

Обзор энергетических технологий для необитаемых подводных аппаратов

Пересказ публикации авторов: Чжихао Линь, Дэнхуэй Цинь, Цяогао Хуан, Хуншэн Дун и Гуан Пань, Северо-Западный политехнический университет, Сиань, Китай. Источник:

<https://doi.org/10.3390/en19030592>

Аннотация

Автономные необитаемые подводные аппараты (АНПА) играют всё более важную роль в качестве ключевых платформ для длительного исследования океана, морских съёмок и стационарного наблюдения. Однако в экстремальных глубоководных условиях их энергетические системы сталкиваются с серьёзными ограничениями, обусловленными гидростатическим давлением и термодинамическими противоречиями в стеснённых объёмах. В связи с этим первостепенное значение приобретает разработка безопасных энергетических технологий высокого давления с высокой удельной энергией.

В данной работе представлен всесторонний обзор проблем многофизического сопряжения в глубоководных энергетических системах и анализ современных исследований основных энергоустановок. Существующие технологии классифицированы по четырём категориям (по источнику энергии и принципам преобразования) с детальной оценкой их характеристик и ограничений в условиях больших глубин. В заключение обозначены основные направления развития глубоководных энергетических систем для использования в качестве справочной информации при дальнейших исследованиях.

Ключевые слова: автономные необитаемые подводные аппараты; энергетические системы; многофизическое сопряжение; структурно-энергетическая интеграция; подводный энергетический интернет.

1. Введение

Океан, покрывающий 70,8% поверхности Земли, является критически важной частью экосистемы планеты и содержит огромные биологические и минеральные ресурсы. Он представляет собой новый рубеж для человечества в решении проблем ресурсодефицита, изменения климата и обеспечения национальной безопасности. Для эффективного изучения этой сложной среды широкое применение нашли различные подводные аппараты - обитаемые, телеуправляемые (ТНПА) и автономные (АНПА), используемые для экологического мониторинга, картографирования рельефа дна и обслуживания инфраструктуры. [1,2].

В рамках современной концепции «умного океана» АНПА как основные платформы для глубоководных операций претерпевают парадигмальную трансформацию: от раннего режима кратковременных прибрежных одиночных съёмок (например, экспериментальное применение аппарата SPURV в 1957 году) к сложным всеглубинным, трансокеанским и кластерным миссиям. [3].

Сегодня АНПА рассматриваются не просто как расходимые средства обнаружения, а как интеллектуальные узлы, способные к длительному функционированию непосредственно в среде. [4,5]. При выполнении задач инспекции подводных трубопроводов, поиска бортовых самописцев или мониторинга гидротермальных источников на срединно-океанических хребтах аппараты должны

работать непрерывно неделями и месяцами. Это требование пролонгированных миссий в сочетании с интеграцией мощных нагрузок (гидролокаторов с синтезированной апертурой, манипуляторов) обостряет конфликт между энергоснабжением и потреблением.

На рисунке 1 показано внутреннее устройство АНПА и перечислены три различные энергетические системы, которые могут использоваться для его энергоснабжения.

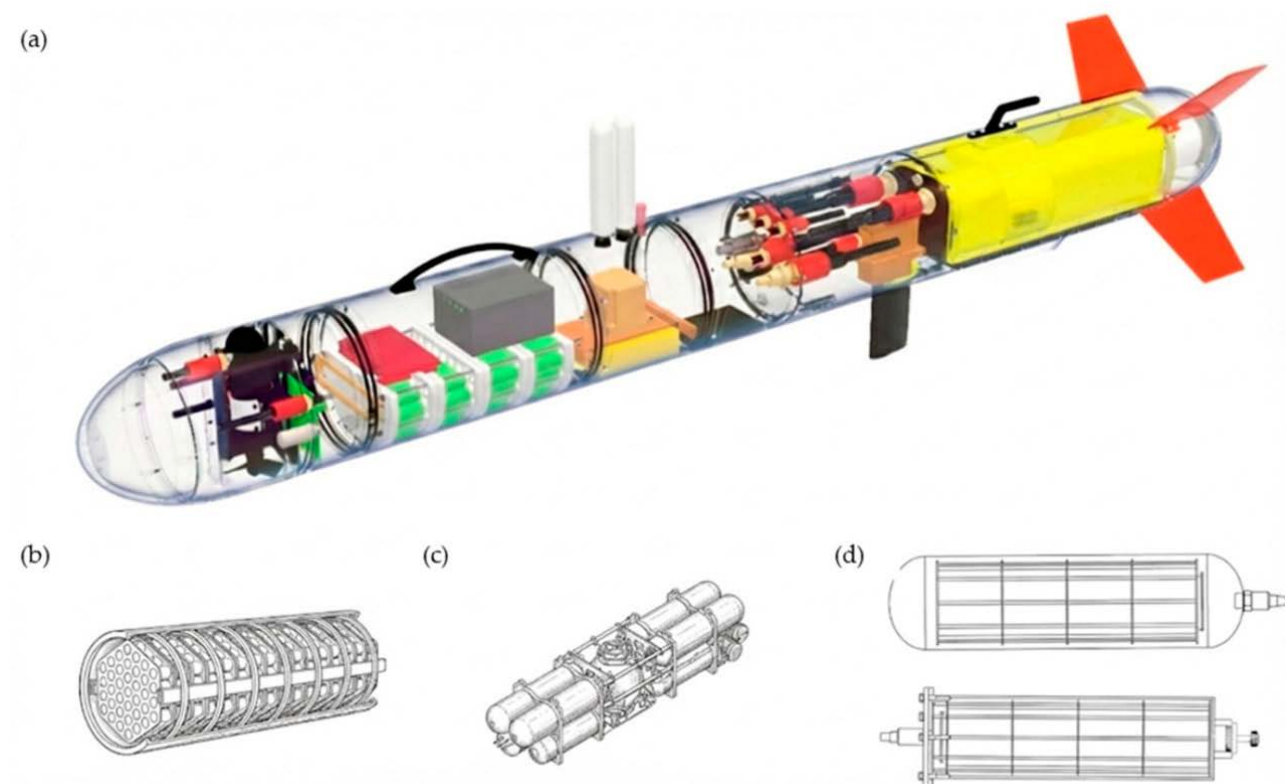


Рисунок 1. Классификация основных энергетических систем для АНПА.

- (a) Составные части АНПА;
- (b) Батарея металл–морская вода;
- (c) Топливная элементная система;
- (d) Литий-ионная батарея.

В отличие от наземного транспорта, проектирование подводных энергосистем сталкивается со специфическими физическими барьерами. Огромное гидростатическое давление, строгие требования к нейтральной плавучести и термодинамические противоречия в стеснённом объёме создают уникальный комплекс инженерных проблем. Эти факторы действуют нелинейно, вызывая каскадный рост массы и энергопотребления, что формирует главное узкое место отрасли, сдерживающее прогресс аппаратов сильнее, чем проблемы навигации и управления.

Фундаментальное требование выдерживать давление около 10 МПа на каждые 1000 метров глубины вынуждает размещать аккумуляторы в тяжёлых прочных корпусах. Для компенсации веса добавляется высокоплотный синтактический пенопласт, что приводит к резкому «каскадному» увеличению водоизмещения аппарата. [6].

Возросшее водоизмещение увеличивает площадь смоченной поверхности и лобовое сопротивление, нивелируя энергетический выигрыш от дополнительной ёмкости батарей за счёт роста затрат на движение. Кроме того, постоянная температура воды 0–4 °С снижает активность электрохимических реакций. Одновременно во время высокомоментных манёвров внутреннее теплоизолированное пространство рискует перегреться. Термодинамическое противоречие - «снаружи экстремальный холод, внутри накопление тепла» - еще более усложняет инженерную задачу. [7,8].

Сталкиваясь с этими физическими ограничениями, существующие решения в области энергетических технологий, - это компромиссы между удельной энергией, удельной мощностью и безопасностью.

Сталкиваясь с этими ограничениями, разработчики вынуждены искать компромисс между удельной энергией, мощностью и безопасностью. Электрохимические накопители (особенно литий-ионные батареи) доминируют в коммерческом сегменте благодаря зрелости технологий, однако их удельная энергия после размещения в герметичном корпусе падает до 100–150 Вт·ч/кг, приближаясь к теоретическому пределу интеркаляционных реакций. [9,10].

Тепловые и ядерные установки (двигатели Стирлинга, реакторы с тепловыми трубами) обладают высоким энергетическим базисом для тяжёлых платформ, но генерируют механические шумы, ухудшающие скрытность, а также несут высокие затраты и риски ядерной безопасности. Технологии сбора энергии окружающей среды (тепловой градиент океана, волны) нацелены на «бесконечную автономность», но из-за стохастичности подходят лишь для маломощных глайдеров или вспомогательных нужд. [11,12,13].

Тепловые и ядерные технологии (такие как двигатели Стирлинга и реакторы с тепловыми трубами) обеспечивают очень высокий энергетический базис, подходящий для крупных и тяжелых платформ, способных брать на борт много полезной нагрузки, но механические шумы соответствующих энергоустановок ухудшают скрытность АНПА. При этом высокие затраты и риски ядерной безопасности ограничивают их широкое применение [14,15].

Технологии сбора энергии окружающей среды, например, океанской тепловой энергии и энергии волн, нацелены на достижение «бесконечной автономности», но прерывистость и стохастичность их получения затрудняют их использование в качестве основного движителя, делая их пригодными только для маломощных глайдеров или в качестве вспомогательных источников энергии [16,17].

Несмотря на экспоненциальный рост числа исследований в области подводной энергетики, существующие обзоры зачастую фрагментарны. Часть литературы фокусируется исключительно на модификации материалов электродов, игнорируя влияние давления на макроскопические конструкции, другие работы рассматривают алгоритмическое моделирование стратегий управления энергией (EMS) без учёта гидродинамических ограничений.

Настоящая статья ставит целью интеграцию знаний из материаловедения, гидродинамики и теории управления. Основной вклад работы заключается:

- ▶ в систематическом описании четырёх категорий технологий — от зрелых литиевых батарей до передовых ядерных установок — с раскрытием механизмов влияния высокого давления и низких температур на эффективность преобразования энергии;
- ▶ в акценте на проектировании системной архитектуры в условиях нелинейного эффекта усиления массогабаритных показателей и проблеме поддержания термодинамического баланса в замкнутом объёме;

► в анализе потенциала искусственного интеллекта (в частности, глубокого обучения с подкреплением) для обработки неопределённости подводной среды и глобальной оптимизации энергоэффективности.

В статье сначала формируется оценочная система и классификация архитектур на основе физических ограничений среды, затем рассматриваются методы моделирования и испытаний. На этой базе оценивается современное состояние ключевых технологий (литий-ионные батареи, топливные элементы, тепловые/ядерные источники, сбор энергии среды) и анализируются механизмы их взаимного ограничения. В завершение обобщаются проблемы гибридных систем и намечаются пути дальнейшей технологической эволюции.

2. Глубоководные физические ограничения и проектирование системной архитектуры

Проектирование энергетических систем АНПА по своей сути представляет собой задачу многокритериальной оптимизации в условиях жёстких физических ограничений. В отличие от наземных электромобилей или летательных аппаратов, где основной целью является снижение веса, специфика подводной среды - гидростатическое давление, линейно возрастающее с глубиной, строгие требования к нейтральной плавучести, а также ограниченный тепло- и массообмен в стеснённых объёмах - диктует необходимость применения уникальных инженерных оценочных метрик и стандартов классификации архитектур. [20,21].

2.1. Глубоководные физические ограничения и нелинейный эффект усиления

Основное физическое ограничение, накладываемое средой на энергетические системы, обусловлено сопряжённым эффектом гидростатического давления и равновесия плавучести. Согласно фундаментальным принципам параметрического анализа для проектирования подводных аппаратов (сформулированным в 1990 году), аппараты должны строго соблюдать условие нейтральной плавучести: общий вес аппарата должен быть равен весу вытесняемой им морской воды.

Как показано на рисунке 2, добавление аккумуляторов для увеличения дальности хода запускает «порочный круг» роста массы, веса конструкции и гидродинамического сопротивления, что приводит к убывающей отдаче. Это требование порождает критический «нелинейный эффект усиления веса». Для выдерживания давления около 10 МПа на каждые 1000 метров глубины закрытые энергетические системы требуют тяжёлых прочных корпусов. Этот дополнительный конструкционный вес требует компенсации высокоплотным синтактическим пенопластом, создавая каскадное увеличение водоизмещения. Возросшее водоизмещение увеличивает площадь смоченной поверхности и сопротивление движению, из-за чего энергетический выигрыш от дополнительных батарей нивелируется их собственным весом и возросшим потреблением мощности на ход.

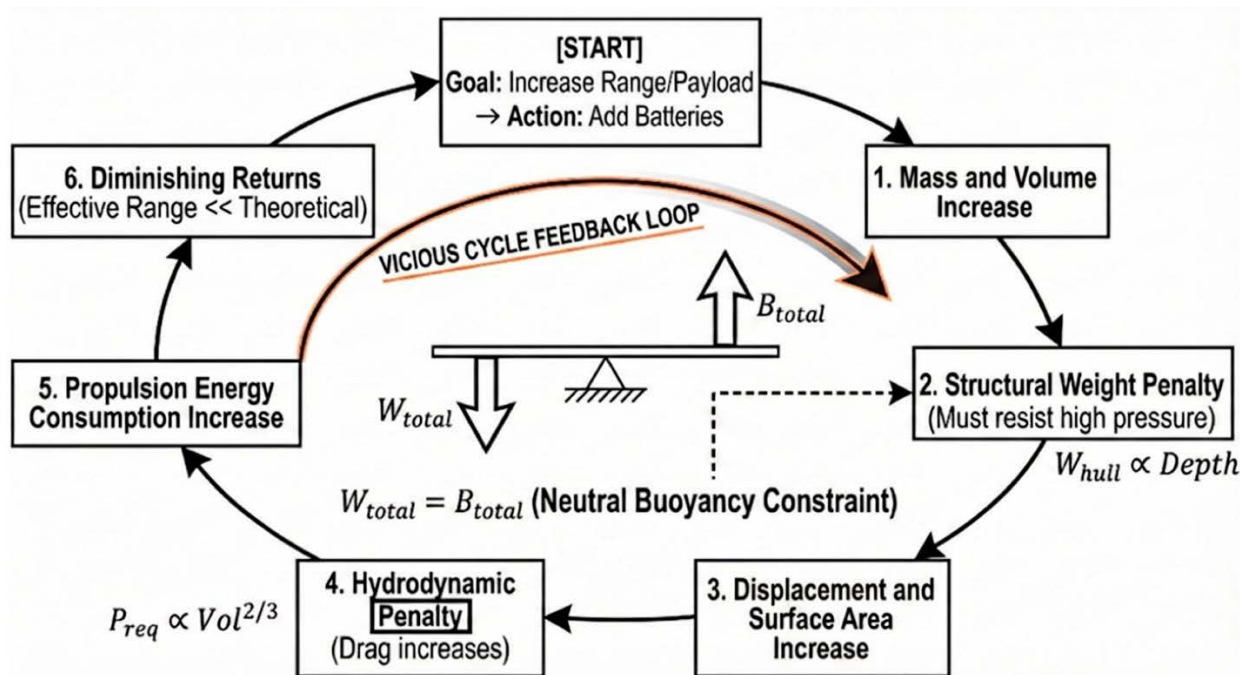


Рисунок 2. Схема нелинейного эффекта усиления веса в энергетических системах глубоководных автономных необитаемых подводных аппаратов.

Поэтому при оценке эффективности нельзя опираться только на удельную энергию ячеек (Вт·ч/кг). Необходимо использовать показатель «системной удельной энергии», который учитывает массу самих элементов, систему управления батареей (СУБ), герметичный корпус и материалы для компенсации плавучести. Исследования показывают, что с увеличением глубины доля веса корпуса растёт экспоненциально, снижая итоговую системную удельную энергию значительно ниже уровня отдельных ячеек. [22].

Кроме того, среда создаёт термодинамическое противоречие: температура окружающей воды 0–4 °C замедляет кинетику электрохимических реакций и повышает внутреннее сопротивление, тогда как во время высокомоощных миссий внутреннее пространство рискует перегреться. Комплексная оценочная система должна учитывать коэффициенты сохранения ёмкости и эффективность отдачи мощности в таких сложных температурных режимах. [23].

2.2. Классификация системной архитектуры

В зависимости от стратегий адаптации к гидростатическому давлению инженерные архитектуры делятся на две категории: замкнутые системы и системы с компенсацией давления (открытые).

Замкнутые системы представляют собой устройства в жёстком прочном корпусе, работающие в среде с атмосферным давлением (1 атм). Главное преимущество этой архитектуры - обеспечение стандартных условий эксплуатации для аккумуляторных ячеек и электроники, аналогичных наземным, что защищает компоненты от высокого давления и коррозии.

Однако применение такой архитектуры ограничено соотношением водоизмещения к весу. Исследования определяют глубину в 2000 метров как критический порог. При его превышении толщина стенок корпуса должна резко увеличиваться, и масса конструкции начинает доминировать в системе. Это ведёт к падению полезной грузоподъёмности и системной удельной энергии. Кроме того, как указано в таблице 1, для систем с выбросом продуктов реакции (например, топливных

элементов) замкнутая архитектура усложняется необходимостью хранения образующейся воды внутри ограниченного объёма корпуса. [24].

Таблица 1. Сравнение инженерных характеристик закрытых систем и систем с уравновешенным давлением/открытых систем.

Критерии сравнения	Закрытая система	Системы с уравновешенным давлением/открытые системы
Состояние внутреннего давления	Постоянное давление (1 атм)	Высокое давление (гидростатическое давление окружающей среды)
Зависимость глубины от веса	Нелинейное усиление веса	Независимый от глубины
Терморегулирование	Риск накопления тепла	Низкий уровень (требуется настройка)
Совместимость компонентов	Высокий (стандартные компоненты)	Хорошее (жидкостное охлаждение)
Потери жидкости/механические потери	Незначительный	Высокие потери вязкости
Основные режимы отказа	Прогиб/неустойчивость конструкции	Электрохимико-механическая связь

Таблица 1. Сравнение инженерных характеристик закрытых систем и систем с уравновешенным давлением / открытых систем

Для преодоления весового ограничения прочных корпусов была разработана технология компенсации давления (открытые системы). Такие архитектуры обычно используют маслозаполненные конструкции, гибкие мембраны или поршневые компенсаторы для поддержания внутреннего давления в равновесии с внешним гидростатическим давлением морской воды. [22,25].

Ключевое преимущество заключается в отказе от тяжёлого жёсткого корпуса, что значительно повышает эффективность использования пространства и системную удельную энергию на больших глубинах. Например, пакеты мягких аккумуляторных элементов, заполненные диэлектрическим маслом, используют несжимаемость жидкости для передачи внешнего давления, сохраняя структурную целостность даже на экстремальных глубинах.

Эта архитектура сталкивается со специфическими гидродинамическими и микромеханическими проблемами: высоковязкое изолирующее масло, заполняющее внутренний объём, существенно увеличивает вязкостное сопротивление движущихся частей (например, двигателей), вызывая скачок энергопотребления; кроме того, высокое гидростатическое давление на микроскопическом уровне индуцирует механические напряжения в материалах электродов. Это может приводить к разрушению частиц активного материала, снижению пористости и падению ёмкости. Соответственно, материалы ячеек должны обладать исключительно высокой структурной стабильностью. [26,27].

2.3. Характеристики источников питания

Ограниченные нелинейным сопряжением гидродинамического сопротивления и грузоподъемности, источники питания одного типа зачастую не могут одновременно удовлетворить два ключевых тактических требования АНПА — большую автономность (высокая потребность в энергии) и высокую маневренность (высокая потребность в мощности). Поэтому классификация источников по диаграмме Рагона на энергоёмкие и мощностные типы, а также их разумное разделение и согласование являются основой проектирования гибридных энергетических систем.

Энергоёмкие источники характеризуются высокой удельной энергией и предназначены для длительных крейсерских миссий и обеспечения базовой нагрузки. Типичными представителями выступают топливные элементы и металло-водные батареи (алюминий-водные, магний-водные). [12,28]. Топливные элементы за счёт применения высокоплотных химических топлив теоретически обеспечивают автономность, превосходящую аккумуляторы; металло-водные батареи используют морскую воду в качестве окислителя, что снижает массу носимой системой полезной нагрузки. Однако такие источники отличаются медленной динамической реакцией и ограниченной пиковой мощностью, что затрудняет их работу при резких колебаниях нагрузки. [29].

Напротив, мощностные источники характеризуются высокой удельной мощностью и быстрой динамической реакцией, покрывая пиковые потребности при запуске, разгоне, связи и гидролокационном зондировании. Литий-ионные батареи (особенно мягкие полимерные) и суперконденсаторы являются типичными представителями этой группы. [9]. Несмотря на физические ограничения удельной энергии из-за механизма интеркаляционных реакций, отработанная технология и высокие скорости заряда-разряда делают литиевые батареи незаменимыми буферами для работы АНПА в сложных режимах. [30]. Рациональная конфигурация этих двух типов источников в архитектуре аппарата позволяет максимизировать комплексную эффективность системы, нивелируя недостатки каждого из них.

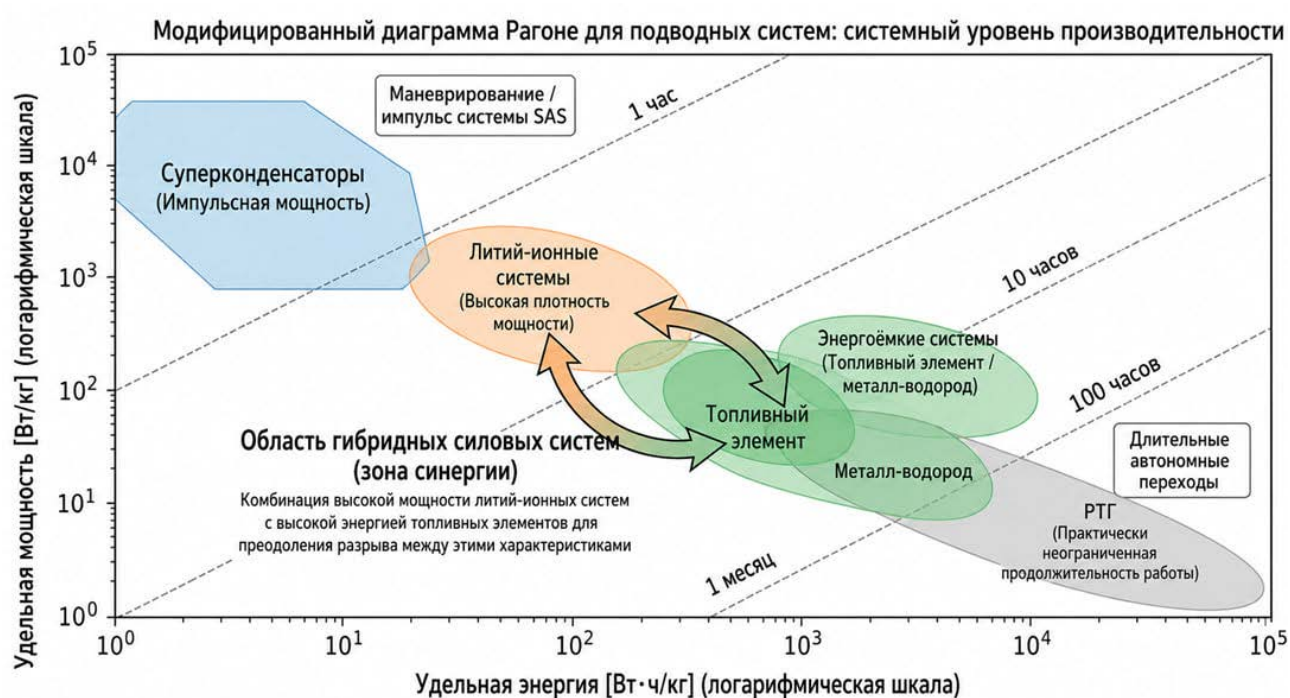


Рисунок 3. Модифицированная для подводных условий диаграмма: функционирование системного уровня

Модифицированная для подводных условий диаграмма Рагона (рисунок 3) даёт количественную визуализацию этой взаимодополняющей связи. В данной системе координат, где по оси абсцисс отложена удельная энергия, а по оси ординат — удельная мощность, диагональные контуры представляют собой время непрерывного разряда системы, чётко обозначая границы применимости различных технологий.

Зона импульсной мощности в левом верхнем квадранте занята суперконденсаторами и высокотокowymi литий-ионными батареями. Они хорошо подходят для обработки кратковременных манёвров длительностью в минуты или импульсных нагрузок гидролокаторов с синтезированной апертурой, однако их низкая удельная энергия не позволяет обеспечивать длительные миссии.

Зона длительного крейсерского хода в правом нижнем квадранте представлена топливными элементами, металло-водными батареями и радиоизотопными термоэлектрическими генераторами. Хотя эти технологии способны поддерживать переходы на дальние расстояния на крейсерской скорости от нескольких дней до месяцев, они ограничены относительно низкой удельной мощностью, что затрудняет реагирование на внезапные скачки нагрузки.

Кроме того, область двунаправленной стрелки в центре диаграммы иллюстрирует зону синергетического проектирования гибридных энергетических систем. Она показывает, что сопряжение мощностных литий-ионных батарей с энергоёмкими топливными элементами позволяет эффективно преодолеть разрыв в характеристиках отдельных технологий. Это обеспечивает оптимальную работу в интервале миссий средней мощности и средней-большой автономности (от 10 до 100 часов), достигая одновременной оптимизации как удельной энергии, так и удельной мощности.

3. Ключевые технологии моделирования, имитационного моделирования и экспериментальных испытаний

Исследования и разработки подводных энергетических систем охватывают перекрёстное сопряжение множества физических полей: электрохимии, гидродинамики, теплопередачи и механики твёрдого тела. Учитывая недоступность глубоководной среды и высокую стоимость натурных морских испытаний, построение высокоточных численных моделей и усовершенствованных лабораторных стендов является основным техническим путём для выявления механизмов отказов и оптимизации системного проектирования. Данная глава систематически освещает основные методы численного моделирования и технологии экспериментальных испытаний, применяемые в современной подводной энергетике.

3.1. Технология численного моделирования многофизического сопряжения

Численное моделирование направлено на прогнозирование отклика энергетических систем в экстремальных глубоководных условиях посредством решения систем дифференциальных уравнений в частных производных. В зависимости от масштаба исследования современные работы охватывают три ключевых аспекта: микроскопическое моделирование механо-электрохимического сопряжения, гидро-термическое сопряжение и системное моделирование управления энергопотреблением. Как показано в таблице 2, четыре метода моделирования - от метода конечных элементов до цифровых двойников - сравниваются по вычислительным преимуществам, внутренним ограничениям и конкретным применениям в рамках системного анализа.

Метод моделирования	Основные преимущества	Основные ограничения	Типичные области применения
метод конечных элементов	Точный анализ микронапряжений и механоэлектрохимической связи.	Высокая вычислительная стоимость; непригоден для моделирования на системном уровне.	Микроструктурная устойчивость к давлению; анализ остоичивости корпуса.
Вычислительная гидродинамика	Визуализирует гидротермические процессы в сложных граничных условиях.	Высокая чувствительность к сетке; проблемы сходимости в многофазных потоках.	Отвод тепла от батареи; водно-тепловой регулирующий механизм топливного элемента.
Эквивалентная схема	Высокая вычислительная эффективность; простая интеграция в системы управления зданием (BMS) реального времени.	Низкая физическая точность; не учитывает нелинейные эффекты, характерные для глубоководной среды.	Оценка состояния в реальном времени (SOC/SOH); валидация EMS.
Цифровой двойник	Возможности адаптивного прогнозирования за счет объединения моделей данных.	Высокая зависимость от качества данных с датчиков; длительное время обучения модели.	Комплексное управление состоянием оборудования на протяжении всего жизненного цикла; диагностика неисправностей.

Таблица 2. Сравнение основных методов численного моделирования для подводных энергетических систем.

Для анализа влияния глубоководного гидростатического давления на микроструктуру аккумуляторов основным инструментом микроскопического исследования стал метод конечных элементов. Путём дискретизации сетки геометрической модели он обеспечивает сильносвязанное решение уравнений равновесия механики твёрдого тела и электрохимического переноса. На микроскопическом уровне исследователи используют теорию пористой среды для описания структуры электродов, вводя определяющие соотношения, зависящие от давления, для моделирования искажения кристаллической решётки и разрушения частиц активного материала. Процесс требует одновременного решения уравнения диффузии ионов лития в твёрдой фазе и уравнения миграции в жидкой фазе при приложении гидростатического давления в качестве тензорного граничного условия. Это позволяет количественно оценить нелинейное влияние снижения пористости под давлением на ионную проводимость.

На уровне теплового управления замкнутая конструкция подводных аппаратов делает рассеивание тепла задачей сопряжённого теплообмена, где ключевым инструментом выступает вычислительная гидродинамика (CFD). Решая уравнения Навье–Стокса и сохранения энергии, CFD-моделирование позволяет рассчитать сложное распределение температур внутри герметичного объёма. При задании граничных условий внешняя среда обычно характеризуется постоянной низкой температурой и высокими коэффициентами конвективного теплообмена, тогда как внутри аппарата преобладают квазиadiaбатический режим или ограниченная естественная конвекция. Технология применяется преимущественно для оценки накопления тепла в батареях при высокомоощном разряде и оптимизации систем отвода тепла.

Для глобальной оптимизации энергоэффективности всего аппарата используются методы проектирования на основе моделей, охватывающие движительный комплекс, целевую нагрузку и энергосистему. Распространённые подходы включают вычислительно эффективную эквивалентную электрическую схему и физически более явную псевдодвухмерную модель. В последние годы набирает силу технология цифровых двойников в сочетании с глубоким обучением с подкреплением. Она обеспечивает высокоточное прогнозирование остаточной дальности в виртуальном

пространстве за счёт ассимиляции данных датчиков в реальном времени для онлайн-коррекции параметров модели.

3.2. Технология экспериментальных измерений и имитации условий окружающей среды

Экспериментальные испытания служат не только основой для верификации моделей, но и единственным способом получения предельных характеристик системы. По мере увеличения глубины исследований технологии тестирования эволюционируют от простых статических испытаний под давлением к динамическим, *in situ* и многофизическим тестам с сопряжёнными полями.

Барокамеры высокого давления являются базовой инфраструктурой для глубоководных энергетических исследований, имитируя среду огромного гидростатического давления. Системы используют гидравлические насосы для создания давления, соответствующего целевой глубине. Передовые установки способны поддерживать не только постоянное давление, но и линейную скорость его изменения при погружении и всплытии АНПА. Это необходимо для оценки динамической усталостной долговечности уплотнений мягких элементов, маслозаполненных компенсационных конструкций и уплотнительных интерфейсов. Полунатурные полномасштабные испытания остаются необходимым звеном для оценки инженерной надёжности.

Для выявления влияния давления на кинетику электрохимических реакций в реальном времени ключевую роль играет характеристика *in situ*. Метод заключается в проведении спектроскопии электрохимического импеданса и гальваностатической прерывистой титрации через высоковольтные водонепроницаемые разъёмы непосредственно в барокамере. Анализ импедансных откликов на разных частотах позволяет разделить общую поляризацию аккумулятора на омическую, поляризацию переноса заряда и диффузионную.

Ориентируясь на условия сосуществования низких температур и высокого давления, термомеханические сопряжённые испытания стали новой областью исследований. Такие системы интегрируют циркуляционные устройства водяной бани для строгого контроля температуры среды внутри камеры. Используя термопарные решётки и инфракрасную визуализацию в прозрачных барокамерах, исследователи фиксируют тепловыделение и градиенты температурного поля аккумуляторов при различных нагрузках по давлению.

4. Современное состояние исследований энергетических систем

Технологическая эволюция энергетических систем АНПА представляет собой поиск многокритериального баланса между удельной энергией, мощностью, адаптацией к среде и скрытностью, а не одномерное повышение характеристик. Различные технические пути решают конкретные узкие места, зачастую принося новые физические ограничения и инженерные затраты.

Учитывая современный уровень технологической готовности (УТГ) и распространённость применения, данный раздел рассматривает прежде всего электрохимические системы (литий-ионные аккумуляторы и топливные элементы), составляющие основное направление современной эксплуатации. Ядерные энергоустановки и тепловые двигатели анализируются как стратегические решения для крупнотоннажных платформ большой автономности, предлагая сравнительную перспективу вместо исчерпывающего инженерного анализа. Последующие подразделы систематически оценивают эти направления в рамках многокритериальной системы, анализируя их преимущества, узкие места и механизмы глубокого многофизического сопряжения, ограничивающие производительность. Комплексное сравнение характеристик основных технологий приведено в таблице 3.

Технологии	Теоретическая энергия	Удельная энергия системы	Удельная мощность	ТРЛ	Ключевые проблемы
Литий-ионный аккумулятор (устойчивый к давлению)	250–300 Вт·ч/кг	100–130 Вт·ч/кг	Высокий (>500)	9	Нелинейный эффект усиления веса, собственный вес прочного корпуса
Литий-ионный аккумулятор (устойчивый к давлению)	250–300 Вт·ч/кг	140–180 Вт·ч/кг	Средний/высокий	5–7	Микромеханические повреждения, вязкостное сопротивление двигателей.
Топливный элемент PEM	>1000 Вт·ч/кг	350–500 Вт·ч/кг	Низкий/средний	4–6	Эффективность хранения окислителей, управление водными ресурсами в тупиковом режиме.
Аккумулятор на основе Al/Mg и морской воды	>8000 Вт·ч/кг	400–800 Вт·ч/кг	Низкий (<50)	3–5	Коррозия анода, накопление осадка, медленная динамическая реакция
Генератор радиоизотопов	Почти бесконечность	>10 ⁵ Вт·ч/кг	Очень низкий (<5)	4–8	Чрезвычайно низкая удельная мощность, низкая стоимость защиты от излучения.
тепловая энергия океана	Н/Д	Н/Д	Очень низкий	3–5	Низкая эффективность преобразования (<3%), зависимость от температурного градиента.

Таблица 3. Комплексное сравнение характеристик основных энергетических технологий для подводных аппаратов.

4.1. Технология электрохимического накопления энергии

Литий-ионные аккумуляторы доминируют в современной подводной энергетике благодаря отработанной цепочке поставок. Однако глубоководные условия высокого давления и низких температур создают серьёзные проблемы для их макроскопической герметизирующей архитектуры и микроскопических механо-электрохимических механизмов, вынуждая смещать фокус с систем на базе внешнего прочного корпуса к архитектурам с внутренней безопасностью [31].

В коммерческих АНПА преимущественно используются замкнутые системы для мелководных применений. Однако для миссий глубже критического порога в 2000 м нелинейные потери веса делают жёсткие корпуса неэффективными. В результате вектор исследований сместился в сторону архитектур с компенсацией давления (например, корпусов, заполненных диэлектрической жидкостью). Как отмечают Li и др., применение такой конструкции позволяет снизить системный вес примерно на 18,3 % на глубине 6000 м по сравнению с жёсткими корпусами. Хотя это эффективно смягчает эффект усиления веса, возникает новая проблема гидродинамической эффективности: высоковязкое изолирующее масло значительно увеличивает вязкостное сопротивление внутренних движущихся частей.

Если системы с компенсацией давления решают макроскопическую проблему массы, то прямое приложение гидростатического давления к элементу создаёт уникальные механо-электрохимические вызовы. Исследования *in situ* методом спектроскопии электрохимического импеданса показывают, что хотя высокое давление изначально может усиливать кинетику диффузии лития, при длительных циклах оно становится деструктивным фактором. Это приводит к необратимой деградации ёмкости и нелинейному росту внутреннего сопротивления. Данные потери обусловлены сложными механизмами сопряжения, включающими разрушение частиц активного материала и нарушение свойств сепаратора.

Кроме того, глубоководный температурный режим (<4 °C) значительно повышает вязкость электролита, снижая полезную ёмкость более чем на 50 %. И наоборот, при высокомоощном разряде система сталкивается с риском внутреннего накопления тепла из-за термомеханических эффектов стеснённого объёма.

Современные коммерческие электродные материалы не полностью оптимизированы для этих условий. Будущие прорывы лежат в области разработки полностью твердотельных аккумуляторных систем (ТТАС). Благодаря высокой механической прочности твёрдых электролитов они способны без дополнительных ухищрений противостоять глубоководному давлению, прокладывая путь к структурно-энергетической интеграции. Такой подход устраняет необходимость как в тяжёлых прочных корпусах, так и в маслозаполненных компенсаторах [32].

4.2. Технология высокоэнергетических химических источников тока

Топливные элементы теоретически обеспечивают автономность, значительно превосходящую аккумуляторные батареи, за счёт разделения модулей энергии и мощности. Однако бескислородная среда подводной обстановки заставляет систему нести окислители на борту, а технологии их высокоплотного хранения и замкнутого цикла управления остаются основными факторами, ограничивающими инженерную надёжность [33].

Ограниченные полезным объёмом, разработчики сосредотачиваются на двух направлениях: высокоплотном хранении энергии и ее добыче *in situ*. [34].

- Высокоплотное хранение: По сравнению с газообразным хранением под высоким давлением, гидриды металлов несколько уступают в удельной массе, но обеспечивают высокую объёмную плотность и безопасность при низком давлении. Они служат «функциональным балластом», повышая общую эффективность за счёт теплового сопряжения с батареей элементов.
- Добыча *in situ*: Технологии «искусственных жабр» пытаются воспроизвести биологические механизмы, используя гидрофобные мембраны для извлечения растворённого кислорода из морской воды. Однако физические ограничения материалов позволяют обеспечивать мощность лишь на уровне единиц ватт. Этот низкий поток газа жёстко ограничивает область применения маломощными глайдерами, не позволяя поддерживать киловаттные нагрузки крупных АНПА.

В отличие от наземных открытых систем, подводные топливные элементы работают в тупиковом режиме (*dead-ended*) или с рециркуляцией, что порождает специфические проблемы управления материалами. В тупиковом режиме накопление продуктов реакции ведёт к нестабильности характеристик. Введение активных насосов (рециркуляция выхлопных газов) смягчает эту проблему, но неизбежно увеличивает механическую сложность и частоту отказов. Количественная оценка на основе байесовских сетей показывает, что эта сложность приводит к экспоненциальному снижению надёжности со временем миссии (падая до ~0,8 через 100 ч из-за отказа вспомогательных компонентов) [35].

Таким образом, практическое применение топливных элементов зависит от решения проблем хранения реагентов и работы в замкнутом цикле. Будущее развитие лежит в построении гибридных архитектур типа «топливный элемент + аккумулятор» и прорывах в области высокоплотных твердофазных технологий хранения (гидриды металлов), а также адаптивных стратегий водно-теплового управления. [11,36]. (..)

4.3. Теплоэнергетические и ядерные технологии

По мере роста размеров и скоростей АНПА потребность в мощности возрастает экспоненциально. Расчёты Zhao и др. показывают, что при скорости 32 узла аппарату требуется $1,11 \times 10^5$ Вт. Традиционные электрохимические накопители всё чаще не удовлетворяют потребностям таких стратегических платформ, стимулируя переход к теплоэнергетике и ядерной энергетике, что одновременно приносит проблемы значительных акустических сигнатур и ограничений объёма. [14].

Для повышения эффективности воздухонезависимые установки переходят к парадигме «полигенерации». На рисунке 4 представлена безуглеродная полигенерационная система на жидком аммиаке, интегрирующая рекуперацию холода, крекинг и два пути генерации электроэнергии для одновременного производства холода, электричества, тепла и пресной воды. Каскадные архитектуры на аммиачном топливе теоретически могут обеспечить четырёхкомпонентную генерацию с общей эффективностью до 38,58 % [37].

Каскадные архитектуры на основе аммиачного топлива теоретически могут обеспечить четырёхкомпонентную генерацию тепла, электроэнергии, холода и пресной воды с общей энергетической эффективностью системы до 38,58 % [37]. Однако инженерная реальность часто не соответствует теоретическим ожиданиям.

Для адаптации к внутреннему объёму АНПА размеры камер сгорания и теплообменников приходится уменьшать, что снижает фактическую эффективность преобразования до 16–17 % [15]. ричиной становятся неоптимальная термодинамика компактных камер и миниатюризация теплообменников, необходимых для интеграции в аппарат. Кроме того, низкочастотный шум механических узлов серьёзно нарушает акустическую скрытность платформы, ограничивая её применение в разведывательных миссиях.

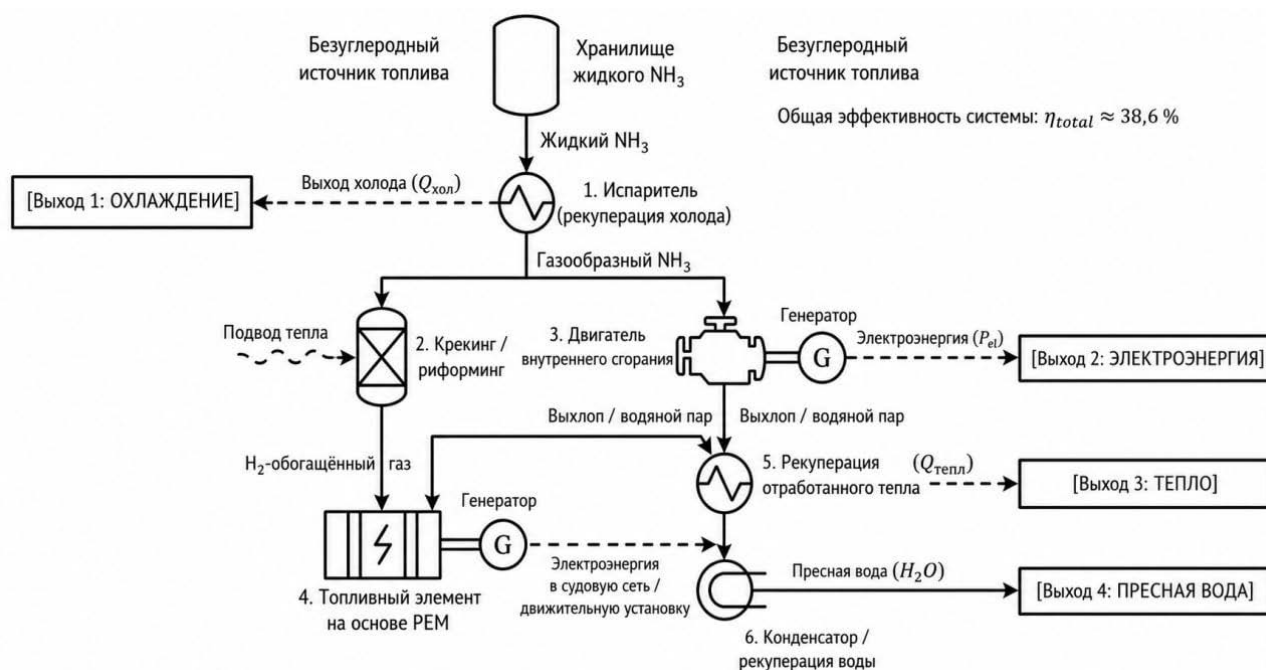


Рисунок 4. Схема воздухонезависимой энергетической установки на базе аммиака с каскадным использованием

Ориентируясь на экстремально большую автономность и высокие потребности в мощности, реактор с тепловыми трубами использует пассивный отвод тепла для устранения традиционных насосов охлаждающей жидкости — основного источника шума. Это делает его теоретически идеальным решением для стратегических миссий. Однако инженерная реализуемость остаётся узким местом: материалы оболочки должны одновременно выдерживать внешнее глубоководное гидростатическое давление, коррозию морской водой и внутреннее интенсивное нейтронное облучение. Кроме того, значительная масса необходимой радиационной защиты создаёт серьёзные весовые потери. В результате ядерные двигательные установки в настоящее время ограничены крупнотоннажными платформами, а их миниатюризация для АНПА среднего и малого размеров остаётся сложной задачей.

Теплоэнергетические и ядерные технологии представляют собой уникальное физическое решение для обеспечения высокого энергопотребления крупных высокоскоростных подводных платформ. Их преимущества заключаются в чрезвычайно высокой удельной мощности и способности к непрерывной выработке энергии, поддерживающей движение со скоростью выше 30 узлов.

Узкие места для инженерного применения очевидны: низкочастотный шум механических движущихся частей серьёзно ухудшает акустическую скрытность, а ядерные технологии требуют высоких затрат и отличаются крайне высокими барьерами безопасности при внедрении.

Будущие направления развития сосредоточены на повышении общей энергетической эффективности системы (например, за счёт комбинированной выработки тепла и электроэнергии) и проектировании бесшумных установок (таких как реакторы с тепловыми трубами). Это сделает их идеальными источниками энергии для стратегических платформ большой автономности.

4.4. Технология сбора энергии окружающей среды

Технология сбора энергии направлена на использование тепловой, световой и механической энергии океана для осуществления парадигмального сдвига от «переносимой энергии» к её *in situ* пополнению. Хотя теоретически она обеспечивает бесконечную автономность, прерывистость энергоснабжения и чрезвычайно низкая удельная мощность ограничивают возможность её использования в качестве основного источника движения [16,38].

Тепловые двигатели плавучести на основе фазопереходных материалов могут извлекать энергию из перепадов температур (около 24,2 кДж за цикл), однако строгие модели энергетического баланса выявляют жёсткие критические условия: глубина погружения должна превышать 900 м, а скорость аппарата строго контролироваться. Это означает, что для сбора энергии аппарат вынужден придерживаться определённых медленных глубоководных профилей, теряя способность выполнять быстрые манёвренные миссии [42,43,44].

Ранние конструкции для сбора солнечной энергии типа «летающее крыло» увеличивали площадь приёма света, но серьёзно ухудшали гидродинамическую форму, повышая сопротивление движению [45].

Развитие гибкой электроники предлагает способ смягчить это противоречие: гибкие аморфные кремниевые элементы, способные к конформной интеграции с обтекаемыми корпусами и обладающие лучшей спектральной характеристикой под водой, стали новым направлением исследований [46]. Однако, ограниченные пространственно-временной случайностью солнечного света и волн, такие технологии больше подходят в качестве вспомогательных источников питания

для распределённых сенсорных сетей или подводных стыковочных станций, чем для основных нужд АНПА.

Сбор энергии окружающей среды — это не просто дополнение, но инновация в режимах эксплуатации. Его преимущество заключается в теоретической «бесконечной автономности» и возможности пополнения *in situ*, полностью освобождая платформу от поддержки материнского судна. Однако, ограниченная пространственно-временной неоднородностью морской среды, технология страдает от прерывистости энерговыделения и крайне низкой удельной мощности (обычно на уровне ватта), а длительное развёртывание сталкивается с проблемой биообрастания.

а в роли самоподдерживающегося источника для распределённых сенсорных сетей или резидентных базовых станций. Такие системы способны обеспечивать долгосрочное электроснабжение маломощных узлов за счёт взаимодополнения различных видов энергии (например, ОТЭС + солнечная энергия). [17,47].

5. Механизмы многофизического сопряжения в глубоководных условиях

Граничные характеристики энергетических систем подводных аппаратов определяются не только электрохимическими свойствами материалов, но и взаимодействием нагрузок глубоководной среды с внутренними физико-химическими процессами. В отличие от наземных условий, глубоководная среда характеризуется наложением полей высокого гидростатического давления, постоянной низкой температуры и высокой солёности. Эти внешние поля передаются внутрь энергетической системы через герметичные конструкции или интерфейсы компенсации давления, вступая в сложное нелинейное сопряжение с электрохимическими реакциями, теплопроводностью и течением жидкостей. Понимание этих механизмов является научной основой для преодоления технологических ограничений. Как показано на рисунке 5, проиллюстрированы три критических механизма многофизического сопряжения - механо-электрохимическое, термомеханическое и массово-плавучестное. Они раскрывают, каким образом экстремальное давление, тепловая изоляция и расход топлива приводят к деградации аккумуляторов, рискам перегрева и гидродинамической неустойчивости соответственно.

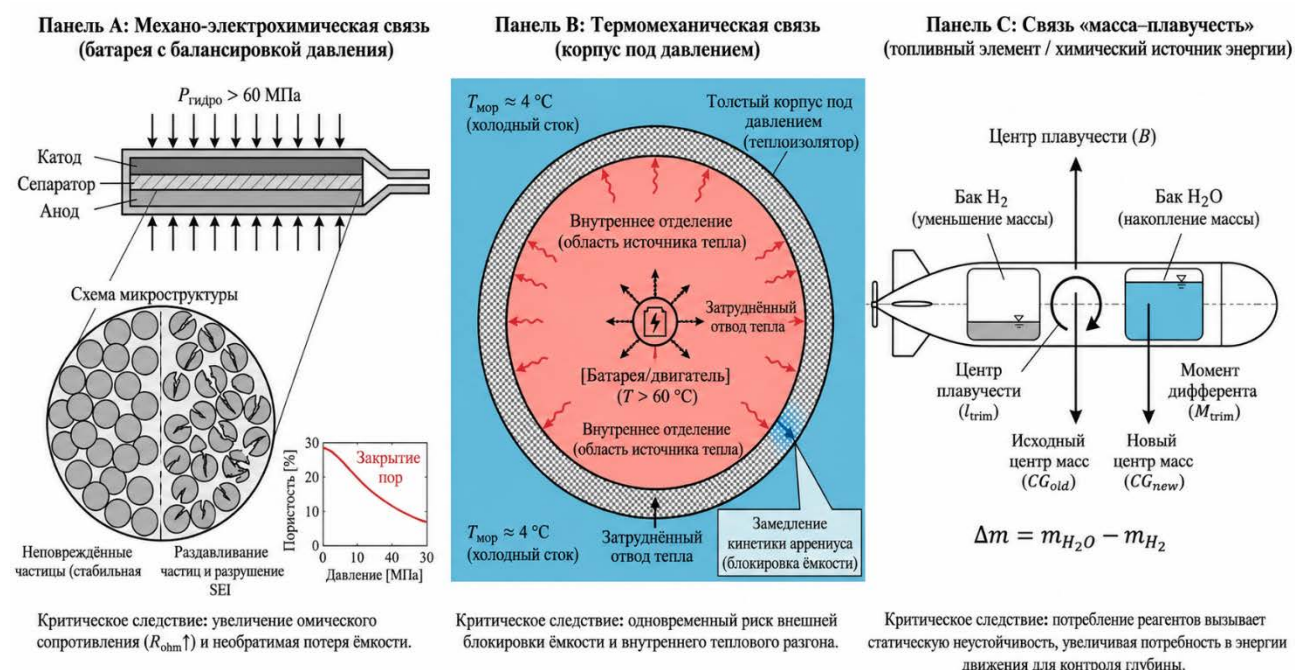


Рисунок 5. Схема механизмов многофизического сопряжения в глубоководных энергетических системах. (А) Механо-электрохимическое сопряжение, (В) Термомеханическое сопряжение, (С) Массово-плавающее сопряжение.

5.1. Механо-электрохимический механизм сопряжения гидростатического давления и электрохимических процессов

Гидростатическое давление является наиболее значимой физической особенностью глубокого моря. Его влияние на характеристики аккумуляторов выходит далеко за рамки механических повреждений макроскопических конструкций, проникая на уровень микроскопической кинетики электродных реакций. Для литий-ионных аккумуляторов с архитектурой компенсации давления (маслозаполненных) внешнее давление жидкости действует непосредственно на поверхность элемента, индуцируя значительные механо-электрохимические эффекты. [26].

Во-первых, давление изменяет микроструктуру пористых сред. Исследования Zhao и др. показали, что под высоким давлением полимерные сепараторы и пористые электроды подвергаются ползучести и деформации сжатия, что снижает пористость. Эта физическая деформация увеличивает извилистость путей переноса ионов, макроскопически проявляясь в нелинейном росте омического внутреннего сопротивления. Во-вторых, давление влияет на кинетику интеркаляции и деинтеркаляции ионов лития. Однако этот эффект имеет чёткий критический порог. При удлинении цикла непрерывное воздействие высокого давления индуцирует огромные механические напряжения внутри частиц активного материала, приводя к искажению кристаллической решётки и разрушению частиц. Это необратимое повреждение нарушает стабильность межфазной границы твёрдого электролита, ускоряя разложение электролита и падение ёмкости. Отказ глубоководных аккумуляторов часто является не простым электрохимическим истощением, а результатом синергетического действия механической усталости и электрохимической деградации.

5.2. Термомеханическое сопряжение и механизмы теплового разгона в стеснённых объёмах

Подводные энергетические системы обычно функционируют в особой термодинамической обстановке «снаружи экстремальный холод (0–4 °C), внутри — адиабатический режим». Эта среда создаёт уникальные термомеханические граничные условия сопряжения. Для защиты от коррозии и высокого давления системы часто заключены в тяжёлые прочные корпуса, образуя практически замкнутую адиабатическую систему. При выполнении высокомошных задач, таких как скоростное уклонение или гидролокационное зондирование, джоулево тепло от аккумуляторов и силовой электроники не может рассеяться через толстостенный корпус во внешнюю воду. Имитационные исследования Andersson показывают, что при работе на высокой мощности температура внутри герметичного отсека способна быстро превысить 60 °C, что приводит к высыханию и растрескиванию мембран топливных элементов. [48]. Этот эффект накопления тепла формирует локальные горячие точки; если контроль температуры отсутствует, это может спровоцировать необратимый тепловой разгон.

Ключевым моментом является то, что давление среды не обязательно выступает лишь ограничением: недавние исследования показывают, что оно может служить функциональным усилителем теплового режима. Исследования Fini продемонстрировали, что повышенное гидростатическое давление (например, 500 кПа) значительно улучшает контактный теплоперенос фазопереходных материалов (ФПМ) за счёт интенсификации течения жидкой фазы. Этот механизм указывает на потенциальную стратегию «управления тепловым режимом с откликом на давление» в стеснённых объёмах: путём прямого сопряжения теплоотводов из ФПМ с интерфейсом передачи давления глубоководная гидростатическая нагрузка используется для ускорения фазового перехода

[49]. Такая конструкция эффективно демпфирует быстрый рост температуры при высокомоощных операциях, смягчая условия для теплового разгона и превращая среду высокого давления из теплового барьера в средство охлаждения.

5.3. Массово-плавучестная динамика и гидростатическое сопряжение

Для открытых или полукоткрытых систем, таких как топливные элементы и полукотопливные батареи (например, алюминий-водные), работа связана со значительным материальным обменом, что порождает проблемы «массово-плавучестного» сопряжения. В отличие от наземных транспортных средств, где изменением веса топлива пренебрегают, подводные аппараты должны постоянно поддерживать нейтральную плавучесть для снижения энергозатрат на движение [21]. Chiche и др. подробно проанализировали эту проблему, указав, что для поддержания равновесия системе может потребоваться вводить дополнительные балластные или плавучие материалы, что напрямую нивелирует преимущества высокоэнергетических топлив [20].

В системах топливных элементов с замкнутым циклом расход водорода уменьшает общую массу, тогда как накопление воды изменяет массу или объём. При прямом сбросе воды общий вес аппарата уменьшается со временем, вызывая рост положительной плавучести и вынуждая движители тратить дополнительную энергию на удержание глубины. Если же используются гибкие водяные баллоны, общая масса сохраняется, но расширение объёма изменяет водоизмещение и положение центра тяжести, влияя на гидродинамическую устойчивость [36].

Кроме того, в тупиковом режиме работы Li и др. указали, что вода и примеси азота накапливаются в виде многофазного потока в анодных каналах [50]. В условиях микрогравитации или динамических наклонных положений распределение этого газожидкостного потока становится высокослучайным, провоцируя локальное затопление и мгновенные падения напряжения из-за затруднённого массопереноса. Эта тройная связка «управление продуктами реакции — равновесие плавучести — стабильность напряжения» представляет собой уникальную задачу управления при проектировании подводных химических силовых систем.

6. Будущие тенденции развития

Развитие подводной энергетики приближается к пределу постепенных улучшений существующих физико-химических систем. Для преодоления нелинейного эффекта усиления веса и адаптации к неопределённым экстремальным условиям приоритеты исследований смещаются от повышения удельной энергии материалов к системным трансформациям. Ключевые направления включают структурно-энергетическую интеграцию, адаптивное интеллектуальное управление и сетевые архитектуры пополнения.

6.1. Проектирование твердотельных и структурно-энергетических интеграций

Чтобы фундаментально решить проблему нелинейного усиления веса, парадигма проектирования должна сместиться от «пассивной стойкости к давлению» к «внутренней адаптации к давлению». Хотя компенсация давления смягчает проблему заменой жёстких корпусов маслозаполненными конструкциями, окончательным решением является структурно-энергетическая интеграция на базе полностью твердотельных аккумуляторов. В отличие от жидкостных систем, подверженных ползучести сепараторов под давлением, твёрдые электролиты обладают высоким механическим модулем и способны внутренне противостоять гидростатическим нагрузкам. Это позволяет аккумулятору быть одновременно накопителем энергии и несущим элементом конструкции, устраняя паразитную массу прочного корпуса и развязывая вес системы от рабочей глубины [51].

Данная траектория согласуется с достижениями Wang и др., которые подчеркнули облегчение конструкций с помощью углепластика и показали с помощью суррогатных моделей значительный выигрыш в автономности за счёт оптимизации формы и распределения энергии [52].

6.2. Интеллектуальное управление на всём жизненном цикле на основе цифровых двойников

Низкая доступность и сильная временная изменчивость глубоководной среды затрудняют поддержание оптимальной производительности традиционными стратегиями управления энергией, основанными на правилах. Будущие системы управления батареями должны эволюционировать от простого мониторинга состояния к «активному продлению срока службы» для противодействия деградации от низких температур и высоких давлений. Путём интеграции микро-датчиков высокоточный цифровой двойник способен разделить сложные факторы старения (раздел 5), например, дифференцируя рост омического сопротивления из-за снижения пористости под давлением и импеданса из-за низкой температуры. Как показано на рисунке 6, такая архитектура позволяет активно оптимизировать операционные стратегии: использовать отходящее тепло для предварительного подогрева батареи ради улучшения кинетики низкотемпературных реакций или корректировать распределение мощности в гибридных системах, чтобы избежать нагрузок при экстремальном гидростатическом давлении. Это превращает энергосистему в интеллектуального агента, способного к самооптимизации своего ресурса. Кроме того, модели прогнозирования состояния здоровья на основе больших данных заменят простое интегрирование по ампер-часам, обеспечивая точную оценку остаточной дальности для длительных резидентных миссий [23,53]. Стратегии Lu и др. также демонстрируют возможность повышения эффективности за счёт адаптивного согласования импедансов [54].

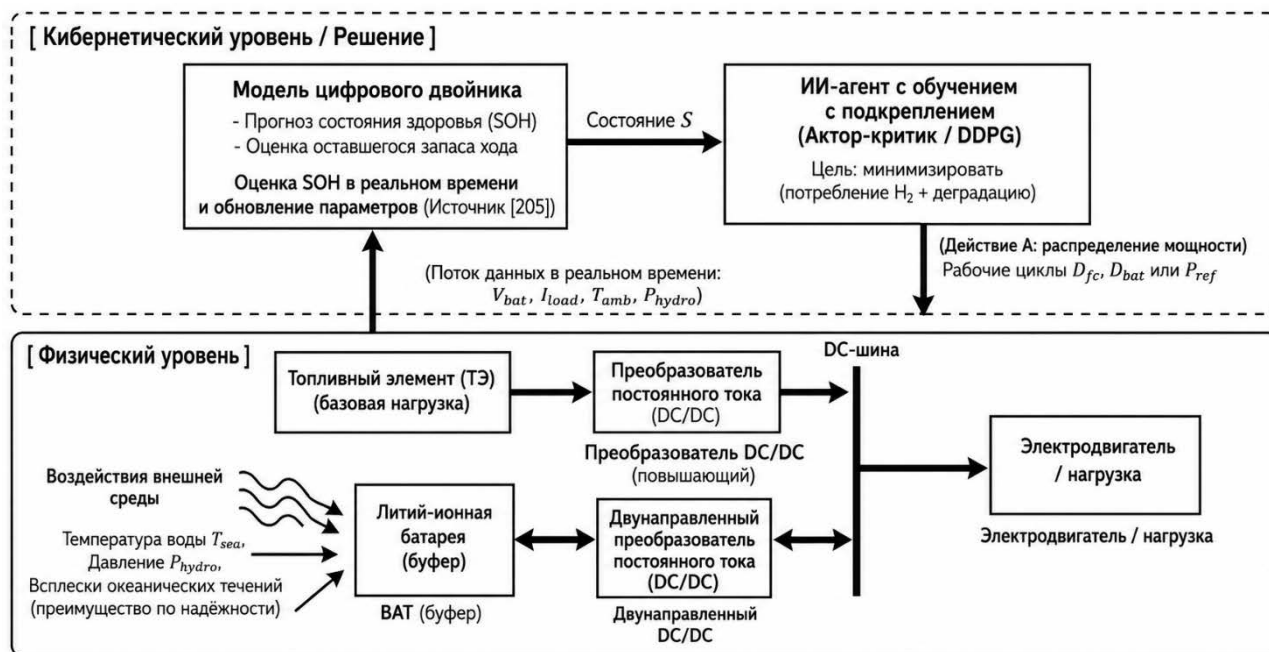


Рисунок 6. Архитектура интеллектуальной гибридной системы энергоснабжения

6.3. Эволюция от единичного размещения к подводному энергетическому интернету

Ограниченные физическим объёмом, каждый аппарат имеет верхний предел грузоподъёмности. Для достижения истинной «бесконечной автономности» и режима «длительного резидента»

эксплуатация будет смещаться от концепции самоподдерживающейся энергии на одном аппарате к сетевому режиму пополнения *in situ*. Эта трансформация зависит от создания инфраструктуры подводного энергетического интернета. Путём развёртывания донных беспроводных зарядных станций и надводных буйковых систем с взаимодополнением различных видов энергии (волновой, фотоэлектрической, дизельной) обеспечиваются стандартизированные интерфейсы пополнения для АНПА. [3].

Такая архитектура устраняет ограничение низкой удельной мощности энергии окружающей среды. Вместо того чтобы полагаться на прерывистые источники (например, волновую или тепловую энергию) для непосредственного движения аппарата, предлагается стратегия «сбор – хранение – передача». Распределённые станции собирают маломощную энергию в течение длительных периодов и накапливают её в буферах большой ёмкости. При стыковке АНПА эта энергия быстро передаётся посредством беспроводной зарядки [55]. Такое функциональное разделение позволяет аппаратам сохранять мощные двигательные системы для манёвров, в то время как инфраструктура обеспечивает бесконечную автономность за счёт пополнения *in situ*. Техно-экономические оптимизационные исследования Palmer и др. морских гибридных энергосистем служат основой для проектирования такой инфраструктуры [56]. Ключевой технологический прорыв заключается в разработке технологии подводной беспроводной передачи энергии с низкими потерями на вихревые токи (из-за высокой проводимости морской воды) и высокой устойчивостью к ошибкам рассогласования. В то же время алгоритмы планирования на основе роевого интеллекта будут координировать согласование кластеров АНПА с зарядными узлами, формируя непрерывный цикл «обнаружение – зарядка – действие»[1].

6.4. Создание стандартизированных систем испытаний и оценки глубоководных энергетических систем

Будущее развитие настоятельно требует создания общих стандартов и контрольных показателей для испытаний глубоководных энергоустановок. В частности, это включает:

- унификацию протоколов моделирования окружающей среды;
- разработку стандартизированных циклических профилей испытаний при глубоководном давлении, температуре и динамических нагрузках (имитирующих реальные миссии всплытия/погружения), а не только статические тесты давлением;
- создание спецификаций ускоренных испытаний на старение, нацеленных на механизмы механо-электрохимического сопряжения, для лабораторной оценки надёжности жизненного цикла за короткое время;
- формирование систем оценки безопасности: границ теплового разгона в стеснённых объёмах, утечки электролита под высоким давлением и пределов структурно-функционального отказа.

В ответ на низкий уровень готовности и отсутствие стандартов для новых технологий (глубоководных топливных элементов, твердотельных аккумуляторов) необходимо установление строгого «Стандарта допуска глубоководных энергетических систем». Рекомендуется проведение комплексных оценочных испытаний. Должен стать обязательным стандартизированный «Протокол динамического профиля миссии», включающий циклическое изменение давления при быстром всплытии/погружении, высокотокковый разряд при низкой температуре и длительное коррозионное старение. Только путём создания этой измерительной базы можно точно оценить уровень готовности разнородных технологий, снизить инженерные риски и обеспечить научное обоснование их перехода от лабораторных концепций к надёжным инженерным решениям.

7. Выводы

В данной работе представлен систематический обзор состояния развития, физических ограничений и будущих тенденций энергетических технологий подводных аппаратов с позиций системного проектирования. Исследование показывает, что проектирование таких систем ограничено нелинейным эффектом усиления веса и механизмами многофизического сопряжения. Хотя литий-ионные аккумуляторы занимают доминирующее положение, их характеристики серьёзно ограничены паразитной массой прочных корпусов и низкотемпературной деградацией. Топливные элементы, обладая высоким потенциалом удельной энергии, сдерживаются сложностью хранения окислителей и замкнутым водно-тепловым управлением. Тепловые двигатели и ядерные установки остаются незаменимыми для крупнотоннажных стратегических платформ.

Для удовлетворения требований миссий типа «всеглубинный, длительный» один технологический путь уже неэффективен. Будущие разработки будут иметь многоуровневый тренд: ядерная и тепловая энергетика — для стратегических платформ; гибридные системы — для тактического звена; сбор энергии окружающей среды — для распределённых сенсорных сетей. Одновременно создание стандартизированных испытательных стендов и норм безопасности станет критическим условием устранения неопределённости и содействия переходу результатов из лаборатории в практику. В конечном счёте, благодаря инновациям в твердотельных аккумуляторах, интеллектуальному управлению через цифровые двойники и строительству энергетической инфраструктуры, подводные аппараты преодолеют ограничения «энергетических островов» и достигнут истинного длительного пребывания в океане.

Вклад авторов

Концептуализация — Х.Д. и Д.Ц.; формальный анализ — З.Л. и Д.Ц.; исследование — З.Л. и Х.Д.; написание черновика — З.Л.; написание – рецензирование и редактирование — З.Л., Ц.Х., Х.Д., Г.П. и Д.Ц.; получение финансирования — Ц.Х.; руководство — Д.Ц. Все авторы прочитали и согласились с опубликованной версией рукописи.

Финансирование

Данное исследование финансировалось Национальным фондом естественных наук Китая [№ 52301358 и 12272007], Фундаментальными исследовательскими фондами для центральных университетов (G2024KY05105) и Китайским фондом постдокторской науки [№ 315947].

Заявление о доступности данных

Исходные материалы, представленные в данном исследовании, включены в статью. Дополнительные запросы можно направлять автору.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Перевод

Алексей Бойко, редактор канала @SeaRobotics, с использованием ИИ.

1. Li, J.; Hu, Y.; Luo, S.; Lu, C.; Song, Y.; Dong, H. Toward the next-generation energy systems for unmanned underwater vehicles: Status, challenges, and solutions. *Innov. Energy* **2025**, *2*, 100106. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
2. Zhao, J.; Chen, Y.; Sheng, D.; Mao, Z.; Liu, P. Preliminary study on the application of heat pipe reactor in unmanned underwater vehicles. *E3S Web Conf.* **2024**, *520*, 03022. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
3. Hyakudome, T. Design of autonomous underwater vehicle. *Int. J. Adv. Robot. Syst.* **2011**, *8*, 122–130. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
4. Nordfjord, S.J.; Thorsteinsson, S.E.; Andersen, K. Powering underwater robotics sensor networks through ocean energy harvesting and wireless power transfer methods: Systematic review. *J. Mar. Sci. Eng.* **2025**, *13*, 1728. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
5. Xu, J.; Irigoien, X.; Alouini, M.-S. State-of-the-art underwater vehicles and technologies enabling smart ocean: Survey and classifications. *arXiv* **2024**, arXiv:2412.18667. [[Google Scholar](#)]
6. Liu, Y.; Zhao, J.; Tu, Z. Detecting performance degradation in a dead-ended hydrogen-oxygen proton exchange membrane fuel cell used for an unmanned underwater vehicle. *Renew. Energy* **2024**, *222*, 119950. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
7. Ware, L.M. Design of control for efficiency of AUV power systems. Ph.D. Thesis, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, USA, 2012. [[Google Scholar](#)]
8. Andersson, S. Modeling and Control of Fuel Cell Stacks in Autonomous Underwater Vehicles. Master's Thesis, Linköping University, Linköping, Sweden, 2023. [[Google Scholar](#)]
9. Verstraten, T.; Hosen, M.S.; Berecibar, M.; Vanderborght, B. Selecting suitable battery technologies for untethered robot. *Energies* **2023**, *16*, 4904. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
10. Xiu, X.; Liu, Y.; Ma, S.; Li, C.; Li, C.; Wang, C.; Cheng, K.; Qin, J.; Huang, H. Study on energy storage configurations and energy management strategy of an underwater hydrogen hybrid system. *J. Energy Storage* **2024**, *104*, 114403. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
11. Bagherian Farahabadi, H.; Rezaei Firozjaee, M.; Mohammadpour Mir, A.; Youneszadeh, R. Fuel cell power system conceptual design for unmanned underwater vehicle. *Hydrog. Fuel Cell Energy Storage* **2023**, *10*, 33–50. [[Google Scholar](#)]
12. Jin, K.; Yan, X.; Li, J.; Zhou, M.; Fu, K.; Wei, X.; Meng, F.; Liu, J. Recent progress in aqueous underwater power batteries. *Discov. Appl. Sci.* **2024**, *6*, 441. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
13. Lu, J.; Tang, T.; Bai, C.; Gao, H.; Wang, J.; Li, C.; Gao, Y.; Guo, Z.; Zong, X. Reviews of fuel cells and energy storage systems for unmanned undersea vehicles. *Energy Sources Part A Recovery Util. Environ. Eff.* **2024**, *46*, 11867–11888. [[Google Scholar](#)]
14. Wu, Y.; Zheng, Y.; Tao, Y.; Liu, X.; Du, X.; Wang, Y. The low-enriched uranium core design of a MW heat pipe cooled reactor. *Nucl. Eng. Des.* **2023**, *404*, 112195. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
15. Belkhier, Y.; Deutsch, C.; Rashid, H.; Delaleau, E.; Yao, G.; Mamoune, A.; Benbouzid, M. Energy management strategies and hybrid fuel cell-powered autonomous underwater vehicles: A comparative study. In Proceedings of the IECON 2025–51st Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Madrid, Spain, 14–17 October 2025; IEEE: Piscataway, NJ, USA, 2025; pp. 1–6. [[Google Scholar](#)]
16. Hou, H.; Galeana, A.A.; Song, Y.; Xu, G.; Xu, Y.; Shi, W. Design of a novel energy harvesting mechanism for underwater gliders using thermal buoyancy engines. *Ocean Eng.* **2023**, *278*, 114310. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
17. Martínez de Alegría, I.; Rozas Holgado, I.; Ibarra, E.; Robles, E.; Martín, J.L. Wireless power transfer for unmanned underwater vehicles: Technologies, challenges and applications. *Energies* **2024**, *17*, 2305. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]

18. Sivamayil, K.; Rajasekar, E.; Aljafari, B.; Nikolovski, S.; Vairavasundaram, S.; Vairavasundaram, I. A systematic study on reinforcement learning based applications. *Energies* **2023**, *16*, 1512. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
19. Xu, T.; Ye, H.; Wang, G.; Xu, J.; Xin, K.; Miao, Z.; Zhang, L.; Yang, M. Design Optimization and Energy Management Strategy of a Hybrid Power System for Autonomous Underwater Vehicles. 2025. Available online: https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=5527778 (accessed on 4 December 2025).
20. Chiche, A.; Lindbergh, G.; Stenius, I.; Lagergren, C. A strategy for sizing and optimizing the energy system on long-range AUVs. *IEEE J. Ocean. Eng.* **2021**, *46*, 1132–1143. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
21. Brighenti, A. Parametric analysis of the configuration of autonomous underwater vehicles. *IEEE J. Ocean. Eng.* **1990**, *15*, 179–188. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
22. Li, M.; Hu, Y.; Li, L.; Li, J.; Wang, B.; Xia, Y. A novel pressure compensated structure of lithium-ion battery pack for deep-sea autonomous underwater vehicle. *J. Energy Storage* **2024**, *86*, 111190. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
23. Ingebrigtsen, Ø.S. Battery Health Estimation for Subsea AUVs with Gaussian Process Regression. Master's Thesis, NTNU, Trondheim, Norway, 2024. [[Google Scholar](#)]
24. Vedachalam, N.; Ramesh, R.; Jyothi, V.B.N.; Doss Prakash, V.; Ramadass, G. Autonomous underwater vehicles-challenging developments and technological maturity towards strategic swarm robotics systems. *Mar. Georesources Geotechnol.* **2019**, *37*, 525–538. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
25. Sollesnes, E.; Brokstad, O.M.; Vågen, B.; Carella, A.; Alcocer, A.; Zolich, A.P.; Johansen, T.A. Towards autonomous ocean observing systems using Miniature Underwater Gliders with UAV deployment and recovery capabilities. In Proceedings of the 2018 IEEE/OES Autonomous Underwater Vehicle Workshop (AUV), Porto, Portugal, 6–9 November 2018; IEEE: Piscataway, NJ, USA, 2018; pp. 1–5. [[Google Scholar](#)]
26. Li, M.; Hu, Y.; Lu, C.; Li, B.; Tian, W.; Zhang, J.; Mao, Z. Effect of hydrostatic pressure on electrochemical performance of soft package lithium-ion battery for autonomous underwater vehicles. *J. Energy Storage* **2022**, *54*, 105325. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
27. Zhao, Y.; Li, N.; Xie, K.; Wang, C.; Zhou, S.; Zhang, X.; Ye, C. Manufacturing of lithium battery toward deep-sea environment. *Int. J. Extrem. Manuf.* **2025**, *7*, 022009. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
28. Senthilkumar, S.; Go, W.; Han, J.; Thuy, L.P.T.; Kishor, K.; Kim, Y.; Kim, Y. Emergence of rechargeable seawater batteries. *J. Mater. Chem. A* **2019**, *7*, 22803–22825. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
29. Knyazhev, V.V.; Loshchenkov, V.V. Fuel cells for AUV power supply. In Proceedings of the 2024 International Conference on Ocean Studies (ICOS), Vladivostok, Russia, 8–11 October 2024; IEEE: Piscataway, NJ, USA, 2024; pp. 146–151. [[Google Scholar](#)]
30. Hasvold, Ø.; Størkersen, N.J.; Forseth, S.; Lian, T. Power sources for autonomous underwater vehicles. *J. Power Sources* **2006**, *162*, 935–942. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
31. Salazar, T.; Youngblood, S.; Park, S.-Y. Underwater environmental impact and thermal management of unmanned underwater vehicle Li-ion batteries. In Proceedings of the IECON 2021–47th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Toronto, ON, Canada, 13–16 October 2021; IEEE: Piscataway, NJ, USA, 2021; pp. 1–5. [[Google Scholar](#)]
32. Wang, X.; Wang, C.; Zhang, K.; Ren, K.; Yu, J. Development and core technologies of long-range underwater gliders: A review. *J. Mar. Sci. Eng.* **2025**, *13*, 1509. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
33. Sezgin, B. Development of Metal Hydride Coupled PEM Fuel Cell System. Ph.D. Thesis, Middle East Technical University, Ankara, Turkey, 2025. Available online: <https://open.metu.edu.tr/handle/11511/114537> (accessed on 4 December 2025).
34. Merckelbach, L.; Georgopoulos, P. A fuel cell power supply system equipped with artificial gill membranes for underwater applications. *Adv. Sci.* **2025**, *12*, 2410358. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]

35. Wang, M.; Han, F.; Li, H.; Zhou, J.; Wang, Z. Reliability and risk assessment of hydrogen-powered marine propulsion systems based on the integrated FAHP-FMECA framework. *J. Mar. Sci. Eng.* **2025**, *13*, 2115. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
36. Fält, A.; Lönnqvist, C.; Kindlundh, J.; Thomaszik, M.; Bolotas, M.A.; Kristoffersson, S.; Benke, V.A. *Fuel Cell Integration for the Long-Range Long-Endurance AUV LoLo*; Project Report; KTH Royal Institute of Technology: Stockholm, Sweden, 2025. [[Google Scholar](#)]
37. Akgun, I.; Dincer, I. Development of a smart powering system with ammonia fuel cells and internal combustion engine for submarines. *Energy* **2024**, *294*, 130747. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
38. Panda, S.; Hajra, S.; Oh, Y.; Oh, W.; Lee, J.; Shin, H.; Vivekananthan, V.; Yang, Y.; Mishra, Y.K.; Kim, H.J. Hybrid nanogenerators for ocean energy harvesting: Mechanisms, designs, and applications. *Small* **2023**, *19*, 2300847. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
39. Wang, X.; Yang, Y.; Yin, S.; Meng, X. An energy self-sufficient underwater profiling buoy powered by ocean thermal energy. *Pol. Marit. Res.* **2024**, *31*, 43–58. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
40. Khan, A.; Villar, S.G.; Lopez, L.A.D.; Almaleh, A.; Alqahtani, A.M.; Alnaimi, R.A. Underwater thermal energy harvesting: Frameworks, challenges, applications and future investigation. *IEEE Access* **2024**, *12*, 174371–174386. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
41. Yu, C.; Chen, Y.; Zhu, H.; Xiong, H.; Lunyang, L.; Xing, Y.; Zheng, G. Design and control strategy for a solar-powered autonomous underwater vehicle with an unconventional shape. *Pol. Marit. Res.* **2025**, *32*, 44–53. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
42. Bai, H.; Lu, T.; Liu, W.; Li, X.; Lv, W.; Lv, S. Maximizing underwater energy harvesting efficiency using flexible solar cells: A pathway to sustainable ocean power. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **2025**, *122*, e2423651122. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
43. Venkatesh, A.M.; Venkatesha Rishi, A.; Tineshkumar, S. Enhancing Submarine Endurance: Design and Optimization of a Solar-Powered Energy Harvesting System for Marine Applications. 2024. Available online: https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=4787035 (accessed on 4 December 2025).
44. Shapiro, D.; Duffy, J.; Kimble, M.; Pien, M. Solar-powered regenerative PEM electrolyzer/fuel cell system. *Sol. Energy* **2005**, *79*, 544–550. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
45. Zou, H.; Su, C.; Zhao, L.; Zhang, W.; Wei, K. Research progress of wave energy harvesting and self-powered marine unmanned electromechanical system. *Chin. J. Theor. Appl. Mech.* **2023**, *55*, 2115–2131. [[Google Scholar](#)]
46. Liu, C.; Chen, N.; Xing, G.; Chen, R.; Shao, T.; Shan, B.; Pan, Y.; Xu, M. A novel thermal tactile sensor based on micro thermoelectric generator for underwater flow direction perception. *Sensors* **2023**, *23*, 5375. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
47. Wang, C.; Liu, R.; Tang, A. Energy management strategy of hybrid energy storage system for electric vehicles based on genetic algorithm optimization and temperature effect. *J. Energy Storage* **2022**, *51*, 104314. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
48. Tian, W.; Wang, L.; Yu, J.; Lv, Y.; Zhang, S.; Xu, Q.; Gao, B. A hybrid impedance matching network for underwater acoustic transducers. *IEEE Trans. Power Electron.* **2023**, *38*, 7622–7633. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
49. Fini, A.S.; Gharehghani, A. Experimental investigation on the impact of high-pressure PCM-based thermal management on lithium-ion battery module performance. *Appl. Therm. Eng.* **2024**, *249*, 123420. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
50. Kanha, P.; Khuijat, K.; Devi, N.; Arpornwichanop, A.; Chen, Y.-S. Degradation analysis of an H₂/O₂ proton exchange membrane fuel cell with dead-end cathode and anode under long-term operation. *Int. J. Hydrogen Energy* **2025**, *147*, 149979. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
51. Petritoli, E.; Leccese, F. Autonomous underwater glider: A comprehensive review. *Drones* **2024**, *9*, 21. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]

52. Chen, X.; Yu, L.; Liu, L.Y.; Yang, L.; Xu, S.; Wu, J. Multi-objective shape optimization of autonomous underwater vehicle by coupling CFD simulation with genetic algorithm. *Ocean Eng.* **2023**, *286*, 115722. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
53. Yang, G.; Fan, X.; Li, R.; Zhang, X. State of charge estimation of lithium-ion battery for underwater vehicles using MM-UKF under hierarchical temperature compensation. *IEEE Access* **2024**, *12*, 95831–95845. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
54. Lu, D.; Lyu, G.; Yu, T.; Sheng, X.; Zhang, C.; Wang, Z. Research on energy system management and circuit optimization strategies for unmanned underwater vehicles. In Proceedings of the 2024 8th International Conference on Power and Energy Engineering (ICPEE), Chengdu, China, 20–22 December 2024; IEEE: Piscataway, NJ, USA, 2024; pp. 232–237. [[Google Scholar](#)]
55. Ouro-Koura, H.; Jung, H.; Li, J.; Borca-Tasciuc, D.-A.; Copping, A.E.; Deng, Z.D. Predictive model using artificial neural network to design phase change material-based ocean thermal energy harvesting systems for powering uncrewed underwater vehicles. *Energy* **2024**, *301*, 131660. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
56. Palmer, S.; Dillon, T.; Polagye, B. Techno-economic optimization of an offshore hybrid power system: Argentine Basin case study. In Proceedings of the 15th European Wave and Tidal Energy Conference, Bilbao, Spain, 3–7 September 2023; Volume 15. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]