

Гидротехническое строительство

Обзорная статья

УДК 626

<http://doi.org/10.24866/2227-6858/2022-2/112-125>

Горкавцев П.С., Беккер А.Т., Шмыков А.А.

ГОРКАВЦЕВ ПАВЕЛ СЕРГЕЕВИЧ – магистрант, gorkavtcev.ps@students.dvfu.ru✉

БЕККЕР АЛЕКСАНДР ТЕВЬЕВИЧ – академик РААСН, д.т.н., профессор

ШМЫКОВ АЛЕКСЕЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ – научный сотрудник, старший преподаватель.

Департамент морских арктических технологий

Дальневосточный федеральный университет

Владивосток, Россия

Анализ технических решений установок, использующих энергию морских течений

Аннотация. Слаборазвитая инфраструктура отдаленных районов России делает актуальным развитие локальной энергетики, поскольку централизация энергоснабжения обширных территорий при малых потреблении становится невыгодной из-за потерь в ЛЭП. Возобновляемые источники энергии (ВИЭ) представляются одним из наиболее перспективных стратегических направлений развития локальной энергетики в удаленных регионах Арктики и Дальнего Востока России. В работе дан обзор подводных установок, трансформирующих механическую энергию морских течений в электрическую. Приводятся варианты классификации подводных установок течений различными авторами, общие технические параметры реализованных установок (в том числе прототипов). На основе выполненного обзора источников авторами сделан вывод о том, что подводные установки типа горизонтально-осевой турбины наиболее перспективны для разработки концепции подводной установки течений для условий континентального шельфа Охотского моря вокруг Курильских островов.

Ключевые слова: энергия течений, подводные установки, горизонтально осевые турбины, локальная энергетика, морская энергетика, возобновляемые источники энергии

Для цитирования: Горкавцев П.С., Беккер А.Т., Шмыков А.А. Анализ технических решений установок, использующих энергию морских течений // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. 2022. № 2(51). С. 112–125.

Введение

Около 20–25 млн человек в Российской Федерации проживают в районах, где отсутствует централизованное энергоснабжение. Они занимают около 65% территории РФ. В таких случаях преимущественно применяются дизельные электростанции (ДЭС), работающие, как правило, на транспортируемом на большие расстояния привозном топливе [17, 43]. Большое количество ДЭС затрудняет развитие населенных пунктов [30].

В качестве примера одного из альтернативных вариантов для решения проблемы по энергоснабжению удаленных регионов можно привести введенную в эксплуатацию в 2020 г. плавучую атомную теплоэлектростанция (ПАТЭС) «Академик Ломоносов», пришвартованную в порту г. Певек [44]. Ее выдача в номинальном режиме составляет примерно 60 МВт, что теоретически позволяет покрыть потребности в электроэнергии города с населением 100 000 человек. Стоимость проекта составила примерно 37 млрд рублей, а на реализацию потребовалось около 13 лет [45].

Альтернативой подобным грандиозным атомным проектам для удовлетворения потребности в электроэнергии удаленных малых населенных пунктов являются ВИЭ [43]. Крупные нефтегазовые компании вкладывают ресурсы в развитие подобных источников [17, 46].

В силу суровых гидрологических условий арктического и тихоокеанского континентальных шельфов, осложненных ледовым режимом и наличием морских приливных течений, перспективным видится использование морских установок, трансформирующих энергию морских течений в подводном исполнении.

Континентальные шельфы Курильских островов представляются перспективными для предварительного исследования параметров прототипов подводных установок течений в относительно благоприятных инфраструктурных условиях и дальнейших исследований в области использования энергии морских течений на основе выработанного технического решения. Полученный опыт можно будет экстраполировать на другие морские бассейны России.

Для разработки концептуального технического решения подводной установки энергии течений (ПУЭТ) авторами выполнен аналитический обзор технических решений. Обобщение и анализ технических решений ПУЭТ позволили выбрать ее прототип для концептуального проектирования и исследования энергетического потенциала акваторий при их использовании.

Технические решения для использования энергии морских течений

М. Nachtane обобщает опыт эксплуатации установок для использования энергии морских течений и приводит их классификацию [25]. Данная классификация схожа с классификацией, предлагаемой European Marine Energy Centre Ltd [47]. Авторы приводят следующие категории: горизонтально-осевые турбины, вертикально-осевые турбины, колеблющиеся подводные крылья (КПК), турбины в насадке (ТВН), винты Архимеда, приливные кайты (ПК) (*Horizontal-axis turbine, Vertical-axis turbine, Oscillating hydrofoil, Ducted turbine or enclosed tips, Archimedes' screw, Tidal kite*).

N. Laws делит установки на три категории [14], которые учитываются в работе М. Nachtane. Приведенные пункты классификации: системы продольного тока, системы поперечного тока, колебательные системы (*Axial-flow systems, Cross-flow systems, Oscillating systems*).

A. Roberts разделяет концепции на четыре категории: приливные турбины, колеблющиеся подводные крылья, приливные кайты и сооружения, основанные на разнице приливов [31]. Последние делятся на приливные плотины и приливные бассейны (*Tidal turbines, Oscillating hydrofoils, Tidal kites, Tidal range*). Tidal turbines включают в себя Axial-flow turbines, Cross-flow turbines, Ducted turbines. Tidal range разбиваются на Tidal barrages и Tidal lagoons.

W. Ibrahim [11], обобщая информацию о реализованных проектах установок для сбора гидрокинетической энергии, предлагает свою классификацию: горизонтально-осевые гидрокинетические турбины, вертикально-осевые гидрокинетические турбины, гидрокинетические турбины поперечного тока (ТПТ), турбины Вентури и гравитационные вихревые турбины, нетурбинные гидрокинетические системы (*Horizontal axis hydrokinetic turbines, Vertical axis hydrokinetic turbines, Cross-flow hydrokinetic turbines, Venturi and gravitational vortex turbine, non-turbine hydrokinetic systems*).

В данной работе будем придерживаться классификации, предложенной А. Roberts [31] (рис. 1), поскольку она (на наш взгляд) наиболее четко разграничивает концепции установок по принципу действия.

На основании ряда зарубежных источников был проведен анализ преимуществ и недостатков приведенных типов установок (табл. 1). Список развивающихся проектов для коммерческой генерации энергии представлен в источнике [48].

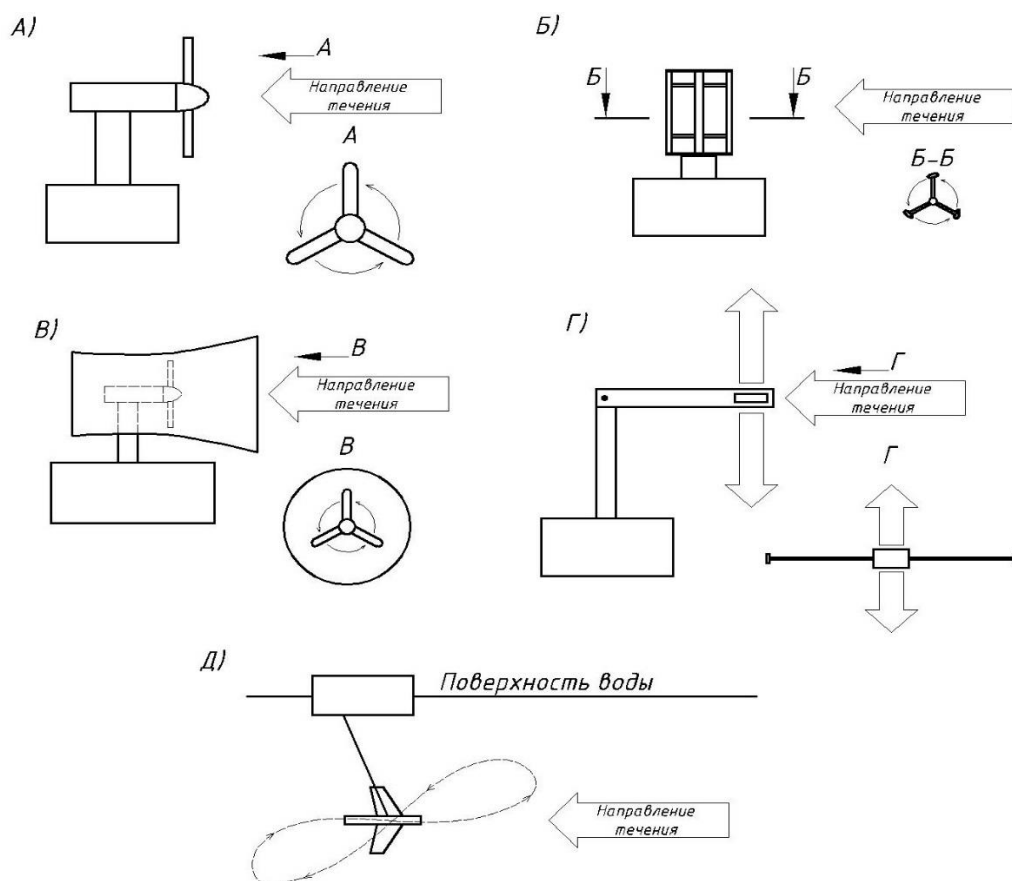


Рис. 1. Принципиальные схемы работы установок течений:
А – ГОТ; Б – ТПТ; В – ТВН; Г – ОПК; Д – ПК

Таблица 1

**Преимущества, недостатки, возможности и риски (ПНВР)
установок течений разных типов**

Концепция	ПНВР
ГОТ	П) Наиболее распространенные среди установок течений [25]; ЕМЕС рекомендует оценивать энергетический потенциал локации как для этой установки [20]. Наиболее экономичная конструкция при мощности установки более 500 кВт [25]
	Н) Круглая рабочая площадь (затрудняет проектирование установки для мелководья); подвержены механическому воздействию среды; необходимость предусматривать изменение направления течения; все агрегаты турбины находятся под водой (проблематично ремонтировать); шумовое загрязнение [8]
	В) КПД – 59,3% [31]; установки схожи с ветряными турбинами, поэтому есть возможность трансфера технологий [5, 19]
	Р) Снижение скорости потока; перенос наносов; вымывание грунта [8]
ТПТ	П) Проще в обслуживании, чем ГОТ; эффективны в низких скоростях потока [33]; не требуют тонкой настройки лопастей; вырабатывают немного больше энергии, чем ГОТ при тех же размерах; вертикально-осевая турбина “всепогодная”, отсутствует необходимость предусматривать изменение направления течения [31].
	Н) Лопастей сильнее подвержены обрастанию; воздействие на окружающую среду аналогично ГОТ [31]; весовой коэффициент в зависимости от мощности у турбин с вертикальной осью выше, чем у горизонтально-осевых [33]; плохая динамическая устойчивость; низкая способность к самозапуску [25]
	В) КПД – 64%; можно эффективнее применять на мелководье, поскольку прямоугольное сечение рабочей площади позволяет «масштабировать» установку; вертикально-осевые турбины имеют возможность вынести часть агрегатов над водой, что облегчает обслуживание [31]

Концепция	ПНВР
ОПК	Р) Имеют несколько типов, достоинства и недостатки зависят от применяемого типа (турбины Дарриуса, Горлова и др.) [31]
	П) Эффективны на мелководе [14–16, 31]; вырабатывают количество энергии, сопоставимое с ГОТ тех же размеров [31]. Воздействие на окружающую среду в процессе функционирования более безобидно [22]; эффективны при низких скоростях потока [25]
	Н) Сильнее подвержены усталостным разрушениям, с увеличением размера крыла ситуация усугубляется; потенциальная утечка гидравлических жидкостей усложняет обслуживание [31]
	В) Имеет более простую геометрию, поэтому дешевле проектировать и производить [31, 41]; благодаря прямоугольному «рабочему» сечению позволяют «масштабировать» установку для применения на мелководе [22, 31, 41, 42]
	Р) Воздействие на окружающую среду аналогично осевым турбинам, хотя возможность утечки гидравлических жидкостей делает такие установки менее экологичными по сравнению с осевыми турбинами [31]
ТвН	П) Ротор меньшего размера обеспечивает ту же выработку энергии; издают меньшее количество шума; менее подвержены обрастанию [31]; насадок защищает рабочее колесо от механических воздействий [1, 31]
	Н) Насадок усложняет «масштабирование» установки; влияние на поток более «разрушительно» по сравнению с ГОТ; изготовление и сборка ТвН более трудоемки; подобрать необходимую форму насадка – трудоемкая задача; сложнее в обслуживании, чем ГОТ [31]; большее лобовое сопротивление [1]; имеют более узкий диапазон эффективных скоростей течения [27]
	В) Возможность увеличивать скорость входа потока до требуемой [8]
	Р) Увеличение скорости входа влечет за собой большее количество об/мин и, как следствие, большее лобовое сопротивление и износ деталей [31]
ПК	П) Простое обслуживание за счет возможности открепить кайт от связи; эффективны в течениях с небольшими скоростями потока [31]; в экстремальных условиях может быть «притянут» за связь к основной конструкции [15]
	Н) Необходимость в сложной системе управления; подверженность материала деградации [29]; проблематично использовать на мелководе; увеличен риск столкновения с морскими организмами; большие закрытые зоны (для судоходства) в целях предотвращения столкновений с морским транспортом [31]
	В) Могут двигаться со скоростью, значительно превышающей скорость потока [31]
	Р) Недолговечны; мало изучено влияние турбулентных потоков на движение кайта и работу турбины кайта; не изучено влияние кайта на морских обитателей [29]

Примечательно, что European Marine Energy Centre LTD рекомендует использовать установки концепции ГОТ для выявления энергетического потенциала определенной локации [20]. Также стоит отметить, что концепция ГОТ является наиболее развитой среди остальных [25].

Анализ концепций использования энергии течений и выбор наиболее перспективной для использования в условиях шельфа Курильской гряды

В ходе анализа ряда источников были обобщены данные о технических характеристиках функционирующих установок. В таблицах 2–6 представлены характеристики установок различных классов, а на рисунках 2–6 в графическом виде изображены диапазоны значений технических характеристик коммерческих решений.

Таблица 2

Характеристики коммерческих горизонтально-осевых турбин

Параметры	HS1000	ATIR	Orbital O2	Мако	Seagen-S	M100-D	D10	Gen5	Atlantis AR1500
Номинальная мощность, кВт	1000	1500	2000	15	2000	100	1000	224	1500
Эксплуатационная глубина, м	35	40	44	10	38	55	55	10,00	40
Диаметр ротора, м	21	19	22	2	20	8,5	10	5	18
Номинальная скорость течения, м/с	2,8	2,9	2,5	2,8	2,5	2	4	4	3
Масса, т	280	350	680	0,35	60	206,8	450	-	150
Коэффициент мощности, C_p	0,26	0,42	0,33	0,42	0,45	0,43	0,39	0,35	0,48
Источники	[16, 40, 49]	[6, 7]	[8, 50, 51]	[52, 53]	[13, 24, 54]	[26, 39, 55, 56]	[32, 57, 58]	[2, 3, 59]	[31, 60]

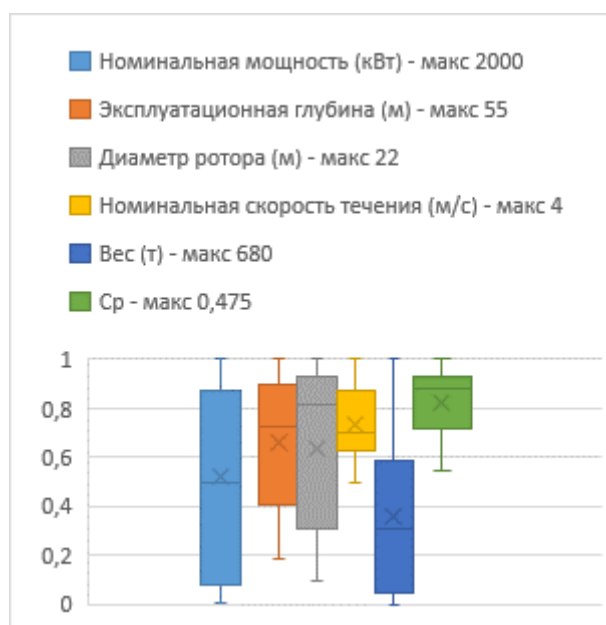


Рис. 2. Диапазоны характеристик горизонтально-осевых турбин

Диаграмма (рис. 2) позволяет примерно оценить распределение технических характеристик горизонтально-осевых турбин. При этом сложно судить о массе установок, поскольку в открытых источниках масса приведена по-разному. Например, у Seagen-S указана масса лишь рабочего агрегата, а масса 680 т у Orbital O2 учитывает всю конструкцию длиной 80 м.

Примечательно, что турбины Atlantis AR 1500 и Seagen-S разрабатывались для наиболее автономного функционирования, то есть для максимально длительной работы без вмешательства человека. В результате был достигнут интервал обслуживания в 6,25 лет [60]. Турбина Sabella D10 разрабатывалась для схожих целей, ее возможный интервал обслуживания достигает 7–10 лет [32]. Срок службы приведенных установок колеблется в пределах 20–25 лет. Длительный срок эксплуатации без технического обслуживания делает подобные установки перспективными для шельфа со слаборазвитой инфраструктурой.

В таблице 3 представлены характеристики опытных образцов турбин с поперечным потоком (ТППТ).

Таблица 3

Характеристики опытных образцов турбин с поперечным потоком

Параметры	Cao, Yu	Lee, Jiyong	Talukdar, Parag K.	Gao, Jin-jin	Ahmed Gharib Yosry
Диаметр, м	0,5	0,15	0,3	0,15	0,15
Высота, м	-	0,15	0,3	0,15	0,15
Глубина, м	5	0,29	-	0,3	0,5
Номинальная скорость течения, м/с	1,5	0,44	1,1	0,44	0,69
C_p	0,25	0,13	0,16	0,16	0,81
Источник	[4]	[19]	[37]	[9]	[10]

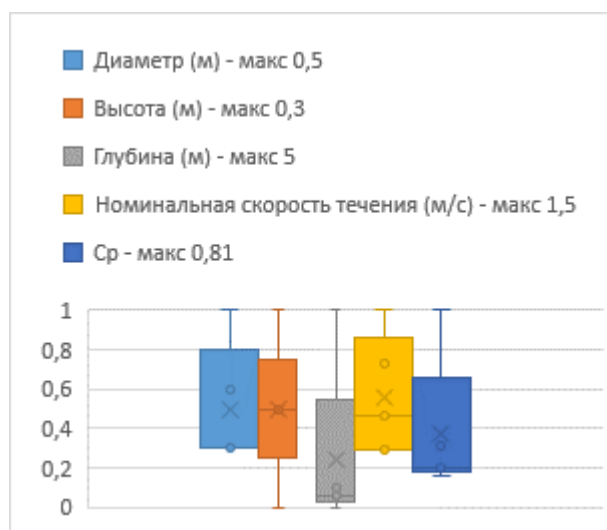


Рис. 3. Диапазоны характеристик турбин с поперечным потоком

Диаграмма (рис. 3) позволяет примерно оценить распределение технических характеристик турбин с поперечным потоком. На турбины поперечного тока губительно влияют высокие скорости потока. Как видно из табл. 3, при наиболее высоких скоростях потока функционирует установка Cao, Yu. Однако эта установка имеет относительно высокий коэффициент мощности. В целом коэффициенты ее мощности заметно меньше, чем у ГОТ. Это связано с тем, что представленные образцы являются опытными, то есть используются для исследований, а не коммерческой выработки энергии.

Характеристики ряда более старших образцов ТПТ представлены в обзоре [31]. Многие ТПТ разрабатываются для применения в реках и каналах. Спецификация одной из таких установок представлена в источнике [12].

На данный момент ведутся разнообразные исследования, направленные на оптимизацию таких сооружений. К примеру, в статье [9] приводится методика усовершенствования ротора вертикально-осевых турбин, а в источнике [23] приведен обзор трудов, посвященных оптимизации турбин Савониуса. В работе [38] исследуется влияние фиксаторов лопастей на эффективность установки.

Поскольку ТПТ имеют низкую способность к самозапуску [25] и сильнее подвержены обрастанию [31] (что тоже влияет на самозапуск), применение в условиях слаборазвитой инфраструктуры стоит под сомнением, поскольку смены направления приливного течения могут губительно повлиять на функционирование таких установок.

Ряд исследователей систематизировали информацию о некоторых коммерческих турбинах в насадке [31]. Параметры установок представлены в табл. 4. Из нее видно, что демонстратор OpenHydro, несмотря на большие габариты, имеет меньшую эффективность.

Это обусловлено несовершенством модели: она хоть и находится на последних стадиях разработки, не является готовым решением и требует доработки.

Таблица 4

Характеристики коммерческих турбин в насадке

Параметры	Clean current CC035B	Tidal Energy Pty Ltd DHV 170 kW	OpenHydro 200 kW demonstrator
Номинальная мощность (кВт)	65	170	200
Номинальная скорость потока (м/с)	3	3	2,5
Диаметр ротора (м)	3,5	5	10
C_p	0,23	0,29	0,16



Рис. 4. Диапазоны характеристик турбин в насадке

Диаграмма (рис. 4) позволяет примерно оценить распределение технических характеристик турбин в насадке.

Рассмотренные решения предназначены для работы в высоких скоростях потока, но все эти турбины имеют относительно низкий коэффициент мощности.

Систематический обзор турбин концепции ТвН представлен в источнике [27], где освещаются вопросы оптимизации установок, оценки эффективности, описываются наиболее эффективные устройства этого типа.

Поскольку насадок затрудняет обслуживание, а трудоемкость проектирования таких систем больше, чем ГОТ [31], концепция ТвН кажется менее подходящей для использования на российском шельфе, поскольку создать надежное автономное технологически простое решение сложнее, чем установки концепции ГОТ.

В таблице 5 приведены данные об экспериментальных образцах осциллирующих подводных крыльев.

Таблица 5

Характеристики опытных образцов осциллирующих подводных крыльев

Параметры	Liu, Zhen	Yunxing Su	Daegyoun Kim		
Номинальная скорость потока, м/с	0,6	0,5	0,5		
Глубина, м	0,54	0,6	0,57		
Ширина лопастей, м	0,4	0,45	0,25	0,35	0,45
C_p	0,33	0,5	0,34	0,35	0,38
Источник	[21]	[34]	[14]		

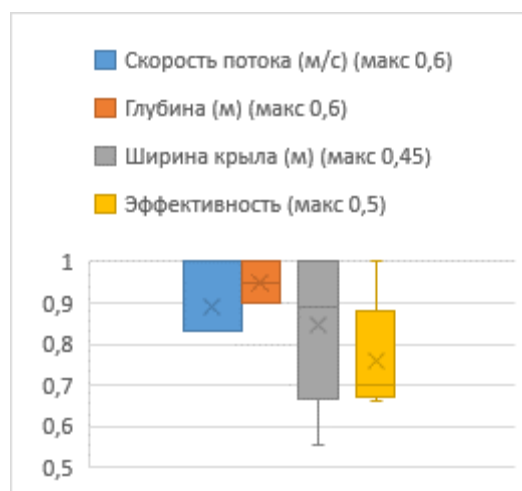


Рис. 5. Диапазон характеристик осциллирующих подводных крыльев

Диаграмма (рис. 5) позволяет примерно оценить распределение технических характеристик осциллирующих подводных крыльев. Рассмотренные установки предназначены для низких скоростей потока и имеют достаточно высокую эффективность. Характеристики ряда других, более ранних образцов этой концепции, представлены в обзоре [31].

Данная концепция в силу своей простоты и эффективности в слабых течениях кажется применимой в условиях слаборазвитой инфраструктуры. Помехой является то, что в открытом доступе немного информации о таких установках, направленных на коммерческую выработку энергии.

Попытка сделать установку, действующую по принципу ОПК, предпринималась в Австралии. Инженерами был создан прототип мощностью 250 кВт при скорости течения 2,7 м/с, результаты исследования планировалось использовать для дальнейшего развития с возможностью увеличения мощности до 1 МВт [15].

Ведутся исследования в целях усовершенствования решений по ОПК. Например, в работе [36] исследуются характеристики ОПК с усовершенствованными лопастями, а в работе [5] рассматриваются эксплуатационные характеристики ОПК в суживающемся канале в зависимости от изменения геометрии его стенок.

В таблице 6 приведены технические характеристики коммерческих приливных кайтов (Спецификации Minesto Deep Green) [28].

Диаграмма (рис. 6) позволяет примерно оценить распределение технических характеристик приливных кайтов Minesto.

Кайты требуют размещения в более глубоких местах, нежели установки других концептуальных схем. Сочетание специфики рабочего движения, наличия в акватории плавучих льдов, сложности навигационного режима заставляет сомневаться в возможности эффективной реализации такого проекта на Российском шельфе. Кроме того, сама по себе концепция технологически сложна, поэтому на данном этапе не подходит для использования в качестве наиболее надежного автономного решения в условиях неразвитой инфраструктуры континентального шельфа Арктических и Дальневосточных морей.

Таблица 6

Характеристики приливных кайтов Minesto Deep Green

Параметры	DG-8	DG-10	DG-12	DG-14
Номинальная мощность, кВт	110	220	500	850
Номинальная скорость потока, м/с	1,3	1,4	1,6	1,73
Макс. эксплуатационная глубина, м	65	80	100	120
Вес, т	2	4	7	11
Ср (макс. 0,31)	0,28	0,29	0,3	0,31

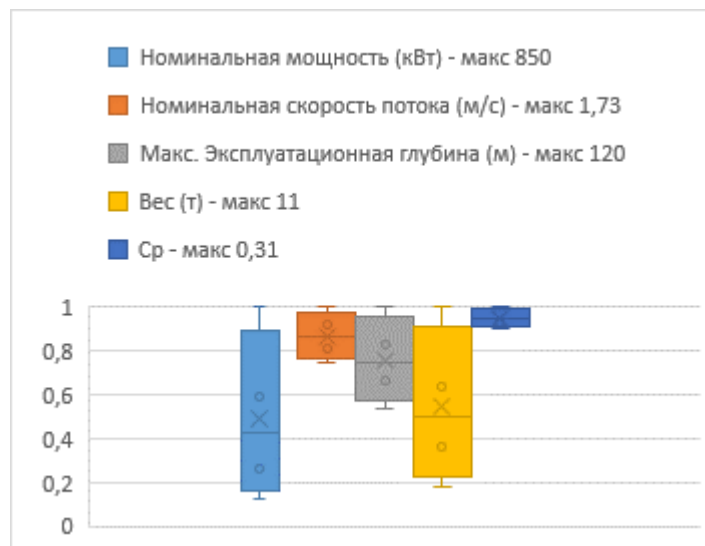


Рис. 6. Диапазоны характеристик приливных кайтов Minesto

Закключение

Таким образом, в настоящее время применяются несколько параллельно развивающихся концепций для реализации ПУЭТ. Из всех рассмотренных вариантов ГОТ являются наиболее проработанным техническим решением и демонстрируют наибольшую эффективность среди коммерческих установок.

ГОТ обладает следующими преимуществами: относительно высокие коэффициенты мощности, более простое обслуживание и относительно простая конструкция, а также наибольшее количество коммерчески реализованных образцов. Ограничивает применение этого технического решения только мелководье, так как эффективное применение достигается при глубине более 10 м.

Заявленный вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Ali J., Khan J., Khalid M.S., Mehmood N. Harnessing marine energy by horizontal axis marine turbines. *Proceedings of 12th International Bhurban Conference on Applied Sciences and Technology, IBCAST 2015*. 2015. С. 495–502.
2. Anchor coalition Water-Energy Nexus: From New York to Victoria Falls. 2017.
3. Bevelhimer M., Mohamed M.R., Ismail R.M.T.R., Leung P.K., Xing W.W., Shah A.A. Informing a Tidal Turbine Strike Probability Model through Characterization of Fish Behavioral Response using Multibeam Sonar Output. 2016.
4. Cao Y., Liu A., Yu X., Liu Z., Tang X., Wang S. Experimental tests and CFD simulations of a horizontal wave flow turbine under the joint waves and currents. *Ocean Engineering*. 2021;(237).
5. Dahmani F., Sohn C. H. Effect of convergent duct geometry on the energy extraction performance of tandem oscillating hydrofoils system. *J. of Fluids and Structures*. 2020;(95): 102949.
6. Díaz-Dorado E. Carrillo C., Cidras J., Román D., Grande J. Performance evaluation and modelling of the Atir marine current turbine. *IET Renewable Power Generation*. 2021;(4): 821–838.
7. EMEC Magallanes ATIR Project Information Summary. 2020.
8. EMEC Orbital Marine Power Orbital O2. 2 Tidal Turbine Project Information Document. 2021.
9. Gao J. Liu H., Lee J., Zheng Y., Guala M., Shen L. Large-eddy simulation and Co-Design strategy for a drag-type vertical axis hydrokinetic turbine in open channel flows. *Renewable Energy*. 2021;(181):1305–1316.
10. Gharib Yosry A., Fernández-Jiménez A., Álvarez-Álvarez A., Blanco Marigorta E. Design and characterization of a vertical-axis micro tidal turbine for low velocity scenarios. *Energy Conversion and Management*. 2021;237:114144.

11. Ibrahim W., Mohamed M., Ismail R. M.T.R., Leung P., Xing W., Shah A. Hydrokinetic energy harnessing technologies: A review. *Energy Reports*. 2021;7:2021–2042.
12. Instream Energy Systems 25 kW Hydrokinetic Turbine. Brochure.
13. Jackson D., Persoons T. Feasibility study and cost-benefit analysis of tidal energy: A case study for Ireland. Proceedings of the 4th International Conference on Ocean Energy (ICOE), October 17-19, 2012, Dublin, Ireland. 2012.
14. Kim D., Strom B. Mandre S. Breuer K. Energy harvesting performance and flow structure of an oscillating hydrofoil with finite span. *J. of Fluids and Structures*. 2017;70:314–326.
15. Kloos G., Gonzalez C. a, Finnigan T. D. The bioSTREAM TM tidal current energy converter. *Eur. Wave Tidal Conf. Proc.* Uppsala, Sweden, 2009. P. 426–433.
16. Ko D. H., Park J. S., Lee K. S. Assessment of Tidal Current Energy Potential at Uldolmok in the Southwestern Coast of Korea. *J. of Coastal Research*. 2018;(85):1301–1305.
17. KPMG. Возобновляемые источники энергии как новый шаг развития для нефтегазовых компаний: Отчет. 2019. URL: <https://assets.kpmg/content/dam/kpmg/ru/pdf/2019/12/ru-ru-renewable-energy-sources-for-oil-and-gas.pdf>
18. Laws N., Epps B. Hydrokinetic energy conversion: Technology, research, and outlook. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2016;(57):1245–1259.
19. Lee J., Musa M., Feist C., Gao J., Shen L., Guala M. Wake characteristics and power performance of a drag-driven in-bank vertical axis hydrokinetic turbine. *Energies*. 2019;12(19):3611. doi: 10.3390/en12193611
20. Legrand C. Assessment of Tidal Energy Resource / European Marine Energy Centre. UK, London, 2009. 60 p.
21. Liu Z., Qu H., Shi H. Energy-harvesting performance of a coupled-pitching hydrofoil under the semi-passive mode. *Applied Energy*. 2020;(267):114889.
22. Ma P., Yang Z., Wang Y., Liu H., Xie Y. Energy extraction and hydrodynamic behavior analysis by an oscillating hydrofoil device. *Renewable Energy*. 2017;(113):648–659.
23. Maldar N. R., Ng C. Y., Oguz E. A review of the optimization studies for Savonius turbine considering hydrokinetic applications. *Energy Conversion and Management*. 2020;(226): 1–28.
24. Marine Current Turbines – SeaGen Development. RPS Group. 2009.
25. Nachtane M. Tarfaoui M. Goda I., Rouway M. A review on the technologies, design considerations and numerical models of tidal current turbines. *Renewable Energy*. 2020;157:1274–1288.
26. Nova Innovation. URL: <https://www.novainnovation.com>
27. Nunes M. M., Brasil Junior A. C. P., Oliveira T. F. Systematic review of diffuser-augmented horizontal-axis turbines. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2020;(13):1-22.
28. O’Driscoll B. Ecological hazard identification of the Minesto ‘deep green commercial’ tidal stream turbine. Chalmers University of Technology, 2012. URL: <https://odr.chalmers.se/handle/20.500.12380/154980>
29. Olinger D. J., Wang Y. Hydrokinetic energy harvesting using tethered undersea kites. *J. of Renewable and Sustainable Energy*. 2015;(4).
30. Potravnyi I., Yashalova N., Boroukhin D., Tolstoukhova M. The Usage of Renewable Energy Sources in the Arctic: The Role of Public-Private Partnership. Economic and Social Changes: Facts, Trends, Forecast. 2020;13(1):144–159.
31. Roberts A., Thomas B., Sewell P. Khan Z., Balmain S. Gillman J. Current tidal power technologies and their suitability for applications in coastal and marine areas. *J. of Ocean Engineering and Marine Energy*. 2016;(2):227–245.
32. Sabella. Ushant showcase of tidal energy worldwide. URL: https://www.sabella.bzh/sites/default/files/upload/plaquettes/leaflet_d10_-_12_pages.pdf
33. Seo J., Yi J., Park J., Lee K. Review of tidal characteristics of Uldolmok Strait and optimal design of blade shape for horizontal axis tidal current turbines. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2019;113:109273. doi: 10.1016/j.rser.2019.109273
34. Su Y., Miller M., Mandre S., Breuer K. Confinement effects on energy harvesting by a heaving and pitching hydrofoil. *J. of Fluids and Structures*. 2019;84:233–242.
35. Sun G. Wang Y., Xie Y. Lv K. Sheng R. Research on the effect of a movable gurney flap on energy extraction of oscillating hydrofoil. *Energy*. 2021;225:120206. doi: 10.1016/j.energy.2021.120206
36. Sun G., Wang Y., Xie Y., Ma P., Zhang Y. Hydrodynamic and energy extraction properties of oscillating hydrofoils with a trailing edge flap. *Applied Ocean Research*. 2021;110:102530. doi: 10.1016/j.apor.2021.102530

37. Talukdar P., Kulkarni V., Dehingia D., Saha U. Evaluation of a model helical bladed hydrokinetic turbine characteristics from in-situ experiments. ASME 2017 11th International Conference on Energy Sustainability, June 26–30, 2017, Charlotte, North Carolina, USA. 2017. Article ID: V001T07A005. doi: 10.1115/ES2017-3490
38. Villeneuve T., Winckelmans G., Dumas G. Increasing the efficiency of vertical-axis turbines through improved blade support structures. *Renewable Energy*. 2021;(169):1386–1401.
39. Wills T. Construction Method Statement. Shetland Tidal Array. 2016.
40. Xodus group. HS1000 1 MW Tidal Turbine at EMEC: Supporting Documentation. 2010.
41. Xu J., Sun H. Fluid dynamics analysis of passive oscillating hydrofoils for tidal current energy extracting. 2015 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA). 2015. P. 2017-2022. doi: 10.1109/ICMA.2015.7237796
42. Xu J., Tan S., Guan D., Ali R., Zhang L. Energy extraction performance of motion-constrained tandem oscillating hydrofoils. *J. of Renewable and Sustainable Energy*. 2017;(4):1-10.
43. Энергоснабжение Арктики: малый атом и ВИЭ. URL: <https://peretok.ru/articles/strategy/15052/> (дата обращения: 28.11.2021).
44. Развитие и инновации. URL: <https://www.rosenergoatom.ru/development/innovatsionnye-razrabotki/razrabotka-proektov-aes-s-reaktorami-novogo-pokoleniya/plavuchie-atomnye-teploelektrstantsii-pates/> (дата обращения: 03.11.2021).
45. Академик Ломоносов. Википедия. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Академик_Ломоносов#Стоимость_проекта (дата обращения: 31.08.2021).
46. Международные нефтяные компании и энергетическая трансформация. URL: <https://in.minenergo.gov.ru/analytics/mezhdunarodnye-neftyanye-kompanii-i-energetiches-kaya-transformatsiya> (дата обращения: 28.11.2021).
47. Tidal devices : EMEC: European Marine Energy Centre. URL: <http://www.emec.org.uk/marine-energy/tidal-devices/> – 01.09.2021.
48. Tidal developers : EMEC: European Marine Energy Centre. URL: <https://www.emec.org.uk/marine-energy/tidal-developers/> – 04.11.2021).
49. Andritz Hydro Hammerfest. Renewable energy from tidal currents. URL: <https://www.andritz.com/resource/blob/31444/cf15d27bc23fd59db125229506ec87c7/hy-hammerfest-data.pdf>
50. Press release: Orbital O2 tidal turbine arrives in Orkney: EMEC: European Marine Energy Centre. URL: <https://www.emec.org.uk/press-release-orbital-o2-tidal-turbine-arrives-in-orkney/> – 15.10.2021.
51. Orbital O2: The world's most powerful tidal turbine. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=4d9zs0W9u2A> – 04.11.2021.
52. Mako Energy Tidal Turbines. URL: <https://www.mako.energy/archived-customers> – 03.11.2021.
53. MAKO ENERGY – Brochure. URL: <https://drive.google.com/file/d/1RhDOVIRYz5mPIIE3PNcW-sKaw8gGH1CrL/view> – 03.11.2021.
54. SeaGen S 1.2 MW tidal turbine – Offshore Energy. URL: <https://www.offshore-energy.biz/video-sea-gen-s-1-2-mw-tidal-turbine/> – 03.11.2021.
55. Products – Nova Innovation. URL: <https://www.novainnovation.com/products/> – 03.11.2021.
56. Nova M100-D – Nova Innovation Ltd | Lincup. URL: <https://www.lincup.com/device/10814/tidal-turbines-nova-m100-d> – 03.11.2021.
57. D10 | Sabella. URL: <https://www.sabella.bzh/en/projects/d10> – 03.11.2021.
58. Case Study 6: Reducing environmental impact due to increased reliability. URL: <https://realtide.eu/news/20210311/case-study-6-reducing-environmental-impact-due-increased-reliability> – 03.11.2021.
59. Verdant Power | Technology. URL: <https://www.verdantpower.com/technology> – 03.11.2021.
60. AR1500 Tidal Turbine. URL: <https://simecatlantis.com/wp-content/uploads/2016/08/AR1500-Brochure-Final-1.pdf> – 03.11.2021).

Review article

<http://doi.org/10.24866/2227-6858/2022-2/112-125>

Gorkavtsev P., Bekker A., Shmykov A.

PAVEL S. GORKAVTSEV, Master's Student, gorkavtcev.ps@students.dvfu.ru

ALEKSANDER T. BEKKER, Academician of RAACS, Dr. of Engineering, Professor

ALEKSEY A. SHMYKOV, Research Engineer, Senior Lecturer.

Department of Marine Arctic Technologies

Fat Eastern Federal University

Vladivostok, Russia

Engineering decisions for marine current installations

Abstract. The underdeveloped infrastructure of Russia's remote regions makes the development of local energy relevant, since the centralization of power supply of vast territories with small consumption becomes unprofitable due to losses in power lines. Renewable energy sources (RES) appear to be one of the most promising strategic directions of local energy development in remote regions of the Arctic and the Russian Far East. The paper presents an overview of underwater installations which transform the mechanical energy of sea currents into electric energy. The article provides some variants of classification of underwater current installations by different authors, general technical parameters of the implemented installations (including prototypes). Based on the review of the sources, the authors have made a conclusion that underwater installations of horizontal axis turbine (HAT) type have the best prospects to develop underwater current installation on the continental shelf of the Sea of Okhotsk around the Kuril Islands.

Keywords: current energy, GOT, local energy, marine energy, RES

For citation: Gorkavtsev P., Bekker A., Shmykov A. Engineering decisions for marine current installations. FEFU: School of Engineering Bulletin. 2022;(2):112-125. (In Russ.).

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

The authors declare no conflicts of interests.

REFERENCES

1. Ali J., Khan J., Khalid M.S., Mehmood N. Harnessing marine energy by horizontal axis marine turbines. Proceedings of 12th International Bhurban Conference on Applied Sciences and Technology, IBCAST 2015. 2015. P. 495–502.
2. Anchor coalition Water-Energy Nexus: From New York to Victoria Falls. 2017.
3. Bevelhimer M., Mohamed M. R., Ismail R. M.T.R., Leung P. K., Xing W. W., Shah A. A. Informing a Tidal Turbine Strike Probability Model through Characterization of Fish Behavioral Response using Multibeam Sonar Output. 2016.
4. Cao Y., Liu A., Yu X., Liu Z., Tang X., Wang S. Experimental tests and CFD simulations of a horizontal wave flow turbine under the joint waves and currents. *Ocean Engineering*. 2021;(237).
5. Dahmani F., Sohn C. H. Effect of convergent duct geometry on the energy extraction performance of tandem oscillating hydrofoils system. *J. of Fluids and Structures*. 2020;(95): 102949.
6. Díaz-Dorado E. Carrillo C., Cidras J., Román D., Grande J. Performance evaluation and modelling of the Atir marine current turbine. *IET Renewable Power Generation*. 2021;(4): 821–838.
7. EMEc Magallanes ATIR Project Information Summary. 2020.
8. EMEc Orbital Marine Power Orbital O2. 2 Tidal Turbine Project Information Document. 2021.
9. Gao J. Liu H., Lee J., Zheng Y., Guala M., Shen L. Large-eddy simulation and Co-Design strategy for a drag-type vertical axis hydrokinetic turbine in open channel flows. *Renewable Energy*. 2021;(181):1305–1316.
10. Gharib Yosry A., Fernández-Jiménez A., Álvarez-Álvarez A., Blanco Marigorta E. Design and characterization of a vertical-axis micro tidal turbine for low velocity scenarios. *Energy Conversion and Management*. 2021;237:114144.

11. Ibrahim W., Mohamed M., Ismail R. M.T.R., Leung P., Xing W., Shah A. Hydrokinetic energy harnessing technologies: A review. *Energy Reports*. 2021;7:2021–2042.
12. Instream Energy Systems 25 kW Hydrokinetic Turbine - Brochure.
13. Jackson D., Persoons T. Feasibility study and cost-benefit analysis of tidal energy: A case study for Ireland. Proceedings of the 4th International Conference on Ocean Energy (ICOE), October 17-19, 2012, Dublin, Ireland. 2012.
14. Kim D., Strom B. Mandre S. Breuer K. Energy harvesting performance and flow structure of an oscillating hydrofoil with finite span. *J. of Fluids and Structures*. 2017;70:314–326.
15. Kloos G., Gonzalez C. a, Finnigan T. D. The bioSTREAM TM tidal current energy converter. *Eur. Wave Tidal Conf. Proc.* Uppsala, Sweden, 2009. P. 426–433.
16. Ko D. H., Park J. S., Lee K. S. Assessment of Tidal Current Energy Potential at Uldolmok in the Southwestern Coast of Korea. *J. of Coastal Research*. 2018;(85):1301–1305.
17. KPMG. Renewable energy as a new development step for oil and gas companies. Report. 2019. URL: <https://assets.kpmg/content/dam/kpmg/ru/pdf/2019/12/ru-ru-renewable-energy-sources-for-oil-and-gas.pdf>
18. Laws N., Epps B. Hydrokinetic energy conversion: Technology, research, and outlook. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2016;(57):1245–1259.
19. Lee J., Musa M., Feist C., Gao J., Shen L., Guala M. Wake characteristics and power performance of a drag-driven in-bank vertical axis hydrokinetic turbine. *Energies*. 2019;12(19):3611. doi: 10.3390/en12193611
20. Legrand C. Assessment of Tidal Energy Resource / European Marine Energy Centre. UK, London, 2009. 60 p.
21. Liu Z., Qu H., Shi H. Energy-harvesting performance of a coupled-pitching hydrofoil under the semi-passive mode. *Applied Energy*. 2020;(267):114889.
22. Ma P., Yang Z., Wang Y., Liu H., Xie Y. Energy extraction and hydrodynamic behavior analysis by an oscillating hydrofoil device. *Renewable Energy*. 2017;(113):648–659.
23. Maldar N. R., Ng C. Y., Oguz E. A review of the optimization studies for Savonius turbine considering hydrokinetic applications. *Energy Conversion and Management*. 2020;(226): 1–28.
24. Marine Current Turbines – SeaGen Development. RPS Group. 2009.
25. Nachtane M. Tarfaoui M. Goda I., Rouway M. A review on the technologies, design considerations and numerical models of tidal current turbines. *Renewable Energy*. 2020;157:1274–1288.
26. Nova Innovation. URL: <https://www.novainnovation.com>
27. Nunes M. M., Brasil Junior A. C. P., Oliveira T. F. Systematic review of diffuser-augmented horizontal-axis turbines. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2020;(13):1–22.
28. O'Driscoll B. Ecological hazard identification of the Minesto 'deep green commercial' tidal stream turbine. Chalmers University of Technology, 2012. URL: <https://odr.chalmers.se/handle/20.500.12380/154980>
29. Olinger D. J., Wang Y. Hydrokinetic energy harvesting using tethered undersea kites. *J. of Renewable and Sustainable Energy*. 2015;(4).
30. Potravnyi I., Yashalova N., Boroukhin D., Tolstoukhova M. The Usage of Renewable Energy Sources in the Arctic: The Role of Public-Private Partnership. Economic and Social Changes: Facts, Trends, Forecast. 2020;13(1):144–159.
31. Roberts A., Thomas B., Sewell P. Khan Z., Balmain S. Gillman J. Current tidal power technologies and their suitability for applications in coastal and marine areas. *J. of Ocean Engineering and Marine Energy*. 2016;(2):227–245.
32. Sabella. Ushant showcase of tidal energy worldwide. URL: https://www.sabella.bzh/sites/default/files/upload/plaquettes/leaflet_d10_-_12_pages.pdf
33. Seo J., Yi J., Park J., Lee K. Review of tidal characteristics of Uldolmok Strait and optimal design of blade shape for horizontal axis tidal current turbines. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2019;113:109273. doi: 10.1016/j.rser.2019.109273
34. Su Y., Miller M., Mandre S., Breuer K. Confinement effects on energy harvesting by a heaving and pitching hydrofoil. *J. of Fluids and Structures*. 2019;84:233–242.
35. Sun G. Wang Y., Xie Y. Lv K. Sheng R. Research on the effect of a movable gurney flap on energy extraction of oscillating hydrofoil. *Energy*. 2021;225:120206. doi: 10.1016/j.energy.2021.120206
36. Sun G., Wang Y., Xie Y., Ma P., Zhang Y. Hydrodynamic and energy extraction properties of oscillating hydrofoils with a trailing edge flap. *Applied Ocean Research*. 2021;110:102530. doi: 10.1016/j.apor.2021.102530

37. Talukdar P., Kulkarni V., Dehingia D., Saha U. Evaluation of a model helical bladed hydrokinetic turbine characteristics from in-situ experiments. ASME 2017 11th International Conference on Energy Sustainability, June 26–30, 2017, Charlotte, North Carolina, USA. 2017. Article ID: V001T07A005. doi: 10.1115/ES2017-3490
38. Villeneuve T., Winckelmans G., Dumas G. Increasing the efficiency of vertical-axis turbines through improved blade support structures. *Renewable Energy*. 2021;(169):1386–1401.
39. Wills T. Construction Method Statement. Shetland Tidal Array. 2016.
40. Xodus group. HS1000 1 MW Tidal Turbine at EMEC: Supporting Documentation. 2010.
41. Xu J., Sun H. Fluid dynamics analysis of passive oscillating hydrofoils for tidal current energy extracting. 2015 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA). 2015. P. 2017-2022. doi: 10.1109/ICMA.2015.7237796
42. Xu J., Tan S., Guan D., Ali R., Zhang L. Energy extraction performance of motion-constrained tandem oscillating hydrofoils. *J. of Renewable and Sustainable Energy*. 2017;(4):1-10.
43. Arctic energy supply: small atom and renewable energy. URL: <https://peretok.ru/articles/strategy/15052/> – 28.11.2021.
44. Development and innovation. URL: <https://www.rosenergoatom.ru/development/innovatsionnye-razrabotki/razrabotka-proektov-aes-s-reaktorami-novogo-pokoleniya/plavuchie-atomnye-teploel-ektrostantsii-pates/> – 03.11.2021.
45. Akademik Lomonosov. Wikipedia. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Академик_Ломоносов#Стоимость_проекта – 31.08.2021.
46. International oil companies and energy transformation. URL: <https://in.minenergo.gov.ru/analitics/mezhdunarodnye-neftnyanye-kompanii-i-energetiches-kaya-transformatsiya> – 28.11.2021.
47. Tidal devices: EMEC: European Marine Energy Centre. URL: <http://www.emec.org.uk/marine-energy/tidal-devices/> – 01.09.2021.
48. Tidal developers: EMEC: European Marine Energy Centre. URL: <https://www.emec.org.uk/marine-energy/tidal-developers/> – 04.11.2021.
49. Andritz Hydro Hammerfest. Renewable energy from tidal currents. URL: <https://www.andritz.com/resource/blob/31444/cf15d27bc23fd59db125229506ec87c7/hy-hammerfest-data.pdf>
50. Press release: Orbital O2 tidal turbine arrives in Orkney: EMEC: European Marine Energy Centre. URL: <https://www.emec.org.uk/press-release-orbital-o2-tidal-turbine-arrives-in-orkney/> – 15.10.2021.
51. Orbital O2: The world's most powerful tidal turbine. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=4d9zs0W9u2A> – 04.11.2021.
52. Mako Energy Tidal Turbines. URL: <https://www.mako.energy/archived-customers> – 03.11.2021.
53. MAKO ENERGY – Brochure. URL: <https://drive.google.com/file/d/1RhDOVIRYz5mPIIE3PNcW-sKaw8gGH1CrL/view> – 03.11.2021.
54. SeaGen S 1.2 MW tidal turbine – Offshore Energy. URL: <https://www.offshore-energy.biz/video-sea-gen-s-1-2-mw-tidal-turbine/> – 03.11.2021.
55. Products – Nova Innovation. URL: <https://www.novainnovation.com/products/> – 03.11.2021.
56. Nova M100-D – Nova Innovation Ltd | Lincup. URL: <https://www.lincup.com/device/10814/tidal-turbines-nova-m100-d> – 03.11.2021.
57. D10 | Sabella. URL: <https://www.sabella.bzh/en/projects/d10> – 03.11.2021.
58. Case Study 6: Reducing environmental impact due to increased reliability. URL: <https://realtide.eu/news/20210311/case-study-6-reducing-environmental-impact-due-increased-reliability> – 03.11.2021.
59. Verdant Power | Technology. URL: <https://www.verdantpower.com/technology> – 03.11.2021.
60. AR1500 Tidal Turbine. URL: <https://simecatlantis.com/wp-content/uploads/2016/08/AR1500-Brochure-Final-1.pdf> – 03.11.2021.