2cos2R2 – момент количества движения и ω – угловая скорость рабочего колеса, C_1, C_2 – абсолютные скорости на входе и выходе [м/с], u – окружная скорость на внутренней окружности рабочего колеса, R_1, R_2 – размеры окружностей рабочего колеса (рис. 10), α_1, α_2 – углы между касательными и кривой лопасти к наружной окружности на входе и выходе [°], η=NтNп – гидравлический КПД, – и при низком напоре турбины с пропеллерными лопастями, как, например, Каплана, не могут обеспечить высокую мощность, Q – расход через гидротехническое сооружение: Q = C_dA2gHт , где C_d – коэффициент расхода, A – площадь проходного сечения через сооружение.

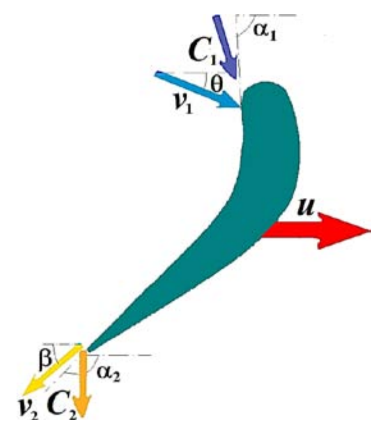


Рис. 10: Схема к расчёту скорости лопатки

3. *Гидравлические характеристики осевой гидротурбины в конструктивных параметрах мощности.*

Сегодня «испытания» концепта начинают с компьютерной модели, выполняя структурный анализ (ставшим ведущим методом конечных элементов – FEA, широко применяющимся в расчёте плотин) весовых характеристик конструкции, отдельных деталей и элементов, например, лопастей, и применяя вычислительную гидродинамику (CFD) для оценки набегания и взаимодействия потока с граничными поверхностями. Кинематическая характеристика движения потока и рабочего колеса описывается производными физическими величинами передачи скорости потока – скорости на входе лопатки – скорости на выходе – скорости самой лопатки, – лопатка, таким образом, определяет диаметр колеса и размер турбины вне зависимости импульсная/реактивная, – лопасти колеса неподвижные, то есть угол их наклона не может изменяться (на рис. 10 показана изогнутая лопасть с входом и выходом струйного потока под заданными

[7] Методика расчёта изложена в Рекомендациях по конструированию сборно-монолитных ячеистых конструкций и организации изготовления их элементов. М.: Союзгипроводхоз, 1983. – С. 36.

углами, векторно представляющего треугольники скоростей). Чтобы рассчитать крутящий момент, действующий на водяную турбину, необходимо оценить обмен импульсом, то есть обмен импульсом происходит за счёт изменения направления вектора скорости. Мощность турбины определяется силой на входе, скоростью вращения лопастей, выходной мощностью и скоростью потока на выходе. Сила, по второму закону Ньютона – это изменение количества движения F=dm,vdt [H], то есть определив его получают силы на лопатках, – методика расчёта представляет алгоритм: 1) для расчёта эффективной силы, действующей на лопатки, необходимо рассчитать величину и направление относительной скорости набегающей струи; определение компонент *x* и *y* вектора относительной скорости на входе: vx1=$v_1$cos, vy1=$v_1$sin и на выходе: vx2=-$v_2$cos , vy2=v_2·sinβ, где v_1 и v_2 – относительные скорости входящего и выходящего потока струи, представляющие сумму векторов скоростей лопасти *u* (окружная составляющая скорости $u = \pi{\cdot}d{\cdot}n$, где *d* – диаметр [м], *n* – частота вращения [$с^{-1}$]) и абсолютной на входе C_1 и выходе C_2 [м/с], *θ*, *β* – углы между соответственно v_1, v_2 и *u* [°]; 2) сила, передаваемая реактивным потоком лопатке в направлении *x*, равна массовому расходу *Q* [кг/с], который равен плотности жидкости *ρ* [кг/$м^3$] на площадь поперечного сечения струи A_c [$м^2$] и на скалярное значение скорости набегания v: Q=ρAcv; сила, передаваемая реактивным потоком лопатке в направлении оси *Y*: Fy=ρAcvvy2-vy1=ρAcvv$_2$sin +$v_1$cos; полная сила, приложенная к лопатке, равна результирующей: F=Fx2+Fy2, а угол равнодействующей силы – =FyF; выходная мощность: движущая сила турбины равна Fx=ρAcvvx2-vx1=ρAcv-$v_2$cos -$v_1$cos; 3) КПД водяной турбины – отношение выходной мощности к кинетической энергии движения: *η*=Acvvx2cos +vx1cos ·uAcv·v·a·i22.

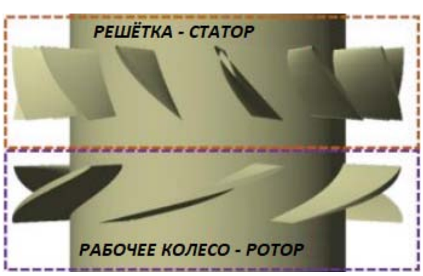


Рис. 11: Принцип передачи количества движения с решётки на лопасти рабочего колеса

4. *Совмещение турбинного водовода со средненапорной гидротурбиной.*

Совмещение посредством рабочей (направляющей) решётки – статора, формирующего направленный на лопасти поток как из диффузора (рис. 11), требует отдельного расчёта, и после определения C_1 и *u*, выбора угла α_1, вычисляют относительную скорость W_1 на входе в рабочую решётку: W1=C12+u2-2C1ucos 1 , и определения угла β_1 по формуле 1=sin 1 cos 1 -uC1 , – после оценки относительной скорости на выходе W_2 и определения угла β_2 (для активных ступеней $\beta_2 \approx \beta_1$ – (2…4°)) абсолютная скорость C2=W22+u22-2W2ucos 2 , а угол α_2 – 2 =sin 2 cos 2 -uW2.

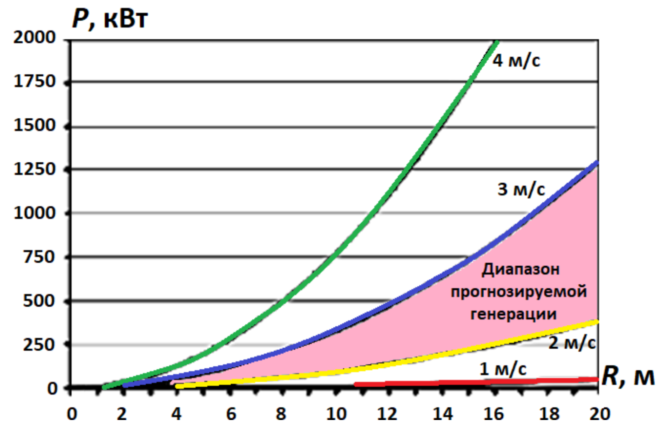


Рис. 12: Выработка электроэнергии в зависимости от диаметра ротора и скорости потока

Решение проблемы 3 – принципиальное решение по ориентации в потоке рабочего колеса, то есть выбор типа турбины.

Для ПЭС инженерная гидравлика может рассматривать турбины двух типов: *а*) с горизонтальной осью, ориентированной вдоль потока, диаметром 10-20 м и мощностью 200-700 кВт могут иметь лопасти с регулируемым шагом, подстраиваемым под скорость потока (рис. 12); *б*) с ортогональной осью и перпендикулярно ей направленным потоком способны извлекать из потока до 35% энергии (для примера, с горизонтальной осью турбины извлекают от 20%); другие преимущества: конструкция низкой материалоёмкости; недостатки: стоимость изготовления на 20% выше турбин со спиральными лопастями (при равной стоимости монтажа), конструкция прямолинейной лопасти (например, вертикальной 3-лопастной турбины Кобольда (рис. 6)) из-за неустойчивости течения с предрасположенностью к разрыву потока приводит к вибрации, но многочисленные лабораторные испытания показывают, что геликоидные лопасти турбины Горлова (рис. 2) решают проблему, и кроме того, в сравнении с прямолинейными лопатками, извлекаемая энергия на 12% больше (согласно другим данным коэффициент мощности прямолинейных лопастей на 5% выше спиральных).

Решение проблемы 4 – неравномерность выработки электроэнергии.

Получение электроэнергии ТЭС (рис. 1) при низкой цене на газ является предпочтительней ПЭС как по финансовым, так и техническим соображениям, а также по воздействию на окружающую среду, но КПД ПЭС при мощности 20-250 МВт может быть в 4 раза больше, – важнейшим фактором, снижающим экономическую эффективность ПЭС, являются паузы в работе из-за периодичности приливов/отливов. В традиционном исполнении ПЭС – *однобассейное* гидротехническое сооружение с отгораживающей плотиной, и работа электростанции возможна в трёх режимах: 1) Генерация в прилив; заполнение бассейна морской водой начинается не сразу: некоторое время затворы турбинных водоводов закрыты, пока не возникнет достаточный гидростатический напор (в ночное время при низких спросе и тарифе вода пропускается в бассейн через дополнительные отверстия, наполняя его). 2) В отлив при минимальном напоре со стороны моря вода из бассейна выпускается через турбинные водоводы, вырабатывая электроэнергию пока гидростатический напор в бассейне не упадёт до минимального уровня, позволяющего турбинам работать эффективно. 3) Двунаправленная генерация – метод использует как фазы прилива, так и отлива: затворы турбинных водоводов остаются закрытыми до конца прилива (рис. 1), после чего воду направляют в турбины – наступает фаза генерации, длящаяся до минимального гидростатического напора – фазы отлива, – двусторонняя генерация сокращает долю пауз и снижает количество агрегатов, то есть стоимость оборудования. *Двухбассейные* ПЭС – основной бассейн может работать как один; второй предназначен для закачки и аккумуляции воды в процессе фазы откачки из первого бассейна, при этом используется часть электроэнергии, генерируемой турбинами, и такая система способна регулировать подачу электроэнергии потребителю, – преимущество систем с двойным бассейном – способность генерировать электричество в период повышенного спроса, недостатки: низкая эффективность работы турбин при низком напоре и увеличение затрат на строительство из-за удлинения плотины. Хотя неравномерность выработки ПЭС не только суточная, но и месячная, но проблема 4 определяется изменением напора в результате приливно-отливного действия волны.

Решение проблемы 5 – недостаточная эффективность преобразования энергии и оптимизация –

проблема тоже инженерной гидравлики. Экономическая и энергетическая эффективности требуют оптимизации – компьютерного моделирования выработки электроэнергии от изменений уровня воды в бассейне на основе конкретных аналитических подходов, что даёт, прежде всего, оптимальное время начала и окончания генерации каждой фазы. Именно этим – нелинейной зависимостью уровня напора и мощностью определяется проблема возможности выхода станций на проектную мощность. Целью оптимизации эксплуатационных мероприятий является, в первую очередь, определение количества турбин и единых оптимальных эксплуатационных характеристик для одинаково результативной работы во время всех фаз всех приливных циклов. Заданное количество турбин заданной мощности должны обеспечить предполагаемую установленную мощность станции в заданном диапазоне; при моделировании исследуют два режима работы: двухсторонняя генерация без насосных станций и двухсторонняя с накачкой. Для улучшения оперативного управления силовыми установками во времени каждого приливного цикла в качестве исходного параметра применяют одно общее значение, и далее оптимизация моделируемой станции продолжается с последних параметров предыдущего цикла, – последовательность операций по управлению режимами работы ПЭС: 1) откачка воды в отлив (опорожнение бассейна), 2) пауза при минимальном уровне отлива (задержка в ожидании), 3) начало прилива (фаза перед наполнением бассейна), 4) начало пропуска воды через затворы, 5) наполнение бассейна, 6) накачка воды в прилив, 7) пауза на максимуме приливного уровня, 8) начало отлива (перед опорожнением), 9) пропуск воды в отлив через затворы, 10) откачка воды в отлив (опорожнение бассейна). Эффективная эксплуатация на основе целевой функции каждого цикла максимизирует выход энергии, и добавление прокачки повышает выход электричества на ≈15-20% [8], а в целом оптимизированное управление циклами приводит, за счёт более гибкого управления турбинами и затворами, к увеличению выхода электроэнергии на ≈30-35% (оптимизация повышает КПД модели четырехлопастной турбины на 5,5 и трёхлопастной на 4,5%). Полностью оптимизированный процесс управления в решении инженерных задач включает большое число переменных (начиная с гидродинамических характеристик прибрежной зоны), требующих повышенных вычислительных ресурсов.

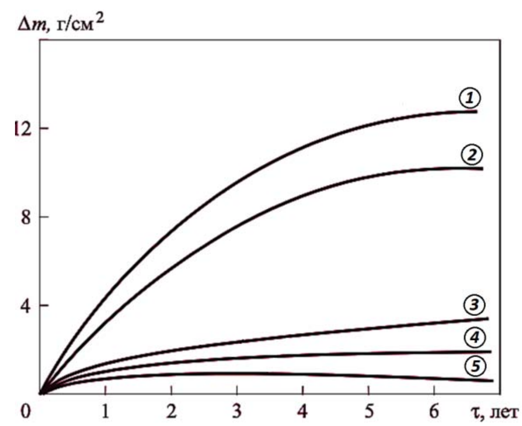


Рис. 13: Интенсивность коррозии конструкций в воде разных морей: 1 – Северном; 2 – Средиземном; 3 – с высоким содержанием Са и загрязнённая сточными водами; 4 – без загрязнений; 5 – Чёрном[9]

Решение проблемы 6 – особые условия эксплуатации и технического обслуживания отражаются на расходах, и стоимость эксплуатации и мероприятия по техническому обслуживанию обычных ПЭС самая низкая в сравнении с другими станциями генерации энергии моря. Из всех возможных осложнений в эксплуатации, связанных с задачами инженерной гидравлики, три наиболее острые – волны, ледовые явления, коррозия. Традиционными для ГТС методами, описанными в СП (38.13330.2018), рекомендациях, справочниках являются: для снижения силы воздействия волн – волнорезы, берегоукрепление, для ледовых нагрузок – ледорезы, для защиты

Global Journal of Research in Engineering (E) XXIV Issue I Version I Year 2024

сороудерживающих решёток от обмерзания – антиобледенители в виде, например, гидрофобных покрытий, для защиты за кладных частей затворов – электрообогрева, борьбы с внутриводным льдом и шуговыми коврами – запани и шугосбросы, – целесообразно гидравлическое лабораторное моделирование. Электрохимическая коррозия металлических конструкций, исполнительных механизмов, деталей турбинных агрегатов в морской воде высока из-за наличия в ней растворённых солей – катионов активных металлов: хлоридов и сульфатов натрия, магния, кальция, калия; кроме того, в морской воде высока и депассивность. Кинетика процессов определяется составом и концентрацией электролита (рис. 13): больше солёность – выше скорость коррозии и ниже надёжность, а также активностью металла конструкции в виде простого вещества или соединения (таблица 2).

Таблица 2: Электрохимический ряд активности металлов

активные	***средней активности***		***неактивные***
Li → K → Na → Ca → Ba →	Mg → Al → Mn → Zn → Cr → Fe → Ni → Sn → Pb →	H_2	Cu → Hg → Ag → Pt → Au

К примеру, высокий потенциал медных сплавов в электролитическом контакте со сплавами железа создаёт поток электронов от Fe к Cu, корродируя первый, а это требует специальных методов защиты: легирования, ингибиторов, изолирующих покрытий, электрохимической защиты; выбор метода, предотвращающего окислительно-восстановительную реакцию, определяет стоимость строительства и эксплуатационные издержки.

Сейчас накоплен достаточный опыт работы приливных электростанций, вырабатывающих электричество в сеть на протяжении многих десятилетий.

Решение проблемы 7 – воздействие на окружающую среду.

Приливная станция – вредная технология электрогенерации: ПЭС нарушает сложившуюся экосистему географического региона, формировавшуюся тысячелетиями, – наиболее показательные примеры с крупными млекопитающими[8]: в августе 2004 г. на ПЭС Аннаполис в зал. Фанди (рекордные приливы – до 18 м) взрослый горбатый кит в слабый прилив проплыл через открытые ворота шлюза в бассейн, и на несколько дней застрял в верхней части р. Аннаполис, но самостоятельно нашёл выход, однако уже весной 2007 г. там же, у г. Бриджтауна, найдено тело неполовозрелого горбатого кита, и причина гибели осталась неизвестной; впрочем, роль заграждений в данных случаях скорее положительная. ПЭС также могут стать определённой угрозой экономического развития, если в ограждаемой зоне активно развито судоходство, но и данная проблема решается при помощи инженерной гидравлики. И вместе с тем, традиционные приливно-отливные электростанции вряд ли будут иметь широкое распространение из-за критических недостатков: дороговизны, длительного срока строительства, ограниченного числа мест с высоким приливом и подходящей береговой линией, непреодолимой угрозы окружающей среде. Поиск новых технологически совершенных подходов в развитии энергетики формирует в среднесрочной перспективе политику поддержки возобновляемых источников энергии, главным образом солнечных и ветровых, а в долгосрочной – атомных реакторов на быстрых нейтронах (ядерного топлива замкнутого цикла) и ядерного синтеза (термоядерного цикла), а также производства водорода.

Решение проблемы 8 – влияние на прибрежно-морской наносный режим.

Блокирование приливно-отливного течения плотиной способно вызвать увеличение эрозии берегов как со стороны моря, так и бассейна, усилить подводные течения с подмывом сооружений. Инженерная гидравлика открывает широкие возможности в проектировании специальных сооружений, меняющих наносный режим водных объектов: методом лабораторного моделирования участков в пределах акватории можно определять параметры и строить в натуре на дне пороги, на берегах – шпоры, то есть возводить простые сооружения, изменяющие сложным образом характер течений, и формирующие отложения твёрдого стока в пределах безопасных и целесообразных, согласно проекту с учётом батиметрических особенностей бассейна.

IV. Заключение

1. Альтернативная энергетика, построенная на возобновляемых источниках, предполагает прекращение в процессе преобразования энергии выработки парниковых газов, – также немаловажным является переориентация поставок ископаемого сырья с энергетического на перерабатывающий промышленный сектор и снижение стоимости получения электроэнергии.
2. Тело плотины ПЭС отлично от устраиваемых на реках и по поперечному профилю, и по конструкционному исполнению, поскольку предназначено для одинаковых с обеих сторон гидростатических напоров, – плотина ПЭС – низконапорная, железобетонная, целесообразна – кубоидной формы, ячеистая.
3. Трёхмерные информационные модели потока проточной части гидротурбины позволяют судить о вибрации и кавитации с учётом изменения

[8] Исследования – количественные данные о передвижениив зоне заграждения иуровне гибелирыб, связанной с проходом через прямоточные турбины большого диаметра,отсутствуют.

Global Journal of Research in Engineering (E) XXIV Issue I Version I Year 2024

параметров главных характеристик, например, при большем напоре – меньше вибрация и ниже вероятность возникновения усталости металла; сравнения колебаний сил и моментов, развиваемых в различных турбинных установках, позволяют проектировать конструкции с минимальными колебаниями. Структурный анализ твёрдого тела конструкций гидротурбины направлен, помимо конструкторской проработки геометрии деталей и основных элементов, таких как форма лопастей, на изучение механических свойств металла и выбор конструкционной стали.

4. Оптимизация работы ПЭС направлена не только на совершенствование течения в турбинном колесе с целью роста КПД, снижения вибрации и шума, но и решения других вопросов инженерной гидравлики: расчёт многобассейных систем, определение оптимального количества турбин, определение оптимального времени начала и окончания генерации каждой фазы, единых оптимальных эксплуатационных характеристик для одинаково результативной работы во время всех фаз всех приливных циклов.
5. Осложнения в эксплуатации, связанные с задачами инженерной гидравлики – волны, ледовые явления, коррозия. Традиционными для ГТС методами, описанными в СП, рекомендациях, справочниках являются: для снижения силы воздействия волн – волнорезы, берегоукрепление, для ледовых нагрузок – ледорезы, для защиты сороудерживающих решёток от обмерзания – антиобледенители в виде, например, гидрофобных покрытий, для защиты закладных частей затворов – электрообогрева, борьбы с внутриводным льдом и шуговыми коврами – запани и шугосбросы, – целесообразно гидравлическое лабораторное моделирование. Для предотвращения электрохимической коррозии металлических конструкций, исполнительных механизмов, деталей турбинных агрегатов в морской воде используют методы: легирования, ингибиторов, изолирующих покрытий, электрохимической защиты.
6. Системный анализ проблем, по сложности сопоставимых с ПЭС, невозможен без колоссальных вычислительных мощностей ЭВМ, поэтому стал широко доступен лишь в последние годы, и целесообразен не только в задачах КИВР, но и в проектах ПЭС, где учтены оптимизация работы электростанции, вопросы эксплуатации, охраны водных ресурсов и др.

Литература

1. Бахтиаров В.А. Электрификация СССР за годы Советской власти и пути её дальнейшего развития. Метеорология, гидрология вод суши и океанология. Вып. 39. Л.: Гидрометеорологическое издательство, 1970. – С. 179-198.
2. G. Buigues, I. Zamora, A. J. Mazón, V. Valverde and F.J. Pérez. Sea Energy Conversion: Problems and Possibilities. April 2006, Universidad del País Vasco/ Euskal Herriko Unibertsitatea. – P. 1-8.
3. Минин В.А., Дмитриев Г.С. Перспективы освоения нетрадиционных и возобновляемых источников энергии на Кольском полуострове. Мурманск: ЭПЦ «Беллона», 2007. – С. 93.
4. Ерхов А.А. Новое о кавитации в насосах. Сборник « Новые идеи в науках о Земле» / Материалы XV Межд.науч-прак.конф. – М.: РГГРУ, 2021. – С. 279-283.
5. Ерхов А.А. Тангенциальное ускорение конфузорного течения. Ученые заметки ТОГУ, № 4 2015. – С. 267-269.
6. Ерхов А.А. Гидротехнические сооружения: курс лекций. М.: МГРИ, 2019. – С. 70.
7. Бакштанин А.М., Крылов А.П., Метвеева Т.И., Беглярова Э.С. Техническая реализация проекта Северной приливной электростанции в Баренцевом море. Природообустройство № 5, 2020. – С. 59-67.
8. Kramer Stephan C., Avdis Alexandros, Piggott Matthew D. Optimising tidal range power plant operation. Applied Energy, V. 212, 15 February 2018. – P. 680-690.
9. Сидняев Н.И., Бережнова М.А. Исследование влияния морской воды на деструкцию погружных морских конструкций. Инженерный журнал: наука и инновации, 2019, вып. 10. http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2019-10-1926