

УДК 504.4.062.2

М. А. Полетаева, И. В. Стецюк, Е. Ф. Храпунов

**ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ЭНЕРГИИ ПРИЛИВОВ В ЭЛЕКТРИЧЕСКУЮ:  
ДОСТОИНСТВА И НЕДОСТАТКИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ  
РЕШЕНИЙ**

**ПОЛЕТАЕВА Марина Анатольевна** – младший научный сотрудник. ФГУП «Крыловский государственный научный центр». 196158, Московское шоссе, 44, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: krylov@krylov.spb.ru.

**СТЕЦЮК Ирина Васильевна** – младший научный сотрудник, ФГУП «Крыловский государственный научный центр». 196158, Московское шоссе, 44, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: irene\_stetsuok@yahoo.com.

**ХРАПУНОВ Евгений Федорович** – лаборант-исследователь. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого. 195251, Политехническая ул., 29, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: office@spbstu.ru.

*В настоящее время в мире возрос интерес к источникам энергии, основанным на преобразовании природных возобновляемых ресурсов: солнца, ветра, волн. В статье рассматриваются примеры технологических решений преобразователей приливной энергии в электрическую, их достоинства и недостатки. Также рассматривается вопрос о возможном негативном влиянии приливных электростанций на биоресурсы. Показано, что наряду с требованием эффективности преобразования приливной энергии стоит вопрос об обеспечении безопасности турбин по отношению к морским обитателям. По результатам проведенного анализа существующих в настоящее время проектов по использованию приливной энергии и преобразованию ее в электрическую сделан вывод, что получение экологически чистой энергии требует тщательной проработки технических решений устройств путем усовершенствования технологии приливных генераторов энергии с целью повышения их эффективности, определения географического места расположения приливной электростанции с оценкой воздействия на морских млекопитающих и рыб и рассмотрение работы в составе энергосистемы, располагающей достаточной мощностью электростанций других типов.*

**ЭКОЛОГИЯ; ПРИЛИВНЫЕ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ; АРКТИЧЕСКИЙ ШЕЛЬФ; БЕЗОПАСНОСТЬ**

Работа приливной электростанции (ПЭС) основана на преобразовании потенциальной и/или кинетической энергии воды во время прилива/отлива.

Работа приливных плотин основана на преобразовании потенциальной энергии разностей уровня воды во время приливов и отливов. Для получения энергии залив или устье реки перекрывают плотиной, в которой установлены гидроагрегаты, которые могут работать как в режиме генератора, так и в режиме насоса (для перекачки воды в водохранилище для последующей работы в отсутствие приливов и отливов).

Приливные турбины преобразуют кинетическую энергию потока. Гидрокинетическая приливно-отливная энергия генерируется за счет преобразования кинетической энергии движения жидкости и зависит от площади захваченной устройством жидкости. Все гидрокинетические турбины включают следующие общие компоненты: ротор, трансмиссию, систему швартовки, опору. Для всех устройств или парка турбин должна быть обеспечена передача электричества к берегу и предусмотрена защита против биологического обрастания. В большинстве случаев, для минимизации операций на море устройства собираются на суше по степени возможности и транспортируются на судне или барже к месту установки.

Ротор, как и в случае ветровых турбин, извлекает энергию из приливных течений и преобразует это во вращение, механическую энергию. Ось вращения может быть параллельна направлению потока (турбины с горизонтальной осью) и перпендикулярна направлению потока (турбины с вертикальной осью).

Для обоих типов турбин (с горизонтальной и вертикальной осью), теоретически возможно возрастание эффективности устройства путем расширения потока вниз по течению (за ротором). Но с этим связана потенциальная сложность конструирования диффузора.

Вращательная скорость турбин ротора ограничена параметрами эффективности и параметрами, при которых может возникать кавитация. В идеале, скорость вращения ограничена, что позволяет подобрать оптимальный тип скоростного соотношения (соотношения скорости

ротора к скорости течения). В зависимости от конструкции ротора, оптимальный тип скоростного соотношения может изменяться от 4 до 8. Тем не менее, если скорость вращения ротора велика, могут образовываться кавитационные пузыри. Для 10-ти метровой турбины это соответствует приблизительно 20 об/мин. Большинство устройств вращается со скоростью от 10 до 40 об/мин [1].

Скорость приливных течений, которая будет обеспечивать экономическую рентабельность разработок, зависит от места расположения и характеристик устройства. В основном, скорость течения должна быть больше, чем 2.5 м/с. В большинстве случаев устройства начинают генерировать энергию при скорости около 0.8 м/с.

Поскольку приливные течения в прилегающем ко дну пограничном слое менее обладают меньшей энергией, устройства должны быть размещены на некотором расстоянии от морского дна вне этого слоя. Профиль пограничного слоя имеет различный характер, но, как правило, устройства не должны размещаться в нижней четверти глубины жидкости. Устройства, располагаемые таким образом способны генерировать больше энергии, но стоимость фундамента становится выше. Глубины размещения для фундаментов с заякоренными сваями в настоящее время ограничены экономическими соображениями глубиной воды в 50 метров. Кроме того, если устройства располагаются в местах по линии торгового судоходства, должно обеспечиваться наличие зазора сверху величиной, как минимум, 15–25 м [1].

Исследователями коммерческой целесообразности [2] была предложена компоновка массива, состоящего из рядов турбин с равномерным интервалом между ними в продольном и поперечном направлении. Устройства предполагалось размещать поперек канала на расстоянии, максимально возможное с точки зрения ресурсов приливного течения, батиметрии, диаметра ротора и допусков навигации. Высокая величина соотношения территории охваченной устройством к площади поперечного сечения канала повышает производительность турбины [3]. Однако такой механизм не желателен с точки зрения экологического риска, обусловленного большей вероятностью столкновения рыбы и морских млекопитающих и эффектов уменьшения энергии из-за

увеличения потерь при смешивании следа со свободным потоком [3]. И напротив, отдельные кластеры турбин более желательны с экологической точки зрения, но, на коммерческом уровне снижается потенциал генерируемой мощности, поскольку высокоскоростные потоки направляются вокруг кластера. Аналогично, увеличение бокового и продольного промежутка между устройствами может снизить экологические риски, но привести к неэффективному использованию ресурсов.

По состоянию на март 2010 года существовало более 60 различных технологий, включенных в DOE's (U.S. Department of Energy Energy). Однако лишь немногие из них были реализованы для размещения в море [1]. По данным [1] далее рассматриваются устройства, находящиеся в стадии активного развития (на 2010 год). В целях упрощения сравнения различных установок, примерная выходная мощность каждого устройства оценивается при скорости потока 2.5 м/с.

Clean Current – Race Rocks (Race Rocks, British Columbia). Турбины Clean Current – это турбины с горизонтальной осью ротора закрытой диффузором. Прототип с диаметром 6 м периодически эксплуатируется в Race Rocks, British Columbia, в сотрудничестве с колледжем Pearson. Этот прототип крепится к морскому дну жесткой одиночной сваей. Для установки крупного коммерческого прототипа в заливе Фанди в 2012 году планировалось использовать гравитационный фундамент. Экологические исследования, связанные с этим проектом, были направлены на определение повреждений связанных с установкой устройств (например, повреждения морского дна, связанные с установкой фундамента и укладкой кабелей, шумом от бурения).

Приливно поточные турбины Hammerfest-Strom представляют собой трехлопастной ротор с горизонтальной осью и регулируемым шагом. Выравнивание ротора по потоку фиксировано (без рыскания), но шаг ротора изменяется на 180 градусов во время замедления водного потока для реализации двунаправленного режима работы во время приливов и отливов. Устройство установлено в 2003 году на глубине 50 м в Норвегии, поодаль от Хаммерфеста и функционирует с 2003 года.

Турбины Морских Течений SeaGen (Стэнфорд Лох, Северная Ирландия) представляют собой двухлопастной ротор с горизонтальной осью и регулируемым шагом. Выравнивание ротора по потоку фиксировано (без рыскания), шаг ротора изменяется на 180 градусов в медленной воде для реализации двунаправленного режима работы во время приливов и отливов. Каждое устройство состоит из двух роторов соединенных одиночной сваей с фундаментом посредством перекладки. Одиночная свая располагается над водной поверхностью и имеет помещение для электроники и комплексного механизма для подъема роторов из воды с целью профилактического осмотра и технического обслуживания. Выходная мощность устройства 1.6 МВт.

Турбинный генератор компании Ocean Renewable Power Company (ORPC) представляет собой поперек-поточную турбину. Устройство ORPC's TidGen состоит из одиночной заякоренной на морском дне гравитационной опорной рамы. ORPC также разрабатывает большой модуль OCGen, в котором отдельные устройства скреплены вместе и плавают в толще воды, будучи закрепленными к фундаменту на морском дне швартовочными тросами. ORPC основана в США и развивает проекты в Майне и на Аляске. Выходная мощность устройства 0.14 МВт.

Турбина OpenHydro (Fundy Demonstration, Minas Passage, Nova Scotia) представляет собой высокопрочный ротор с горизонтальной осью и симметричными лопастями с фиксированным шагом. Выравнивание ротора по потоку фиксировано (без рыскания). Выработка электроэнергии осуществляется с переменной скоростью, генератор на постоянных магнитах помещен в защитный кожух. Центральная часть ротора открыта. Экологический мониторинг этого устройства проводится как самостоятельная деятельность Исследовательского центра энергии Fundy Ocean (FORCE), некоммерческого института, который владеет и управляет объектами, на которых проверяются и демонстрируются приливные турбины.

Турбины Verdant Power Kinetic Hydropower System (KHPS) (RITE, East River, New York) – это трехлопастной ротор с горизонтальной осью, которая пассивно осуществляет рыскание, чтобы удерживать ротор в соответствии с главным направлением потока: отлива и прилива.

В приливном эксперименте на острове Рузвельта (RITE) было задействовано шесть турбин на обтекаемых одиночных сваях, которые были закреплены в морском дне. По экономическим соображениям, а также в зависимости от глубины воды и состава дна, будущее размещение планировалось на заякоренном тяжелом фундаменте в одиночной, либо в тройной (три турбины на фундамент) конфигурации. Шесть турбин массива установленных по RITE проекту являются демонстрационным массивом приливных турбин в мире. В рамках следующего этапа RITE проекта будут установлены машины gen5 (выходной мощностью 0.05–0.27 МВт).

Рассмотренные типы турбин имеют различные характеристики: диаметр ротора, количество лопастей, выходную мощность. В общем, конструкцию приливных турбин можно разделить на открытые и закрытые.

Закрытая приливная турбина заключена в особого рода кожух, создающий вокруг неё среду низкого давления. Кожух позволяет улучшить производительность турбины за счёт увеличения площади сечения, используемой для захвата потока. Заявленные показатели могут быть в 3–4 раза выше, чем у турбины, работающей без кожуха. Свойства кожуха, благодаря которым увеличивается скорость потоков, проходящих через турбину, позволяют применять в производстве энергии слабые приливные течения, в прошлом недоступные для коммерческого использования.

Преимуществом закрытых турбин является: большее количество производимой энергии по сравнению с открытыми; большая эффективность благодаря «управляемости потока» и ограничению концевых потерь; меньшие размеры при равной мощности, в сравнении с открытыми; меньший уровень шума; предохранение двигателя от органических наростов; защита от контакта плавучего мусора или ныряльщиков с лопастями турбины.

Среди недостатков выделяют следующие: для повышения эффективности работы двигателя (в частности, для сохранения определенного зазора между концами лопастей и кожухом), требуется изготовление и сборка весьма сложных форм, что сказывается на стоимости производства; закрытые турбины работают с повышенной частотой вращения, что создаёт дополнительные проблемы

вибрации; закрытые турбины имеют большее лобовое сопротивление, соответственно, им требуется бо́льшая опора [4].

Приливная энергия относится к возобновляемым источникам энергии и считается экологически безопасной. Тем не менее, в последние годы в средствах массовой информации (СМИ) стали появляться статьи, в которых возможный риск для рыб и других обитателей морских глубин от приливных электростанций сравнивается с ущербом от ветровых электростанций для птиц [5].

Гаэль Зидлевски, биолог Университета штата Мэн (США), являющаяся экспертом по поведению рыб в присутствии приливных турбин, считает, что приливные турбины безопаснее, чем ветровые, так как их лопасти вращаются медленнее. Но наличие турбины на пути приливных течений может способствовать замедлению потока воды и препятствовать попаданию пищевых веществ к определенным популяциям, например, омарам, чья пищевая цепь зависит от фитопланктона переносимого приливами. Исследования Г. Зидлевски направлены на получение новых данных, которые могли бы быть использованы проектировщиками приливных турбин для создания более «дружественных» по отношению к рыбам технологий [5].

Пассивное передвижение кормовых объектов – планктона, обусловленное подвижностью воды влечет за собой и перемещение рыб. В районе Арктического шельфа перемещение рыб можно рассмотреть на примере атлантической трески. Атлантическая треска широко мигрирует: одним из основных мест ее нереста служат отмели (банки) у Лофотенских островов в Атлантическом океане; в поисках пищи большие ее стаи направляются частью вдоль берегов Скандинавии на северо-восток и далее на восток через Баренцево море к острову Колгуеву и Новой Земле, частью на север, к Медвежьему острову и далее к Шпицбергену (рис. 1). В районе Мурманска и в Канинско-Колгуевском мелководье на добыче мигрирующих и кормящихся косяков в значительной мере базируется промышленный лов трески. Треска при миграциях придерживается теплых струй Нордкапского течения, по которым проникает через Карские Ворота и Югорский Шар в Карское море. Наибольшее количество трески в Баренцевом море скапливается в августе [6].

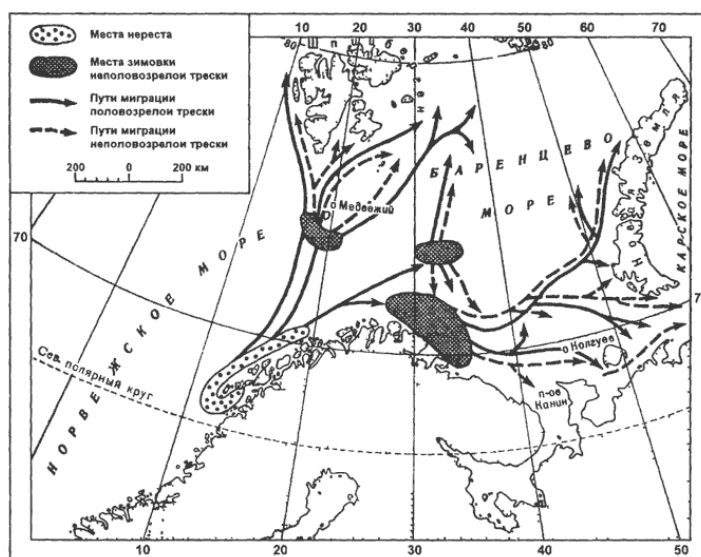


Рис. 1 Схема миграции атлантической трески [6].

При реализации проектов приливных электростанций разработчиками проводится экологический мониторинг окружающей среды. Так, в соответствии с требованиями разрешения на эксплуатацию, Marine Current Turbines Ltd. и его партнеры [1] проводили мониторинг окружающей среды для оценки воздействия проекта, в том числе: поведенческих изменений морских свиней, с использованием пассивной акустики (эхолокационных гидрофонов); изменения поведенческих скоплений с использованием телеметрических меток; изменения в присутствии морских млекопитающих и птиц с использованием наблюдений с берега; шума, генерируемого при работе и установке турбины; последствий для бентоса от физического присутствия устройства. Ввиду защиты популяции тюленей от возможного воздействия при эксплуатации турбины был принят план, осуществление которого шло в три этапа. В ходе первого этапа, с июня 2008 по август 2009, турбина работала в светлое время суток. Наблюдатель за морскими млекопитающими находился на вышке, выявляя тюленей, приближающихся к турбине, и инициировал отключение устройства, когда тюлень находился на определенном расстоянии. Изначально, расстояние, при котором турбина отключалась, составляло 200 м. После того, как возможность быстрого отключения была хорошо налажена (например, в течение нескольких секунд от работы на полном ходу до полной



остановки) расстояние на котором проходило выключение сократилось до 100 м в декабре 2008 года и до 50 м в апреле 2009 года. В течение этого периода, в качестве альтернативного инструмента для обнаружения тюленей в непосредственной близости от турбины был утвержден активный сканирующий сонар. На втором этапе, с августа 2009 года по апрель 2010, наблюдатель морских млекопитающих на вышке был заменен оператором активного сонара на берегу. В январе 2010, эксплуатационный период увеличился с пятидневной рабочей недели до семидневной рабочей недели. Третий этап начался в апреле 2010 года. Во время этого этапа работа была разрешена 24 часа в сутки, 7 дней в неделю. Расстояние, при котором происходило отключение, по сообщению активного гидролокатора, снизилось с 50 м до 30 м.

Проект RITE (Verdant Power, США) включал в себя обширный мониторинг окружающей среды, в частности использование гидроакустических антенн для мониторинга присутствия рыбы, ее распространенности, поведения, и потенциального взаимодействия с турбинами КНПС.

Требования разрешения на RITE проект включали определение риска удара для рыбы от массива турбин. С этой целью Verdant Power и ее консультантами было размещено четыре вида гидроакустической аппаратуры:

- фиксированный массив из 24 лучевых датчиков, обеспечивающих охват турбин и ближнего поля (до 12 диаметров ротора). С помощью данного метода нет возможности различить вид, только размер цели;

- установленные на корабле лучевые датчики, посылающие мобильные опросы в ближнее поле турбины. Также как и фиксированный массив, не дает возможности различить виды;

- фиксированный гидроакустический сонар (DIDSON) обеспечивающий охват турбины в непосредственной близости. Обеспечивает возможность классификации отдельных видов;

- гибридная система, закрепленная на корабле, состоящая из лучевых датчиков и сонара DIDSON развернутая для целенаправленного наблюдения конкретных видов в отдельности.

Так как это было первое исследование, посвященное потенциальной опасности для рыб, связанной с эксплуатацией гидрокинетической турбины, были сделаны некоторые важные выводы:

– использование фиксированного массива лучевых датчиков показало, что поведение рыбы зависит преимущественно от природных приливных течений, наличие вращающейся турбины действует как вторичный эффект. Была замечена активность рыб в медленной воде, когда машины не эксплуатировались, а также сравнительно малая активность во время отлива и прилива, когда машины работали;

– закрепленный на корабле гидроакустический лучевой датчик обеспечивает информацией о численности и распределении рыб на широком пространстве, но не обеспечивает достаточного временного или видового разрешения. С учетом стоимости наблюдений, используемых для оценки поведенческих изменений, данная система отклонена Verdant Power и контролирующими органами;

– сонары DIDSON показали эффективность для краткосрочного мониторинга за конкретными видами. С их помощью наблюдали один проход рыбы вокруг работающей турбины, вдоль гидродинамических линий тока. Тем не менее, стоимость операций с использованием этих приборов исключает что-либо, кроме краткосрочного, целевого развертывания.

Verdant Power также провели ряд исследований относящихся к гидродинамике, наличия и численности рыбы, подводного шума, качества воды и мест обитания бентоса. Существенных выводов получено не было из-за масштаба пилотного проекта по сравнению с существующей изменчивостью (естественных и техногенных) источников. Наблюдения, в которых периоды работы турбины противопоставлялись периодам, в которых турбина не работала, считались более продуктивными.

Таким образом, наряду с требованием эффективности преобразования приливной энергии стоит вопрос об обеспечении безопасности турбин по отношению к морским обитателям. Приливные электростанции вырабатывают малую относительно других источников энергии мощность, что в совокупности с высокой стоимостью строительства и, как следствие большим сроком окупаемости проекта

является препятствием для широкого распространения приливных электростанций.

По результатам проведенного анализа достоинств и недостатков технических решений при реализации существующих в настоящее время проектов по использованию приливной энергии и преобразованию ее в электрическую можно сделать вывод, что получение экологически чистой энергии требует тщательной проработки технических решений устройств путем усовершенствования технологии приливных генераторов энергии с целью повышения их эффективности, определения географического места расположения приливной электростанции (ПЭС) с оценкой воздействия на морских млекопитающих и рыб и рассмотрение работы ПЭС в составе энергосистемы, располагающей достаточной мощностью электростанций других типов.

#### **БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК:**

1. Environmental Effects of Tidal Energy Development // Proceedings of a Scientific Workshop / Editors Polagye B., Cleve B. V., Copping A., Kirkendall K. 2010, March 22-25.
2. **Polagye B., Previsic M.** Scenario Based Analysis of Environmental and Navigation Impacts: Tidal Power Scenario Descriptions // Technical Report to the U.S. Department of Energy by RE Vision Consulting. 2010. Sacramento, CA.
3. **Garrett C., Cummins P.** The efficiency of a turbine in a tidal channel // J. Fluid Mechanics. 2007. № 588. P. 243-251.
4. **Nasir Mehmood, Zhang Liang, Jawad Khan.** Harnessing Ocean Energy by Tidal Current Technologies // Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology. 2012. № 4(18). P. 3476-3487.
5. A Fisherwoman's Quest To Make Tidal Power Safe For Fish // Forbes. Green Tech. 2013. SEP 13.
6. URL: <http://zoologija-pozvonochnyh-konstantinov.odn.org.ua/B1744Part42-87.html>. (дата обращения 20.05.2016).

---

**POLETAEVA, Marina A.** – Krylov State Research Center, 196158, Moskovskoe shosse 44, *Saint-Petersburg, Russia*. E-mail: krylov@krylov.spb.ru.

**STETSYUK, Irina V.** – Krylov State Research Center, 196158, Moskovskoe shosse 44, *Saint-Petersburg, Russia*. E-mail: irene\_stetsuok@yahoo.com.

**KHRAPUNOV, Evgeniy F.** – Peter the Great Saint-Petersburg Polytechnic University. 195251, Politechnicheskaya St. 29, Saint-Petersburg, Russia. E-mail: office@spbstu.ru.

**THE TRANSFORMATION OF THE TIDES ENERGY INTO ELECTRICAL: THE ADVANTAGES AND DISADVANTAGES OF TECHNICAL SOLUTIONS**

*Currently interest in sources of energy, based on conversion of natural renewable resources: sun, wind, waves has increased in the world. The article discusses examples of technological solutions converters tidal energy into electrical energy, their advantages and disadvantages. Also considers the possible negative impact of tidal power plants on biological resources. Along with the requirement of conversion of tidal energy efficiency there is the question about the turbines security in relation to fish. According to the results of the analysis of the currently existing projects to use tidal energy and converting it into electrical concluded that the obtaining of clean energy requires careful consideration of technical solutions of devices by improving the technology of tidal energy generators to increase their efficiency, determine the geographic location of tidal power stations with the assessment of effects on marine mammals and fish, and review the work of the tidal power stations in the power grid, having sufficient capacity of power stations of other types.*

ECOLOGY; TIDAL POWER; ARCTIC SHELF; SAFETY

---