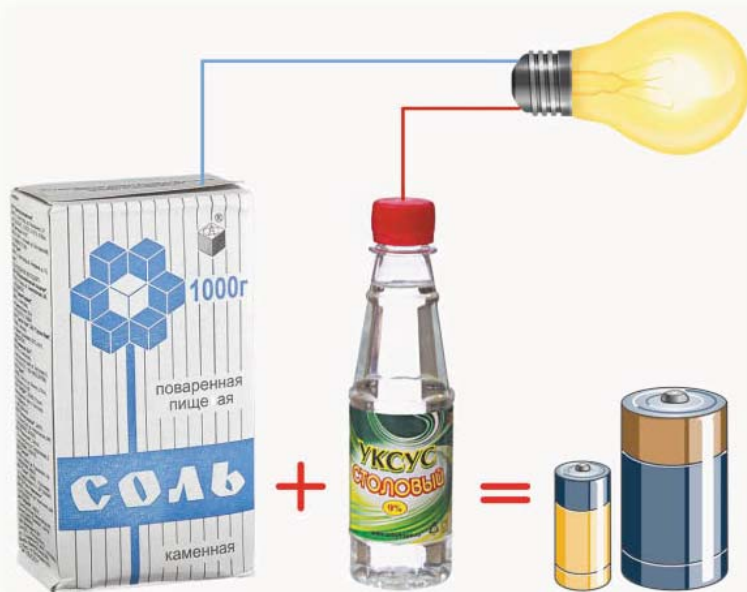


АПРЕЛЬ

КВАНТ

НАУЧНО-ПОПУЛЯРНЫЙ ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ



В номере:

УЧРЕДИТЕЛИ

Российская академия наук

Математический институт
им. В.А.Стеклова РАНФизический институт
им. П.Н.Лебедева РАНМосковский
физико-технический институт
Московский центр непрерывного
математического образования

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

А.А.Гайфуллин

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

**Н.Н.Андреев, Л.К.Белоухов,
М.Н.Бондаров, А.А.Варламов,
С.Д.Варламов, А.П.Веселов,
А.Н.Виленин, Н.П.Долбилин,
С.А.Дориченко, В.Н.Дубровский,
А.А.Заславский, А.Я.Канель-Белов,
П.А.Кожевников, С.П.Коновалов,
К.П.Кохась, А.А.Леонович, Ю.П.Лысов,
А.Б.Минеев, В.Ю.Протасов,
А.М.Райгородский, А.Б.Сосинский,
А.Л.Стасенко, В.Г.Сурдин,
В.М.Тихомиров, В.А.Тихомирова,
А.В.Устинов (заместитель главного
редактора), А.И.Черноуцан
(заместитель главного редактора)**

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

**А.В.Анджанс, В.И.Берник,
А.А.Боровой, В.В.Козлов,
С.П.Новиков, А.Л.Семенов,
С.К.Смирнов, А.Р.Хохлов**РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ
1970 ГОДА

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

И.К.КикоинПЕРВЫЙ ЗАМЕСТИТЕЛЬ
ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА**А.Н.Колмогоров****Л.А.Арцимович, М.И.Башмаков, В.Г.Болтянский,
И.Н.Бронштейн, Н.Б.Васильев, И.Ф.Гинзбург,
В.Г.Зубов, П.Л.Капица, В.А.Кириллин,
Г.И.Косоуров, В.А.Лешковцев, В.П.Лишевский,
А.И. Маркушевич, М.Д.Миллионщиков,
Н.А.Патрикеева, Н.Х.Розов, А.П.Савин,
И.Ш.Слободецкий, М.Л.Смолянский,
Я.А.Сморodinский, В.А.Фабрикант, Я.Е.Шнайдер**

- 2 Про запас... *А.Минеев*
14 Математика языка. *В.Успенский*

ЗАДАЧНИК «КВАНТА»

- 19 Задачи М2742–М2745, Ф2749–Ф2752
20 Решения задач М2730–М2733, Ф2737–Ф2740

«КВАНТ» ДЛЯ МЛАДШИХ ШКОЛЬНИКОВ

- 29 Задачи
30 Как коллега Спрудль дорожил памятью.
К.Кохась

КАЛЕЙДОСКОП «КВАНТА»

- 32 Одна задача по геометрической вероятности

КОНКУРС ИМЕНИ А.П.САВИНА

- 36 Задачи 29–32

ЛАБОРАТОРИЯ «КВАНТА»

- 37 Связанные маятники. *Е.Бутиков*

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТАТИВ

- 40 Космические парусники на световой тяге.
М.Никитин

НАМ ПИШУТ

- 43 Еще раз об огранке бриллианта. *М.Кухтин*

ОЛИМПИАДЫ

- 45 Олимпиада «Ломоносов». Физика
48 Ответы, указания, решения
Вниманию наших читателей (18, 44)

НА ОБЛОЖКЕ

- I *Иллюстрация к статье А.Минеева*
II *Коллекция головоломок*
III *Шахматная страничка*
IV *Прогрулки с физикой*

Про запас...

(о развитии систем накопления энергии)

А.МИНЕЕВ

В 2019 ГОДУ НОБЕЛЕВСКУЮ ПРЕМИЮ по химии получили Джон Гуденаф, Стэнли Уиттингем и Акира Ёсино за разработку литий-ионных аккумуляторов – одного из видов накопителей энергии, получивших в настоящее время широкое распространение. Подобные Нобелевские премии в области естественных наук вручаются нечасто. Эта премия присуждена за *революционное изобретение*, приносящее наибольшую пользу человечеству, а не за выдающееся *научное исследование* (как правило, присуждают именно за это).

Эта статья познакомит читателей с глобальными процессами, происходящими в области развития систем накопления энергии.

Производство электроэнергии и ее потребление всегда нуждались в устройствах, накапливающих излишки и затем, по мере надобности, отдающих энергию обратно. Хорошо известны колебания потребления электроэнергии в течение дня (утренний и вечерний пики), а также от сезона к сезону (зима – лето), которые желательно сглаживать накопителями энергии. С самых давних времен нам знакомы примеры использования преобразования предварительно накопленной потенциальной энергии в кинетическую – скажем, стрелы при стрельбе из лука или при перемещении по циферблату стрелок напольных часов (в них потенциальная энергия запасается при ручном поднятии гирек).

Происходящий в настоящее время поворот к все большему использованию возобновляемых источников энергии – ВИЭ (главным образом, энергии ветра и солн-

ца) сталкивается с проблемой принципиальной непредсказуемости их генерации во времени. В результате многократно увеличивается запрос на все более мощные системы накопления энергии. Это приводит к своеобразной мирной гонке в создании накопителей энергии, которые должны заполнить ниши в проблеме генерация-потребление: в быту, на транспорте, в промышленности и в целом по энергосистеме. О некоторых деталях этой увлекательной гонки и будет рассказано в статье. Но вначале прикинем – о какой суммарной энергии накопителей может идти речь в случае перехода на ВИЭ?

Нынешняя суммарная величина мощности, потребляемой человечеством, составляет 20 ТВт, прогноз на вторую половину 21 века оценивается в 30 ТВт. За год ($3 \cdot 10^7$ с) потребуется выработка энергии порядка 10^{21} Дж. Для суммарной требуемой мощности накопителей примем в качестве оценки значение 5–10 ТВт. Тогда для покрытия дневных колебаний потребления (1–3 часа) суммарная запасенная в накопителях энергия составит $(0,2 - 1) \cdot 10^{17}$ Дж. Если же потребуется запастись энергией на существенно больший срок (скажем, на месяц, ближе к сезонным колебаниям), то суммарная требуемая энергия накопителей может вырасти до $2 \cdot 10^{19}$ Дж.

Однако возможен ли полный переход электроэнергетики мира только на систему ВИЭ + накопители? Скорее всего, нет. По нашему мнению, она нуждается в «подушке» более традиционной энергетики – генерации на атомных электростанциях (АЭС) и на тепловых (ТЭС) при использовании энергии газа, нефти и каменного угля. К подобной подушке можно отнести

и использование гидроэлектростанций (ГЭС), хотя формально они относятся к возобновляемым источникам энергии. Очень важно, что современные тепловые электростанции, особенно использующие природный газ, обладают высокой маневренностью и способны быстро компенсировать дисбаланс между генерацией и потреблением энергии.

Прогнозный анализ оптимального соотношения между различными источниками энергии, проведенный российскими исследователями в 2014 году, привел к следующей оценке на конец 21 века: 40% – АЭС, 40% – ВИЭ (солнце, ветер, приливные электростанции), 20% – нефть, уголь, газ, гидроэнергетика. К похожему выводу в 2019 году пришли и эксперты из международного агентства по ядерной энергии. Они анализировали оптимальное соотношение между различными источниками энергии при наличии ограничений: на выброс парниковых газов (главным образом, углекислого газа) и на рост средней глобальной температуры на Земле (не более 2 °С). В выпущенном ими обзоре на конец 21 века приведена следующая ожидаемая структура энергетики: 30–40% – доля использования ветровой и солнечной генерации, 40–60% – доля АЭС и маневренных тепловых и гидроэлектростанций.

Присмотримся к динамике развития различных систем накопления энергии. Начнем с тех, с которыми все мы сталкиваемся в обычной жизни и которые «на слуху». Отметим, что, запасая энергию и затем отдавая ее обратно, накопитель суммарно все же является потребителем энергии. Поэтому очень важно добиваться высоко-го КПД накопителя, т.е. отдавать обратно почти столько же, сколько получено.

Литий-ионные накопители энергии

Как и в большинстве электрохимических накопителей энергии, набор элементов, из которых состоит литий-ионный (Li-ion) аккумулятор, стандартный: катод и анод, которые разделены сепаратором, пропитанным электролитом. Сложность заключается в подборе материалов катода, анода и типа ионов, перемещающихся от



Образцы зарубежных и российских литий-ионных накопителей

катода к аноду и обратно, с целью увеличения ресурса, безопасности и энергоемкости накопителя (последнее позволяет сделать накопитель более легким и удобным потребителям). Поиск нужных материалов, оптимально сочетающихся друг с другом, занял без малого 50 лет. В результате самому возрастному из лауреатов 2019 года, Д.Гуденафу, к моменту вручения премии исполнилось 97 лет, но он все же дождался и стал старейшим лауреатом в истории Нобелевских премий!

В современных конструкциях Li-ion аккумуляторов анод представляет собой пористый углерод (графит) на фольге из меди, катод – окись лития на фольге из алюминия, пористый сепаратор выполнен из полипропилена и пропитан электролитом. При заряде аккумулятора ионы Li^+ отделяются от молекул окиси лития и переходят на катод из углерода, а при разряде процесс идет в обратную сторону. Поясним масштаб произошедшей революции в использовании таких аккумуляторов на нескольких примерах.

- В 1991 году емкость всех Li-ion накопителей энергии была менее 130 кВт·ч (470 МДж), а через 30 лет их суммарная накопленная емкость превысила 500 ГВт·ч ($1,8 \cdot 10^{15}$ Дж) – рост в 4 миллиона раз (!).

- Первые Li-ion аккумуляторы применялись только в небольших приборах (сотовые телефоны, цифровые фотоаппараты и видеокамеры, ноутбуки). Постепенно область их использования расширилась и включила электротранспорт (скутеры,

электрокары, электромобили). Их общая емкость в электромобилях достигла 300 ГВт·ч и уже превысила емкость аккумуляторов бытовой электроники. В последнее время сборки из множества отдельных Li-ion аккумуляторов вышли на уровень промышленной энергетики. Так, в Австралии компания Tesla уже построила большую Li-ion аккумуляторную батарею (476 блоков, в каждом 16 аккумуляторов) суммарной емкостью 100 МВт·ч ($3,6 \cdot 10^{11}$ Дж) и официально подключила ее к энергосети. Компания Tesla проработала технологию создания гигафабрик систем хранения энергии в Li-ion аккумуляторах, расположенных рядом с электростанциями на основе солнечных панелей. В настоящее время такие гигафабрики сооружаются в США, Китае и Германии. В России к созданию первой очереди подобной Li-ion гигафабрики в Калининграде на мощность 4 ГВт·ч в год приступил «Росатом».

- По сравнению с обычно используемыми в автомобилях свинцово-кислотными аккумуляторами литий-ионные обладают существенно большим удельным запасом энергии (40 Вт·ч/кг у свинцово-кислотных против 250 Вт·ч/кг у литий-ионных). Это делает их значительно более легкими и компактными.

- Ресурс литий-ионных аккумуляторов существенно больше, чем у свинцово-кислотных ($(5-10) \cdot 10^3$ против $(1-1,5) \cdot 10^3$).

- КПД литий-ионных аккумуляторов довольно высок – до 95–97%.

Несмотря на то, что стоимость Li-ion аккумуляторов пока превышает свинцовые, по совокупности (с учетом ресурса, КПД, компактности и других характеристик) переход на литий уже в настоящее время оказывается предпочтительнее.

Казалось бы, большинство проблем с производством литиевых аккумуляторов решено, а запасы лития в земной коре и в океанах достаточно велики. Однако экологические риски, относящиеся к добыче лития и производству литий-ионных аккумуляторов, могут со временем все более ограничивать даль-

нейшее развитие этой технологии. Отметим в этой связи несколько проблем.

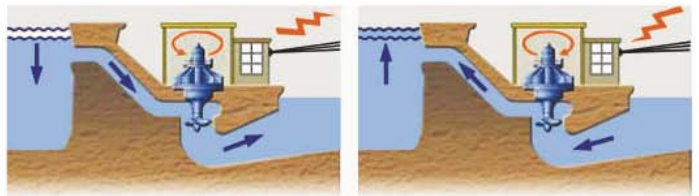
- Для получения одной тонны этого металла требуется переработать 50 тонн породы сподумен или 750 тонн солевого раствора, содержащего литий. Очистка их от примесей возможна только химическим путем. Порода или раствор после извлечения лития больше не используют, выливая тонны отработанного химического рассола на землю.

- Емкость аккумуляторов современных электромобилей приближается к 100 кВт·ч. При производстве 1 кВт·ч мощности Li-ion батареи в атмосферу выделяется порядка 150–200 кг углекислого газа. В результате оказывается, что новенький электромобиль (еще без пробега!) уже на стадии изготовления загрязнил атмосферу 15–20 тоннами CO₂. А ведь при работе обычного автомобиля с бензиновым двигателем такое же количество углекислого газа выделяется при пробеге в 100 тысяч километров.

В последнее время активно исследуются натрий-ионные аккумуляторы, которые пока уступают более отработанному литий-ионным, но в перспективе имеют преимущества (натрий по стоимости на два порядка дешевле лития и не так химически активен).

Гидроаккумулирующие электростанции – ГАЭС

Для ГАЭС необходимы два резервуара воды: верхний и нижний. Принцип действия гидроаккумулирующих электростанций при выдаче энергии в сеть близок к работе гидроэлектростанций (ГЭС): вода из верхнего резервуара вращает турбину и вырабатывается электроэнергия. В то же время



Принцип работы ГАЭС. Слева – в качестве генератора энергии (турбинный режим), справа – накопителя энергии (насосный режим)

ГАЭС может работать и в обратную сторону (как накопитель энергии), при этом двигатель закачивает воду из нижнего резервуара наверх. Потенциальная энергия поднятой наверх воды $W = mgh$ (h – высота верхнего резервуара относительно нижнего) затем снова вращает турбину и т.д.

В мире развитие ГАЭС в целом практически вышло на стационар (исключение – Китай и Россия, потенциал развития ГАЭС в которых еще не исчерпан). Во многом это связано с конкуренцией за место для строительства новых станций, большим сроком строительства и влиянием «зеркала» водохранилища на экологию. В результате можно сказать, что наиболее удачные решения по выбору мест и строительству ГАЭС уже были приняты в прошлом и подходящих территорий для сооружения новых все меньше.

Однако, с гидроаккумулирующими станциями ситуация иная. В случае ГАЭС нет необходимости перекрывать плотиной русла рек и можно сделать существенно более компактную систему замкнутого цикла, включающую верхний и нижний резервуары, двигатели и турбины. В 2019 году

опубликован атлас возможных мест расположения ГАЭС в мире (их оказалось более пятисот) и было оценено, что суммарная запасаемая энергия таких потенциальных ГАЭС превышает 20 миллионов ГВт·ч (!). Это означает, что если удастся освоить хотя бы небольшую часть от указанной суммарной потенциальной энергии, то ГАЭС могут обеспечить мировые потребности в накопителях. Однако, реальные темпы строительства новых ГАЭС пока довольно низки и сильно отстают от темпов развития ВИЭ.

Для того чтобы дать представление о проблемах, связанных с созданием ГАЭС, приведем пару примеров таких гидроаккумулирующих станций – Голдисталь в Тюрингии (Германия) и Загорской в Подмосковье. На приведенном (на с. 6) рисунке видны верхний и нижний резервуары воды, а также шлюзы, их соединяющие. Важно, что обе станции удачно вписаны в природный ландшафт. Некоторые параметры этих станций приведены в таблице.

По сравнению с Li-ion аккумуляторами у ГАЭС запасаемая энергия и мощность гораздо выше, больше ресурс, но ниже

	ГАЭС Голдисталь	Загорская ГАЭС
Верхний резервуар		
Запас воды, млн м ³	12	22
Площадь «зеркала воды», гектар	55	260
Глубина воды в резервуаре, м	20	9
Нижний резервуар		
Запас воды, млн м ³	19	34
Энергетические характеристики		
Разница высот до турбин, м	340	100
Потенциальный запас энергий, ГВт·ч	10	6
КПД	85%	75%
Выработка электроэнергии, ГВт·ч	8,5	4,5
Время сброса воды, ч	8	4



ГАЭС Голдисталь, Тюрингия, Германия



Загорская ГАЭС, Московская область, Россия

КПД (порядка 75 – 85%). К настоящему времени построены ГАЭС с очень высокой мощностью (наиболее крупные: Фэннин, 3600 МВт, 40 ГВт·ч, Китай; Бас Каунти, 3000 МВт, 24 ГВт·ч, США). Общее количество ГАЭС в мире около 500, их суммарная мощность более 300 ГВт. Строят надземные (такие, как упомянутые выше Голдисталь и Загорская), полуподземные (Бас Каунти) и подземные (Динорвик, 1800 МВт, 9 ГВт·ч, Великобритания; Фэннин, Китай). Запас энергии $W = mgh$ в ГАЭС происходит в основном за счет подъема массы воды (m). Тем не менее, строятся и станции с очень высоким напором, $h = 380$ м (Бас Каунти) и даже $h = 750$ м (Лаго Делио, 1040 МВт, Италия).

Главное достоинство ГАЭС – возможность быстрого реагирования на изменение потребления энергии. Указанное в таблице значение времени сброса всей воды из верхнего резервуара составляет часы, но на полную мощность они могут выходить за минуты или десятки минут. Характерный режим работы крупных ГАЭС:

накопление энергии ночью (в период минимального потребления энергии), генерация – днем.

Основные недостатки ГАЭС связаны с отчуждением больших площадей, длительным периодом сооружения и дороговизной. При этом необходимы особые площадки с большим перепадом высот и местом для водохранилищ. На территории ГАЭС меняется ландшафт и уровень грунтовых вод, происходит большое испарение воды... В результате выбор площадки для строительства каждой новой ГАЭС является сложным компромиссом между мнением населения территории и нуждами региона и страны в целом.

Гравитационные накопители энергии

Простейший пример гравитационного накопителя – часы с гирями. Энергия, запасенная при поднятии гири, расходуется, приводя в движение часовой механизм. В отличие от метода гидроаккумуляции, использующем течение воды, гравитационный накопитель может экономнее использовать отведенную площадь, наименьшую – в случае, когда грузы поднимаются и



Настенные часы с гирями