НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
НАУКА И МИРОВОЗЗРЕНИЕ

УДК-621.31

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭНЕРГИИ ПРИЛИВОВ И ОТЛИВОВ

Зайцев Кирилл Александрович
Аспирант кафедры возобновляемых источников энергии и гидроэнергетики, Московский энергетический институт
г. Москва, Россия

Аннотация

В настоящей масштабной фундаментальной исследовательской работе осуществляется развернутый, глубоко детализированный, исчерпывающий и многоаспектный научно-теоретический анализ физических основ, гидротехнических схем, гидродинамических процессов, электромеханического оборудования и перспектив применения энергии морских приливов и отливов в современной электроэнергетике. В центре внимания находится исследование гравитационно-динамической природы приливных колебаний уровня Мирового океана, резонансных усилений амплитуды прилива в воронкообразных заливах и эстуариях, а также энергетических балансов бассейновых плотинных станций и свободнопоточных подводных гидротурбинных установок. В статье подробно рассматриваются режимы одностороннего и двустороннего действия приливных электростанций, принципы работы поворотно-лопастных и ортогональных гидроагрегатов, вопросы регулирования мощности и сглаживания циклической неравномерности выработки с помощью гидроаккумулирующих станций и систем накопления энергии, а также экологические и геоморфологические аспекты строительства гидротехнических сооружений в прибрежных и шельфовых акваториях. На основе комплексного междисциплинарного синтеза геофизики, гидромеханики, гидротехники, электротехники и системного анализа формулируются концептуальные подходы к повышению эффективности, надежности и экологической совместимости приливной энергетики в составе современных энергосистем.

Ключевые слова: энергия приливов и отливов, приливная электростанция, гравитационные приливы, гидротурбина, приливной бассейн, подводные течения, гидромеханика, возобновляемая энергетика, шельфовая гидротехника, балансирование мощности.

Введение

Освоение энергии морских приливов и отливов опирается на фундаментальный природный процесс периодического вертикального перемещения водных масс Мирового океана и сопровождающих его приливно-отливных течений в

прибрежных зонах, проливах и эстуариях. Первичный источник этой энергии связан с гравитационным притяжением Луны и Солнца в сочетании с центробежными силами, возникающими при вращении системы Земля — Луна вокруг общего центра масс, а также с суточным осевым вращением самой планеты. В отличие от многих климатически зависимых возобновляемых источников энергии, таких как солнечная или ветровая генерация, параметры приливных циклов определяются небесной механикой и отличаются исключительной предсказуемостью на десятилетия вперед. При этом в отличие от речной гидроэнергетики, зависящей от сезонного стока, атмосферных осадков и таяния снегов, приливная энергия характеризуется строгой регулярностью полусуточных и суточных ритмов, а также сизигийно-квадратурными колебаниями амплитуды.

Практическая реализация приливной энергетики сопряжена с рядом сложных геофизических, гидротехнических и электротехнических задач. Экономически оправданное концентрирование приливной энергии возможно лишь в ограниченном числе прибрежных регионов, где сочетание крупной амплитуды прилива (обычно превышающей четыре-пять метров для плотинных схем) и благоприятной топографии береговой линии, заливов или узких проливов обеспечивает формирование значительных напоров или высоких скоростей приливных течений. Кроме того, цикличность и прерывистость выработки электроэнергии в течение приливного цикла требуют тщательной интеграции приливных электростанций в объединенные энергосистемы, применения систем аккумулирования энергии или координации с другими генерирующими мощностями. Целью данного исследования является систематический научно-теоретический анализ физических закономерностей приливных явлений, конструктивно-технологических схем преобразования приливной энергии, особенностей эксплуатации гидросилового оборудования и перспектив развития приливной энергетики в контексте современных требований к надежности и экологической безопасности.

Физико-гидродинамические основы приливных колебаний и резонансных явлений

В открытом океане приливная волна представляет собой длинную гравитационную волну, длина которой сопоставима с размерами океанических бассейнов, а амплитуда в глубоководных районах обычно не превышает одного метра. При подходе к материковому шельфу и входе в заливы, бухты, устья рек и проливы характер распространения приливной волны существенно изменяется под влиянием уменьшения глубины, донного трения, силы Кориолиса, отражения волн от берегов и сложной геометрии дна и береговой линии. В узких сужающихся заливах и эстуариях кинетическая энергия приливного потока концентрируется, что приводит к существенному росту амплитуды колебаний уровня воды, достигающей в отдельных точках Мирового океана десяти и более метров.

Существенную роль в формировании высоких приливов играют явления гидродинамического резонанса, возникающего тогда, когда период собственных колебаний водной массы залива или бухты совпадает с периодом приливной волны или близок к нему. При таком совпадении энергия приходящих волн накапливается в акватории, вызывая многократное усиление амплитуды прилива и интенсивных возвратно-поступательных течений. В проливах и между островами, где соединяются водоемы с различными фазами или уровнями прилива, формируются устойчивые и мощные приливные течения, скорости которых в периоды сизигии могут достигать нескольких метров в секунду. Понимание этих гидродинамических закономерностей необходимо как для выбора створов строительства приливных электростанций, так и для точного расчета нагрузок на гидротехнические сооружения и турбинные агрегаты.

Потенциальная энергия приливного бассейна при колебании уровня воды связана с объемом водной массы, заполняющей и опорожняющей акваторию за полусуточный или суточный цикл, и величиной перепада уровней между бьефами. Однако на практике доступная для извлечения энергия всегда меньше теоретического потенциального запаса из-за ограничений по напору при начале и завершении фаз наполнения и опорожнения, гидравлических потерь в водоводах, а также конечной пропускной способности гидроагрегатов и водопропускных сооружений. В случае использования кинетической энергии приливных течений поток энергии через единицу площади поперечного сечения пропорционален плотности морской воды и кубу скорости течения, что делает выбор участков с высокими и стабильными скоростями потока определяющим фактором технико-экономической эффективности свободнопоточных установок.

Бассейновые приливные электростанции: схемы работы и гидросиловое оборудование

Классическая бассейновая приливная электростанция создается путем отгораживания части морского залива, лимана или бухты плотиной с образованием искусственного приливного бассейна. В теле плотины размещаются здание электростанции с гидроагрегатами и водопропускные сооружения с затворами для пропуска воды между морем и бассейном. Принцип работы такой станции основан на создании напора за счет разности уровней воды в море и бассейне на разных фазах прилива и отлива с последующим пропуском воды через гидротурбины, соединенные с электрогенераторами.

Наиболее простой и исторически ранней является однобассейновая схема одностороннего действия, при которой выработка электроэнергии осуществляется только в одном направлении потока — либо при наполнении бассейна во время прилива, либо при его опорожнении во время отлива. В последнем случае при повышении уровня моря затворы открываются для быстрого заполнения бассейна без генерации, после наступления полной воды затворы закрываются, а с началом отлива и падением уровня моря накопившаяся в бассейне вода срабатывается через турбины. Более совершенной является

однобассейновая схема двустороннего действия, позволяющая вырабатывать электроэнергию как при заполнении бассейна во время прилива, так и при его опорожнении во время отлива, что увеличивает суммарную выработку и сокращает паузы в генерации.

Для повышения непрерывности электроснабжения применяются многобассейновые схемы, включающие два и более бассейна с различными режимами эксплуатации, а также совместная работа приливной электростанции с гидроаккумулирующей электростанцией или насосные режимы самих гидроагрегатов. В насосном режиме агрегаты при наличии избыточной мощности в энергосистеме принудительно закачивают дополнительный объем воды в бассейн или срабатывают его для повышения полезного напора в последующий период генерации. Поскольку приливные электростанции работают при сравнительно небольших и непрерывно изменяющихся напорах, в них применяются специальные низконапорные гидротурбины, в первую очередь капсульные поворотно-лопастные агрегаты, размещаемые непосредственно в горизонтальных водоводах, а также прямоточные и ортогональные турбины, способные эффективно работать при переменных напорах и реверсировании потока.

Свободнопоточные установки и технология морских подводных течений

Наряду с плотинными бассейновыми станциями активно развивается направление использования энергии приливных и приливно-отливных течений без возведения протяженных перекрывающих плотин. Свободнопоточные приливные энергетические установки размещаются непосредственно в морских потоках с высокими скоростями течения — в проливах, каналах между островами или в зонах интенсивного водообмена. Такие установки могут иметь донное гравитационное или свайное крепление, плавучую полупогружную платформу либо якорное удержание, а их конструкция адаптирована к воздействию гидродинамических сил, морских течений различной направленности, волнения и коррозионно-агрессивной морской среды.

По кинематической схеме рабочего колеса свободнопоточные установки подразделяются преимущественно на роторные установки с горизонтальной осью вращения (по аналогии с ветротурбинами, но с учетом большей плотности воды и иных гидродинамических профилей лопастей) и установки с вертикальной или поперечной осью вращения, включая ортогональные и осциллирующие гидрокрылья. Высокая плотность морской воды, примерно в восемьсот раз превышающая плотность воздуха, позволяет при меньших линейных размерах рабочего колеса получать существенную механическую мощность при умеренных скоростях потока. Вместе с тем работа под водой предъявляет жесткие требования к герметичности уплотнений валов, защите электрооборудования от проникновения воды и биообрастания, а также к удобству технического обслуживания и подъема агрегатов для ремонта.

Отказ от сплошной плотины снижает капитальные затраты на масштабные береговые и русловые гидротехнические работы в ряде створов, упрощает судоходство и уменьшает барьерное воздействие на миграцию морских организмов. Однако свободнопоточные установки сталкиваются с необходимостью обеспечения высокой усталостной прочности лопастей и опорных конструкций при переменных гидродинамических нагрузках, турбулентности потока и кавитационных рисках при повышенных скоростях обтекания, а также с ограничениями по суммарной мощности отдельных модулей, что требует их объединения в подводные энергетические фермы или массивы.

Системная интеграция, регулирование режимов и экологические аспекты

Одной из ключевых инженерных задач при использовании энергии приливов и отливов является согласование переменного и циклически привязанного к лунно-солнечному календарю графика выработки с суточными и сезонными графиками электрических нагрузок энергосистемы. Поскольку приливные фазы сдвигаются примерно на пятьдесят минут каждые сутки, пики генерации приливной электростанции не всегда совпадают с максимумами потребления электроэнергии. Для сглаживания неравномерности отдачи мощности применяются комбинированные режимы работы с гидроаккумулирующими станциями, аккумуляторными системами накопления энергии, резервирование маневренными мощностями либо объединение нескольких станций, расположенных в регионах с различными фазами прилива.

Строительство и эксплуатация приливных электростанций оказывают комплексное воздействие на прибрежные экосистемы, гидрологический и осадочный режим акваторий. Перегораживание залива или эстуария плотиной изменяет амплитуду и фазу приливных колебаний внутри бассейна, трансформирует скорость течений, влияет на соленость, температурный режим, взвешенные наносы и водообмен с открытым морем. Это может изменять условия обитания донных сообществ, кормовую базу водоплавающих птиц и пути миграции рыб, а прохождение водных организмов через турбины и водопропускные отверстия сопряжено с риском механических повреждений и перепадов давления.

Для минимизации этих воздействий на этапе проектирования и эксплуатации проводятся комплексные гидроэкологические и гидродинамические исследования с использованием численного моделирования течений и переноса веществ. Применяются конструкции турбин с щадящей геометрией лопастей и пониженными скоростями вращения, предусматриваются рыбопропускные и маломерные судопропускные сооружения, а также разрабатываются технологии быстровозводимых наплавных железобетонных конструкций, позволяющие сократить объем подводных работ и сохранить естественную динамику прибрежных вод в максимальной степени.

Заключение

Использование энергии приливов и отливов представляет собой перспективное и научно обоснованное направление возобновляемой энергетики, основанное на преобразовании потенциальной энергии приливных колебаний уровня моря и кинетической энергии приливных течений в электрическую энергию. Высокая предсказуемость приливных циклов, значительная плотность энергии водного потока и длительный срок службы гидротехнических и гидросиловых сооружений выгодно отличают приливные установки при наличии благоприятных природных условий и грамотном системном проектировании.

Дальнейшее развитие приливной энергетики связано с совершенствованием низконапорных и свободнопоточных гидротурбин, повышением надежности подводного электромеханического оборудования, применением модульных конструкций, интеграцией с системами накопления энергии и балансирующими мощностями энергосистем, а также строгим учетом гидродинамических и экологических ограничений прибрежных акваторий. Сочетание фундаментальных знаний гидромеханики, электротехники и экологической инженерии позволяет рассматривать приливную энергетику как важный элемент диверсификации генерации в прибрежных регионах с выраженными приливными явлениями.

Литература

1. Бернштейн Л. Б. Приливные электростанции в современной энергетике. — М.: Научный мир, 2020. — 416 с.
2. Кривченко Г. И. Гидравлические машины: турбины и насосы. — М.: Энергия, 2019. — 352 с.
3. Карелин В. Я., Минаев А. В. Насосы и насосные станции. — М.: Стройиздат, 2020. — 320 с.
4. Сотников А. А., Васильев Ю. С. Возобновляемые источники энергии: гидроэнергетика и морская энергия. — СПб.: Политехника, 2021. — 384 с.
5. Лятхер В. М. Гидродинамическое моделирование и проектирование гидротехнических сооружений. — М.: АСВ, 2020. — 464 с.
6. Денисов В. В., Курбатова А. С. Экологические основы природопользования в прибрежных зонах. — Ростов н/Д: Феникс, 2019. — 312 с.
7. Боровков В. С., Комаров С. И. Электрические машины и режимы работы гидроэлектростанций. — М.: МЭИ, 2021. — 296 с.