



## Глава 12. Сто процентов возобновляемых.

В поле сеяли. Душный стоячий воздух был пропитан крепкой смесью запахов, разило потом, бродилом, гниющими злаками. Утренний урожай толстым слоем был навален вдоль борозды, зерно уже тронулось. Над горшками с закваской толклись и крутились тучи рабочих мух, и в самой гуще этого чёрного, отсвечивающего металлом круговорота стоял староста и, наклонив голову и прищурив один глаз, внимательно изучал каплю сыворотки на ногте большого пальца. Ноготь был специальный,

плоский, тщательно отполированный, до блеска отмытый нужными составами. Мимо ног старосты по борозде в десяти шагах друг от друга гуськом ползли сеятели. Они больше не пели, но в глубине леса все еще гукало и ахало, и теперь было ясно, что это не эхо.

— А. и Б. Стругацкие «Улитка на склоне»

Примерно с 2005 года на просторах Интернета появилась новая мантра: «Сто процентов энергии из возобновляемых источников». Пишут и политики, и зелёные. Знаете, а я согласен. Сто процентов из возобновляемых — вполне достижимо. Вопрос только в том, какова абсолютная величина этих ста процентов и каков при этом будет средний уровень жизни.

Дэйвид Мак-Кей в книге *«Возобновляемая энергия без вранья»*[25] попробовал оценить, что получится в цивилизованной Великобритании, если перейти на 100% возобновляемых. Всё приводить здесь не буду, в книге почти 400 страниц. Читайте по-английски, а для умеющих в мову камарад Андрій Копец даже сделал укороченный перевод и вроде бы скоро выпустит полный.

Для начала, Мак-Кей оценивает потребление британского «среднего класса» — а там сейчас большинство «средний класс» и есть. В качестве единицы мощности в книге выбран 1 кВт·ч/сутки. Такая единица понадобилась для лучшего охвата аудитории: британцы, как и россияне, платят за киловатт-час, оттого понятнее. Читателей этой книги физика не пугает, поэтому сразу перевожу в простые ватты, поделив на 24 и домножив на 1'000.

Итак, средний британец хорошо кушает (2'700 ккал, 280 г мяса или птицы в сутки), элегантно одевается («сделано в Китае»), ездит в личном автомобиле (изредка пользуясь общественным транспортом), один раз в год летает куда-то полежать под более интенсивным солнышком. Некоторые британцы летают на боевых вертолётах, гоняют на полицейских «перехватчиках» или возят пациентов на «скорых» — то есть обеспечивают остальным порядок и покой. Пресная вода считается поступающей с неба бесплатно — на дождливых островах вполне нормальное допущение. Что получилось у автора, приведено в таблице.

Потребляемая британцами мощность — 8'150 ватт на человека. Примерно

столько же в других странах Северной Европы: Германии, Франции, Австрии, Голландии... В Норвегии, США, Канаде потребление почти вдвое выше. Для сравнения: во второй главе мы подсчитали, что в 2015 году 7.35 миллиарда землян потребляли 18.5 тераватт мощности из источников с низкой энтропией плюс как минимум 8.5 ТВт в виде продовольствия, то есть по 3'670 Вт на душу. Средний землянин потребляет сейчас вдвое меньше, чем средний британец.

Вид расходов энергии	Мощность, Вт
В виде предметов потребления (в основном, импорт из Азии)	2'000
Личный и общественный транспорт	1'670
Обогрев и кондиционирование воздуха в помещениях; приготовление пищи, подогрев воды	1'540
Туризм	1'250
Продовольствие и затраты на сельское хозяйство, в т.ч. удобрения	625
Грузовые перевозки всеми видами транспорта	500
Электроника, средства связи, Интернет	210
Освещение улиц и помещений	170
Оборона, полиция, гражданские службы	170
Образование	15
<b>ИТОГО:</b>	<b>8'150</b>

Далее Мак-Кей принимается оценивать максимальное производство энергии из возобновляемых источников на территории Соединённого Королевства. Сначала вообразим, что в нашем распоряжении неограниченное количество стали, редких элементов для солнечных батарей и других ресурсов. Сколько можно произвести энергии на одного британца? Вычисление получилось такое:

Вид энергии	Мощность, Вт
Солнечные батареи в сельской местности (5% территории островов)	2'080
Продовольствие и биотопливо	1'625
Ветряные электрогенераторы на шельфе глубже 25 м	1'330
Ветряные электрогенераторы в сельской местности	830
Ветряные электрогенераторы на шельфе мельче 25 м	670
Солнечные водонагреватели на крышах	540
Приливная энергия	460
Солнечные батареи на крышах (по 10 м² на душу)	210
Волновая энергия	170
Гидроэнергетика	60
Геотермальная энергия	40
<b>ИТОГО:</b>	<b>8'040</b>

Внимательные читатели наверняка заметят в таблице перекося в сторону ветровой и приливной энергетики. Ничего удивительного: речь идёт о конкретных Британских островах, с конкретной территорией и береговой линией. Ветра Бог дал вдоволь, вулканами и полноводными реками – обидел.

Автор неоднократно подчёркивает, что таблица для потребления – намеренно заниженная, а для производства – всё по максимуму. Если принять числа как есть, британцы при переходе к 100% возобновляемой энергии смогут сохранить существующий высокий уровень жизни. Скажем, летать ежегодно не на Мальдивы, а в Болгарию, сэкономив 110 ватт, вот и уложились в 8'040. Примерно так художник представляет центр Лондона, когда уложится:



Далее Мак-Кей переходит от максимальных оценок производства к реальным. Внезапно оказывается, восемь киловатт на душу произвести из возобновляемых источников никак не получается. Спросим экспертов:

- **ИЕЕ** – «Британское Общество Инженеров – Энергетиков» в 2002 году оценило потенциал Британских островов по возобновляемым источникам в 1'130 ватт на душу населения;
- **Центр стратегических исследований Тайнделла** в 2007 – 660 ватт;
- **IAG** – межотраслевая аналитическая группа Правительства Великобритании считала только энергию по цене не более 7 пенсов за кВт·ч (в ценах 2003 года). Получилось всего 490 ватт;
- **PIU** – «Центр инновационных исследований Великобритании», в 2002 обещал 2'350 ватт на душу из возобновляемых к 2020 году;

- САТ – «Центр Альтернативных Технологий» в 2007 представил доклад «Остров Британия» под редакцией Хельвига-Ларсена и Булла: 2'000 ватт на душу.<sup>144</sup>

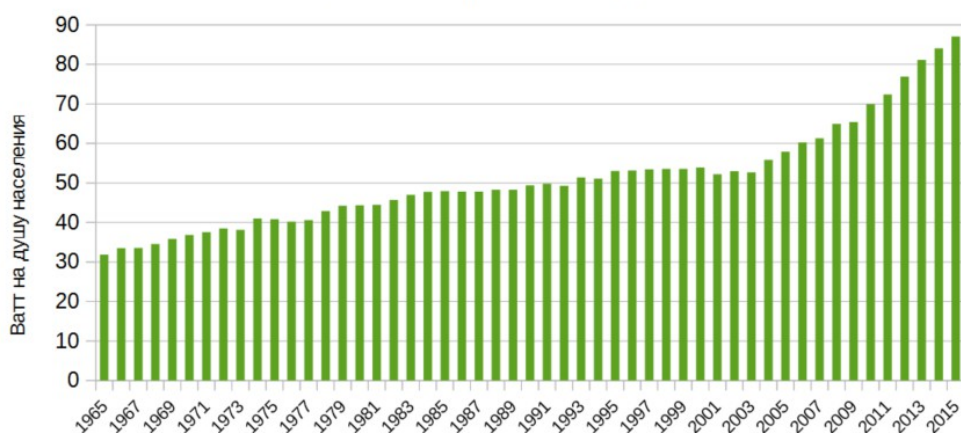
Все четыре организации не учитывали продовольствие, следовательно, для правильного сравнения, следует увеличить числа на 625 Вт. Оптимистическая оценка РІУ, таким образом, 2'975 Вт, то есть на 60% ниже оценки Мак-Кея.

Центр Тайнделла отмечал, что даже для выработки 660 ватт на душу придётся напрягаться. Производство из возобновляемых источников (включая биомассу) в Великобритании 2006 года – 34 Вт на нос. От ядерных станций получали 142 Вт, остальное, в порядке возрастания: уголь, нефть, природный газ.

Большая работа и времени требует немало. В 2002 «Общество Инженеров-Ядерщиков» доклад РІУ раскритиковало в пух и прах – не за абсолютные значения, а за сроки: 2020 год – совершенно нереалистичен. И как в воду глядели: с момента доклада прошло 15 лет, в 2017 Великобритания произвела из возобновляемых... 170 ватт на душу. В отместку, зеленые лирики перекричали ядерных физиков: субсидии срезали, и производство электроэнергии на атомных станциях сократилось до 120 ватт на британца. Впрочем, в целом по планете ситуация ещё хуже.

## Производство энергии из возобновляемых источников

(включая гидро и биомассу)



Самые оптимистичные прогнозы едва дотягивают до  $\frac{1}{3}$  требуемой мощности и меньше чем текущее среднедушевое потребление на планете. Отчего такая

<sup>144</sup> Для полноты картины сравним оценку Мак-Кея и оценки экспертов с максимальной теоретической и технически-осуществимой выработкой из возобновляемых источников, посчитанных нами в главе 2. Если на каждого из 7.4 млрд жителей Земли вырабатывать 8 кВт, общая мощность 59 ТВт. Если вырабатывать 2.0 кВт, как в оценке САТ, – получается 14.8 ТВт. Наши оценки, включая продовольствие:  $56 \pm 5$  и  $13 \pm 1$  соответственно.

разница с максимальной оценкой? Рассмотрим только первые три строчки таблицы производства. Закатать 5% территории Британии в солнечные панели при использовании современных технологий нереально. Во всех месторождениях Земли просто нет такого количества редких элементов<sup>145</sup>, например, галлия для этих батарей.

Кое-где ведутся исследования по замене редкоземельных на дешёвую серу, а перцы уже вопят, что редкоземельные «скоро» станут не нужны. Ну, «скоро» у перцев – это лет пятьдесят минимум. А скорее – никогда. Бесплатный сыр бывает только в мышеловках: солнечные панели с серой имеют КПД в десятые доли процента, и над ними учёные бьются с начала прошлого века. Между делом, в 2011 году, единственный на планете серьёзный производитель галлия (имеется в виду добыча, а не переработка старой электроники) – КНР – вдруг заявила: «Конец экспорта, самим мало».

Более того, Солнце, конечно, светит миллиарды лет, а вот солнечная панель работает 20-30. Каждые 25 лет каждый британец должен будет оплатить установку новых панелей. Ну, или более реально: покупать по 10 м<sup>2</sup> новых солнечных панелей ежегодно. Трата, сравнимая с покупкой микролитражки.

Установка ветряных турбин на шельфе Северного моря потребует не менее 60 миллионов тонн стали. Для сравнения, все нефтегазовые платформы Северного моря, со всеми трубопроводами и прочей инфраструктурой – всего 8 миллионов тонн. За пять лет Второй Мировой, американские судостроительные компании спустили на воду 2'751 сухогруз класса «Либерти» – строили быстрее, чем немецкие подводные лодки успевали топить. Общая масса стали в пароходах – 19 миллионов тонн.

Однако и ветряная турбина в море работает вечно лишь во влажных мечтах перцев. Реальный срок службы – те же 30 лет или меньше. Уже сейчас по всей Европе часть ветряков простаивает – нет запчастей. Значит, после постройки турбин Британии потребуется ежегодно скармливать на нужды ветроэнергетики не менее 2 миллионов тонн новой стали.

Ну и биотопливо. В США, Аргентине, Австралии – процесс уже идёт. Сахарный тростник и кукурузу перерабатывают в этанол, рапс – в биодизель. Площадь Великобритании невелика – всего 44 сотки на душу населения, включая и сельхозугодья, и городскую застройку, и бесплодные скалы. Лишней земли просто нет, да никто и не отдаст.

Какой уровень жизни получится, если ограничиться 2'650 ваттами на человека в день? «Сходите поглядеть в Бразилии» – не предлагать. Климат не тот. Напомню, всё исследование ведётся для конкретной страны в конкретных

---

145 «Кларки», то есть концентрация элементов в земной коре – достаточно велики. К сожалению, «редкие земли» с большой неохотой собираются в коммерческие месторождения, из которых их можно было бы добыть без огромных энергетических затрат. Писатели-фантасты много писали про добычу редкоземельных (ну и золота заодно) – прямоком из морской воды. Технически это реализуемо, нужна лишь «мелочь»: бесконечный источник дешёвой энергии, вроде управляемого термоядерного синтеза.

географических условиях.

Вид расходов энергии	Потребле- ние в 2010 году	Сокраще- ние, %	Мощность, Вт
В виде предметов потребления	2'000	80	400
Только вело- и общественный транспорт	1'670	85	250
Обогрев воздуха в помещениях; приготовление пищи, подогрев воды	1'540	20	1'230
Туризм	1'250	100	0
Продовольствие и затраты на сельское хозяйство, в т.ч. удобрения	625	20	500
Грузовые перевозки всеми видами транспорта	500	90	50
Электроника, средства связи, Интернет	210	90	20
Освещение улиц и помещений	170	91	15
Оборона, полиция, гражданские службы	170	0	170
Образование	15	0	15
<b>ИТОГО:</b>	<b>8'150</b>	<b>67%</b>	<b>2'650</b>

Туризм убираем начисто: фиг с ней, с Болгарией, дома позагораем. Про личные автомобили придётся забыть и пересесть на велосипеды, автобусы, электрички, сократив расходы энергии на 85%. Аналогично поступаем с грузовыми перевозками, средствами связи, освещением, сокращая на 90%. На улицах будет темно, как в 1940. Категорически не сокращаем образование, а то население примется расти, и 2'650 Вт на душу никак не удержать. Чем нельзя поступиться? Примерно 1/5 предметов потребления, обогревом, продовольствием. Британия – не Бразилия, зимой бывает прохладно. Сколько отнимать у военных и полиции – решайте в меру вашей веры в добропорядочность среднего британца и соседей за Каналом. Много там экономить не удастся.

Уровень мирной жизни исключительно на возобновляемых источниках энергии соответствует скудной, пайково-голодной, воюющей Британии образца 1916 или 1941 годов.<sup>146</sup>



<sup>146</sup> На врезке инструкция зажиточным британцам: (1) Не используй автомобиль или мотоцикл для развлечений. (2) Не покупай новой одежды без особой необходимости. Не стесняйся носить старую одежду во время войны. (3) Не нанимай лишней прислуги. Подавай пример. Ты экономишь деньги и рабочую силу на нужды обороны. СТРАНА БУДЕТ ТЕБЕ БЛАГОДАРНА.

Мак-Кей предложил 5 вариантов развития британской энергетики с целью вывести производство электроэнергии на уровень не ниже 2'100 Вт на душу населения. Если ниже, просто загнутся остатки промышленности, а вслед за ней – и любые перспективы. Как у хорошего оператора мобильной связи, планы не по номерам, а по названиям.

**План «Домашний».** Ветровые генераторы с установленной мощностью до 100 ГВт и средней выработкой 330 Вт на душу потребуют 10 лет и 50 морских подъёмных кранов для установки платформ, аналогичных добычным в Северном море (в наличии сейчас полтора крана, правда). Кроме ветряков, потребуются нагнетательные станции на 400 ГВт·ч (сейчас в наличии 30). Солнечные панели из расчёта 20-30 м<sup>2</sup> на каждое домовладение (все южные скаты крыш под солнечными батареями) дадут в среднем 125 Вт на душу. Сжигание твёрдых бытовых отходов: 3.25 ГВт установленной мощности дадут 55 Вт. Волновые станции вдоль атлантического побережья: 5 ГВт установленной, 85 Вт на душу. Достроить, наконец, приливную станцию в заливе Сванси Бэй<sup>147</sup>, да к ней ещё две-три такие же: 154 Вт. Гидроэнергетика уже есть: 8 Вт. Итого из возобновляемых 760 Вт. Внимание: нужны «чистые» угольные станции (на импортном угле) и ядерные станции: по 40 ГВт установленной мощности, с выработкой по 670 Вт на душу.

**План «Для путешествий».** Ветряков в Северном море построить «всего» 25 ГВт, с выработкой 80 Вт на нос. В Ливии(!) арендовать пять площадок размером с Лондон (45 км в диаметре) создав на каждой огромную солнечную электростанцию. Через Средиземное море и далее через Францию проложить высоковольтные ЛЭП общей мощностью (в пике) до 50 ГВт. (На сегодняшний день все кабели между Великобританией и Францией – 2 ГВт). Фермы обеспечат в среднем 830 Вт на душу. Ну и далее по списку, кроме волновых – не будем портить пляжи! Сжигание твёрдых бытовых отходов: 2.75 ГВт установленной мощности дадут 45 Вт. Приливная в Сванси Бэй: 45 Вт. Гидроэнергетика уже есть: 8 Вт. Итого из возобновляемых 1'000 Вт. Внимание: опять-таки «чистые» угольные станции на 40 ГВт установленной и ядерные на 25, с выработкой по 670 и 430 Вт на душу, соответственно. Преимущества плана: для тех, кто не хочет портить британскую природу. Недостатки: повторяем, солнечные батареи – в Ливии.

**План «Безъядерный».** Точно как «Домашний», только вместо ядерных станций – солнечные батареи в Ливии, как в плане «Для путешествий». Недостатки обоих планов в наличии, преимуществ вроде нет.

**План «Зелёный».** Опять-таки берём «Домашний» за основу, сносим и уголь, и ядерные станции. В Ливии разворачиваем всего две площадки вместо пяти, увеличиваем на 50% волновую энергетику... Остальное должно прийти в виде ветра! Придётся построить вокруг Великобритании 400 ГВт установленной мощности ветряков. Это примерно сколько всё мире есть в 2015 году. Кроме ветряков, понадобятся резервуары на 1'500 ГВт·ч, то есть каждое озеро и

---

147 О ней речь была во второй главе.

вообще чуть ни каждую лужу Британии придётся перегородить плотинами с нагнетательными станциями.

Наконец, план «**Экономический**». Если поставить себе целью обеспечить 2'100 Вт на душу наиболее экономичным способом, выиграют, как ни странно, ядерщики! 110 ГВт установленных реакторов обеспечат 1'830 Вт на душу населения. Из возобновляемых нужно всего 270 Вт, из которых к 2015 году 150 уже в кармане. Осталось достроить чуть-чуть ветровых, ту же приливную станцию в Сванси Бэй, да мусоросжигатели.

Заметим, все пять планов, как бы фантастически они ни звучали, с точки зрения инженера – профессор Мак-Кей преподаёт инжиниринг и физику в Кембриджском университете – вполне реализуемы. Вопрос лишь в масштабах строительства и неимоверном ценнике. В Британии, как в России, много любителей потолковать о «переходе к солнечной энергетике», но отчего-то когда доходит до чисел – политики теряются. Прочитируем Д.Мак-Кея:

*Не удивлюсь, если вам не нравятся мои планы. В каждом из них есть что-то отвратительное. Сделайте собственный план, который вам по вкусу. Но сделайте свой план так, чтобы ваши числа были (а) достаточны и (б) физически реализуемы.*

Все пять планов предполагают, что средний британец перестанет летать в отпуск на Багамы (и даже в Болгарию), перейдёт на вегетарианское питание три дня в неделю (один день рыбный), станет ездить на работу исключительно общественным транспортом (или на велосипеде) и вообще перестанет покупать дешёвое, но бесполезное барахло.

Мак-Кей предлагает ряд мер, как смягчить переход на низкий уровень потребления.

**1. Пассажироперевозки наземным транспортом.** Следует учитывать не только расход топлива на единицу пробега, но и затраты энергии на создание, ремонт, утилизацию транспортных средств, а также на поддержание инфраструктуры. Даже велосипед не перевозит седока бесплатно – истираются шины, изнашивается механизм, да и вращающему педали седоку требуется больше калорий. Общие расходы pedalного транспорта составляют 1-2 кВт·ч на 100 пассажиро-километров.

Магической серебряной пули под названием «сверхэкономичный автомобиль» в природе не существует. Иногда для студентов устраивают соревнования типа «максимальный пробег на 1 литре топлива» или «на солнечной энергии через Австралию». В рамках «*Экологического марафона Шелл*» в 2005 году творение студентов из Цюриха «*RAC Car II*» накрутила на 1 грамме водорода по идеально горизонтальному автодрому 20.6 км (дистанция совсем не автомобильная и даже не марафонская) со средней скоростью 30 км/ч. Автомобиль на велосипедных колёсах вёз одного пилота: студентку с массой тела около 45 кг. Для обучения будущих инженеров понятию «инженерный компромисс», а также мастерить руками – сгодится. Практический транспорт?



Ну что вы! Из-за умопомрачительного «пробега между техобслуживаниями» 80 км, стоимость 100 пассажиро-километров на этой штуке оценивается в 2'000-3'000 кВт·ч, не хуже, чем у гоночных болидов «Формула-1».



«Омагничивание бензина» и прочие торсионные поля оставим лохам.

Перспективными с точки зрения экономии энергии являются, в порядке приоритетов: (а) уменьшение веса транспортных средств по отношению к весу пассажиров, (б) снижение потерь за счёт более ровного пути и оптимизации перекрёстков, (в) рекуперация энергии при торможении, (г) оптимизация заполненности транспорта, (д) оптимизация скорости транспортного потока.

Электрические автомобили, например, более эффективны, чем бензиновые, если считать по текущей стоимости киловатт-часов, полученных из сети против стоимости бензина на заправке. Однако если учесть эффективность сжигания угля на тепловых станциях, потери при передаче энергии, потери при зарядке батарей, расходы на добычу лития, более короткий срок жизни электрического авто в целом, и прочие факторы – получаются сравнимые показатели: от 40 до 200 кВт·ч на 100 км пробега в зависимости от класса автомобиля и состояния проезжей части.

Какое-то время в Великобритании был популярен электромобиль индийского производства «REVAi», он же «G-Wiz». Британцы описывали его как «тележку для гольфа, которой разрешили ездить по дорогам». В России тележки для гольфа не особо известны, поэтому лучше описать машинку как «электрическую инвалидку». Для сравнения возьмём увековеченную Моргуновым «С3А», так как идеально соответствует «G-Wiz» по габаритам;

более современные «СЗД» и «Ока» – несколько длиннее и шире.

		
<b>СМЗ-СЗА (1958-1970)</b> Длина: 2625 мм Ширина: 1316 мм Масса пустой с горючим: 430 кг Максимальная перевозимая масса: 200 кг (2 взрослых) Замеренный расход энергии (бензин) по городу: 40 кВт·ч / 100 км Срок службы номинальный: 5 лет Расход энергии полный (оценка): 45 кВт·ч / 100 км	<b>REVAI/G-Wiz (2001-2012)</b> Длина: 2600 мм Ширина: 1300 мм Масса пустой с батареями: 640 кг Максимальная перевозимая масса: 270 кг (2+2) Расход энергии (электрич.) по городу: 20 кВт·ч / 100 км Срок службы номинальный: 8 лет Расход энергии полный (оценка): 45 кВт·ч / 100 км	<b>Mahindra e20 (2013-ещё да)</b> Длина: 3280 мм Ширина: 1514 мм Масса пустой с батареями: 830 кг Максимальная перевозимая масса: 360 кг (4 взрослых) Расход энергии (электрич.) по городу: 22 кВт·ч / 100 км Срок службы номинальный: 8 лет Расход энергии полный (оценка): 50 кВт·ч / 100 км

Как видим, инвалидка 1958 года с прожорливым двухтактным мотоциклетным мотором вполне сравнима со «сверхэкономичной» индийской машинкой. О комфорте и безопасности обоих говорить не приходится. В 2010 году «G-Wiz» погубила видного британского специалиста в области строения белков доктора Джудит Надал<sup>148</sup>. Сейчас G-Wiz уже сняли с производства, заменив на «e20». Последняя находится в той же лиге, что и остальные электромобили своего класса: более 3 метров в длину, 50 кВт·ч на 100 км пробега. Британские учёные покупать новинку не спешат: к 2015 году продано не более 1500 единиц.

Для сравнения, сильно распиаренный «Тесла» потребляет (по городу) 25-30 кВт·ч на 100 км, если считать «из розетки». С учётом стоимости производства автомобиля с цельно-алюминиевой рамой, технического обслуживания электродвигателей и, особенно, стоимости замены 7104 (sic!) литий-ионных батареек Panasonic 18650, энергетическая эффективность «Теслы» сопоставима с бензиновыми аналогами: около 65 кВт·ч на 100 км. Кстати, по данным самой «Панасоник»<sup>149</sup> номинальная ёмкость батарейки 2.7 А·ч при напряжении 3.6 В, то есть номинальный запас энергии в «Tesla-85 кВт·ч»  $2.7 \cdot 3.6 / 1000 \cdot 7104 = 69$  кВт·ч. Откуда взялись «85 кВт·ч»? По паспорту, батарея требует примерно столько или чуть больше для зарядки:

148 <http://www.standard.co.uk/news/i-think-ive-made-a-mistake-last-words-of-scientist-on-phone-before-g-wiz-crash-6438558.html> Надо сказать, Надал была сама виновата в происшествии – разговаривала по мобильнику за рулём и въехала на перекрёсток под красный сигнал. Машинку G-Wiz буквально «размазало по асфальту». Водитель ударившей «Шкода-Октавия» Марсель Жоржэ – отделался синяками.

149 <https://industrial.panasonic.com/cdbs/www-data/pdf2/ACI4000/ACI4000C12.pdf>

**Panasonic** Lithium Ion  
**NCR18650PF**

коммерческих солнечных панелей. Тогда в день можно выработать в среднем (лето-зима, солнечно-пасмурно) около 30 кВт·ч электроэнергии, значит в день можно проезжать 60 км. Вполне достаточно, чтобы ездить на работу и за покупками, а если не шиковать, останется на кондиционеры, холодильники и прочую домашнюю «роскошь». На широте почти бесснежного, но пасмурного Лондона, имея реалистические по мнению автора 10 м<sup>2</sup> солнечных панелей и учитывая погодные условия, дневная выработка около 5 кВт·ч, а на нужды личного транспорта с учётом ветровой энергетики можно выделить  $0.25 \cdot 24 = 6$  кВт·ч (смотрим таблицу выше). Тогда средний дневной пробег автомобиля класса «инвалидка» 13 км, класса «Тесла» – 9 км. Электромобиль превращается из средства передвижения в игрушку: поездка раз в неделю летом на дачу или типа того. На широте Москвы и выше никто от солнечных панелей и ветряков заряжать машинку и не станет: придётся использовать энергию мирного атома, а за её недостатком – газ и уголь. О «возобновляемой энергетике» речь уже не идёт.

На волне глобального ~~отупения~~ озеленения на рынке появились «гибридные» бензин-электрические авто и даже работающий на водороде «Хаммер-Н2Н». Стоит ли объяснять, что при самых благоприятных условиях подобные монстры спасают не более 20% энергии? Иногда и наоборот бывает. «Лексус» выпустил в 2008 году гибридный «RX 400h», «официально по техпаспорту» потреблявший на 10% больше бензина, чем базовая модель. Творение «BMW» «Hydrogen-7» требует 254 кВт·ч на 100 км – почти вчетверо больше, чем средний британский автомобиль образца 2015 года. Бывший ведущий ТВ-шоу «Прямая передача» Джереми Кларксон про гибридное творение «Тойоты» «Приус» высказался так:

*Автомобиль дорогой, очень сложный в обслуживании, не особенно «зелёный», медленный, сделанный кое-как и бесполезный в качестве средства передвижения.*

Мак-Кей заключает, что совершенствование автопарка Британии с включением электромобилей (но не «водородных» и прочих чудовищ) вполне возможно, но в долгосрочной перспективе основным методом пассажироперевозок в «Великобритании на возобновляемой энергии» будет общественный транспорт: автобусы (общий расход порядка 10-30 кВт·ч на 100 пассажиро-километров) и железная дорога (порядка 2-15 кВт·ч на 100 пассажиро-километров). Предлагаются новации, вроде автоматических пунктов проката велосипедов. Ну и, натурально, британцам придётся, как 150 лет назад, инвестировать в пару крепких ботинок и трость – или длинный зонтик. И обходиться вообще без транспорта.

**2. Грузоперевозки наземным/морским транспортом.** Мак-Кей отмечает, что современный железнодорожный, речной и морской транспорт уже достигли максимальной эффективности 0.1-0.2 кВт·ч на 1 тонну груза на 100 км. Морской транспорт, предположительно, может ещё уменьшить это значение за счёт прямого использования энергии ветра (если паруса будут ставить не матросы, а механизмы). Однако основными методами сокращения

энергозатрат станет сокращение грузоперевозок. Порт, принимавший 10 контейнеровозов в неделю в 2008, будет в 2050 году принимать одно судно. Вам и сокращение на 90%.

Сейчас в Великобритании для перевозок внутри страны предпочтение отдают прямой доставке автомобильным транспортом: страна не особенно большая, не требуется погрузка-выгрузка барж и поездов. В будущем вновь востребованной станет профессия «грузчик», а студентам – найдётся ударный приработок.



3. **Воздушный транспорт, морские лайнеры.** Самолёты летать не перестанут, но летать будут куда реже. Практическим пользователем авиации станут военные. Иногда они же могут возить тушку очередного премьер-министра. Ну и у мультимиллиардеров и их обслуги авиация останется, – кто же им-то запретит? Средний британец будет рассказывать об единственном в жизни воздушном путешествии, как бабушки в СССР образца 1960 года: «а вот я на самолёте летала...»

Что до морских лайнеров, вроде упоминавшегося в первой главе «Титаника», – вопреки расхожему убеждению, перевозка пассажиров морем далеко не так экономична, как воздухом. Наилучшие результаты были достигнуты в пятидесятые-шестидесятые годы прошлого века, когда через Атлантику в США ходили «экономические сестрички» «*Маасдам*» и «*Рийнсдам*». Первого класса с отдельными каютами у них не было вовсе, скорость хода 16.5 узлов, переход от Глазго до Нью-Йорка – 8 суток с небольшим. Энергии на 100 пассажиро-километров уходило 103-121 кВт·ч. Сравните с круизным лайнером «*Куин Мэри – II*», который в сутки сжигает 3'000 кВт·ч на каждого



резвящегося туриста и 8-часовой перелёт от Хитроу до Нью-Йорка на аэробусе «А380» – 60-68 кВт·ч на 100 пассажиро-километров.

Конечно, для нищebroдов могут воссоздать (на современном технологическом уровне) и парусные пассажирские суда – со средней скоростью 6 узлов и временем перехода через Атлантику до месяца. Если кто из простых британцев и соберётся «на пароходе в Америку», билет, скорее всего, будет в один конец. Смотрите последнюю версию «Титаник»: куда и зачем герой Леонардо Ди Каприо плыл?

**4. Обогрев помещений.** К счастью, кондиционирование (охлаждение) воздуха в умеренной Великобритании не является жизненной необходимостью. Экономить энергию на обогрев можно, с точки зрения физики, пятью путями, в порядке удобства: (а) теплоизоляцией помещений, (б) увеличением эффективности обогревателей, (в) климатической оптимизацией новых зданий – глухая стена на север, окна на юг, (г) уменьшением разницы между температурой внутри и снаружи жилища, (д) оптимизацией использования обогреваемых помещений.

К несчастью, большинство домов в Великобритании было построено или перестроено в 1950-70 годы, когда энергия была дешева, а про теплоизоляцию не задумывались. По подсчётам Мак-Кея, можно сохранить до 25% энергии, если просто вложить теплоизоляцию между кирпичными стенами и заменить типичное для Британии одинарное остекление на стеклопакеты.



Пункт (г) в Великобритании почти исчерпан: большинство британцев

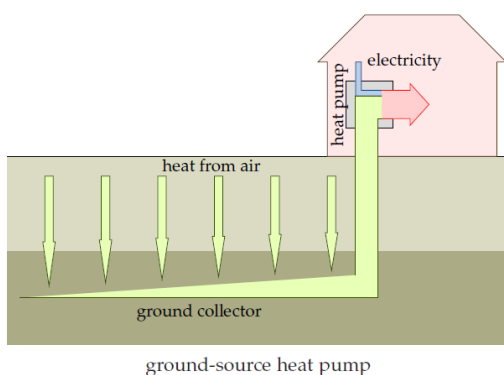
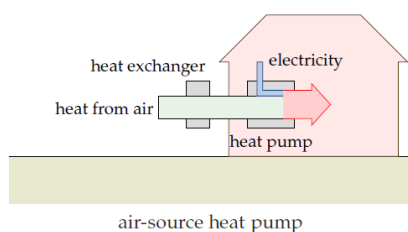
традиционно поддерживают температуру в помещениях вблизи забортной. «Нормальной комнатной температурой» считается зимой +15°C, летом +30°C. Впрочем, та же практика существует и в Китае: типичная домашняя одежда зимой состоит из трёх-четырёх слоёв, включая подбитый ватой халат. Ну и жители северных штатов Индии не греют жилища, а надевают весь гардероб.

Эффективность обогревателей (б) – поле пока нехоженое. По мнению Мак-Кея, в условиях Британии генерация электроэнергии на ТЭЦ менее эффективна, чем использование «тепловых насосов».

Сейчас в Европе (и в России) большая часть электроэнергии вырабатывается на Тепло-Электро-Централах. Как любая тепловая машина, ТЭЦ получает энергию от «нагревателя» и отдаёт «холодильнику». Источником тепла является сгорающее в топке или турбине станции топливо, а в качестве холодильника выступают в летнее время – градирни-испарители, а в «отопительный период» – радиаторы водяного отопления в квартирах граждан. Летом «лишнее» тепло просто улетает в атмосферу, зимой – используется на обогрев помещений. В Сибири (или той же Финляндии), где отопительный сезон длится более полугода, – ТЭЦ вполне энергетически оправданы. Другое дело на юге Великобритании. В году не так уж много дней, когда жилой фонд может выступать эффективным «холодильником», оттого почти вся энергия сбрасывается в градирни.

«Тепловые насосы» (думайте как о холодильнике, где конденсатор выведен в дом, а морозилка на улице) могут быть сконфигурированы по-разному. Некоторые выкачивают теплоту из окружающего воздуха. Есть системы, где вместо воздуха – закопанная по периметру садового участка витая медная труба или колодец с водой<sup>151</sup>.

В качестве бонуса, «тепловые насосы» могут утилизировать, помимо тепла от ископаемого топлива, электроэнергию солнечных батарей или ветряков.



Пущенный в обычный электрообогреватель, киловатт-час электроэнергии

<sup>151</sup> Такие насосы неправильно именуют «геотермальными». К геотермальной энергии, обсуждавшейся во 2 главе, они отношения не имеют, а теплота – от нагревающего землю Солнца.

выделит в вашей комнате ровно один киловатт-час тепла. С тепловым насосом, тот же киловатт-час доставит в комнату больше 1 киловатт-часа; насколько больше, зависит от конфигурации уличной «морозилки» и перепада температур. По той же причине, отчего домашний холодильник (при прочих равных условиях) потребляет тем больше электроэнергии, чем холоднее вам хочется пиво, чем холоднее на улице, тем интенсивнее должен работать тепловой насос, тем меньше «перекачка» на единицу электроэнергии. Температура уличной «морозилки» должна оставаться ниже забортной, а то тепло от земли в «морозилку» не потечёт!

В условиях мягкого климата Великобритании: среднегодовая температура почвы +11°C, минимальная комнатная +15°C — тепловые насосы могут перекачивать до 4 кВт тепла на каждый киловатт электрической мощности. Если принять электрический КПД современной газотурбинной станции (с потерями на передачу энергии) в 50%, каждый кВт·ч газа, сгоревший на электростанции, нагреет ваш дом, грубо, на 2 кВт·ч<sup>152</sup>. В Сибири, если на улице минус тридцать, а в доме всё одно хочется +25°C, выгоднее нагревать воздух горячими батареями от ТЭЦ и держать про запас электрокамин.

Ну и оптимизация использования помещений, то есть «уплотнение» в терминах булгаковского Швондера, (д). Истина, известная каждому туристу. Если хорошо законопатить стены-окна-двери, да набить в помещение побольше народа, обогрев вообще не нужен! Вспомним, что человек в покое выделяет тепла как 130-ваттная лампочка. В Викторианские времена типичное жилище зимой в Лондоне вмещало 20-25 человек на 10 квадратных метрах. В складчину покупали несколько фунтов угля — и хватало на ночь.

**5. Горячая вода и приготовление пищи.** Мак-Кей замечает, что использовать для нагрева воды электричество – бесполезно греть атмосферу. В странах с холодным климатом за нагрев воды могут отвечать те же ТЭЦ. Где климат мягкий, солнечные водонагреватели на крышах могут сократить затраты потребного топлива примерно вдвое-втрое. В странах жарких используются и системы прямого воздушного нагрева воды. Например, на жарком севере Австралии (он к экватору ближе) холодную водопроводную воду пропускают под домом в десятиметровый медный теплообменник. В качестве бонуса, пол в доме прохладный, экономится кондиционер. На выходе получается вода с температурой окружающего воздуха, – то есть 35-45°C. Воду накапливают в дневное время в термостатированной ёмкости. Расход электроэнергии или газа – исключительно на подогрев воды в «холодные» (+23°) дни, такой ужас в городе Дарвине бывает раз в три года.

Если использовать для приготовления пищи природный газ, лучший способ, как ни странно – современная газовая плита, а не электрическая, энергию для

---

<sup>152</sup> В комментариях к блогу написали, что массовое использование тепловых насосов может в условиях высокой плотности застройки приводить к переохлаждению почвы. У Д.Мак-Кея в книге есть подсчёт: да, в условиях Британии так и произойдёт в крупных населённых пунктах. Выход – летом греть воду на крышах и прокачивать через теплообменники. Конечно, в результате будет снижение общей эффективности системы.



которой вырабатывает далёкая ТЭЦ. Однако помимо плит у населения есть микроволновки и электрочайники. Что делать с ними – непонятно.

**6. Бытовая электроника, связь, Интернет.** Как ни странно, большинство устройств проводной и беспроводной связи достаточно эффективны с точки зрения энергии. Исключение составляют, в порядке убывания: (а) принтеры и копировальные машины всех мастей, потребляющие не только электричество, но и бумагу – очень энергоёмкий ресурс, (б) сверхбольшие мониторы, особенно вошедшие в моду двухметровые телевизоры, (в) устаревшие (или плохо изготовленные) электроприборы, бесполезно потребляющие ток в режиме ожидания. В качестве примера последних: настольная светодиодная лампа IKEA (вроде бы уже снятая с производства), потреблявшая из розетки 10 Вт вне зависимости от положения выключателя(!) и производимого света. По мнению Мак-Кея, если систематически сдать в утиль «энергетических вампиров», в городах можно сохранить приемлемый уровень связи и не ликвидировать «ноосферу». Беспокоиться, что после «Пика Нефти» одновременно<sup>153</sup> у всех откажет связь, может лишь тот, кто ни разу не бывал в беднейших странах Азии. И в Индии, и на Филиппинах, и в Бангладеш мобильный телефон не является заоблачной роскошью, а G4 работает иногда лучше, чем в том же Лондоне. На картинке – филиппинский уличный нищий пишет в Twitter. Синяя пластиковая кружка – для подаяния.



**7. Проблема предложения / спроса.** Спрос на электрическую энергию в сети крайне неравномерный: меняется в зависимости от времени суток, времени года, и погоды за окном. Ядерные и угольные станции не умеют быстро

<sup>153</sup> Конечно, это не значит, что связь будет доступна в сельской местности. Однако и там выключение не произойдёт одновременно.

изменять производство энергии. Снижение или увеличение выработки занимает часы. С ветровыми, волновыми, солнечными ситуация ещё хуже: они изменяют выработку часто и непредсказуемо, в зависимости от скорости ветра и облачности. Традиционно, «броски» выработки и потребления компенсировались станциями на природном газе и гидроэлектростанциями. Если выводить из оборота уголь и газ, заменяя их возобновляемыми источниками и ядерными станциями, потребуется сооружение, в порядке приоритетов: (а) резервных накопителей – например, накачивать воду в водохранилище, чтобы использовать гидроэнергию в момент пика потребления<sup>154</sup>, (б) глобальных энергосетей – на уровне «вся Европа», (в) дополнительных (запасных) мощностей ветряков и солнечных панелей, (г) ограничение уровня потребления.

Методы (а)-(в) – весьма затратны, да и потери энергии существенные. Например, лучшие высоковольтные ЛЭП постоянного тока теряют 10-12% мощности на 1'000 км расстояния. Пока у человечества есть опыт ограничения потребления. Типичный британский или голландский хозяин ветряной мельницы вкалывал день и ночь, когда ветер дует. А когда штиль – как выражаются моряки, «сидел на попе ровно» – и курил трубку. Аналогично поступали хозяева ветряных лесопилок. На рудных шахтах иногда использовали силу ветра для откачки воды – и уходили в вынужденный простой, когда ветра не было. Кстати, первые паровые машины как раз и предназначались для откачки шахт.

В Индии, Бангладеш и других странах Азии существует практика «превентивного отключения» жилых кварталов, когда ожидается особо жаркая погода. Городским инженерам ясно, что ежели в таком-то районе города население одновременно включит вентиляторы и кондиционеры, генерирующих мощностей не хватит на столько-то процентов. Если рано утром отключить людям свет, к обеду не случится аварии от перегрузки линий. К вечеру ток можно так же плавно включить. Население привыкло и не жалуется.

Теоретически, можно научить холодильники и кондиционеры реагировать на изменение частоты в сети и автоматически переходить в режим низкого энергопотребления, если частота падает. Затраты не так уж велики: маленькая коробочка с электроникой стоимостью в несколько долларов. Однако потребуется модифицировать миллионы единиц бытовой техники и как-то отучить особо одарённых пользователей эти коробочки выводить из строя. Пока мы не можем справиться с мастерами подкручивать электросчётчики! Кто-то всерьёз обсуждает планы иметь в каждом доме две отдельные линии: одну для освещения, электроники, холодильников, вторую для водонагревателей, кондиционеров и прочего.

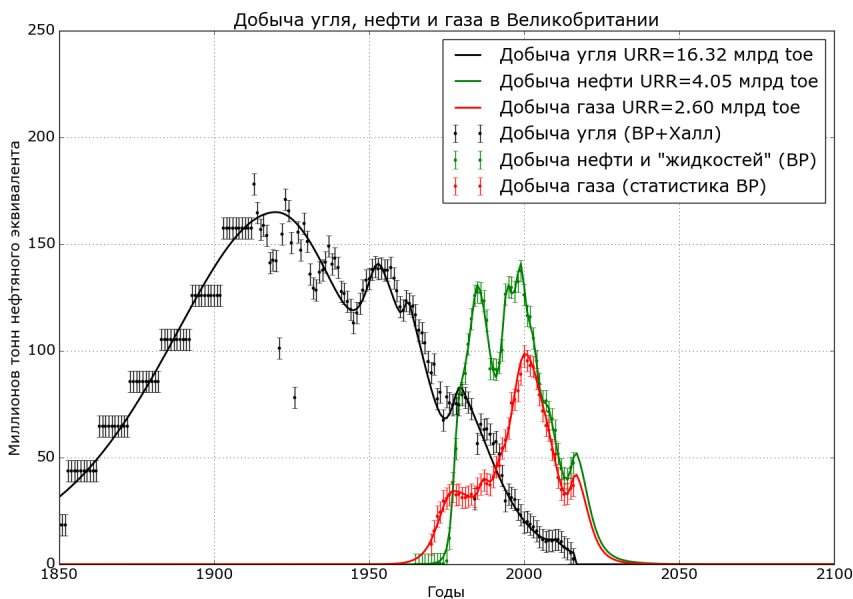
---

<sup>154</sup> На 2007 в Британии было четыре нагнетательных водохранилища (ГАЭС) с общим эффективным запасом 30 ГВт·ч и эффективностью по циклу закачка-генерация около 75% (то есть потеря четверти энергии). Совместно, эти водохранилища могли сгладить флюктуацию производства в 2.8 ГВт мгновенной мощности. Флюктуация британского потребления в том же 2007 – от 10 до 33 ГВт.

На роботизированном заводе выключение электричества – большая проблема. А если у вас электролизная ванна с расплавленным алюминием, продолжительное выключение тока – катастрофа. Оттого, производство волей-неволей придётся перемещать поближе к источникам стабильной энергии.

Ну и для полноты картины добавим «видение» И.Маска: если ввести в оборот электромобили с заменяемыми батареями, миллионы батарей могут сидеть на автозаправках и заряжаться в периоды низкого спроса / высокого производства энергии. Однако как мы разобрали выше в пункте 1, такого количества электромобилей в «возобновляемой Британии» просто не будет. Маск также предлагает установить в каждом доме перезаряжаемую химическую батарею. Перечитайте про элементы «Панасоник» выше. Ага.

Проверим вычисления Мак-Кея по независимым данным. Мак-Кей считал «снизу» – от душевого потребления. Я буду считать «сверху», воспользовавшись статистикой производства и потребления энергии: угля, нефти, природного газа, ядерной, гидро и прочих возобновляемых по данным BP и с добавлением исторических данных Эдварда Халла, обсуждавшихся в 8 главе. Программа \Chapter 12\Test\_02\_UK\_Energy.py

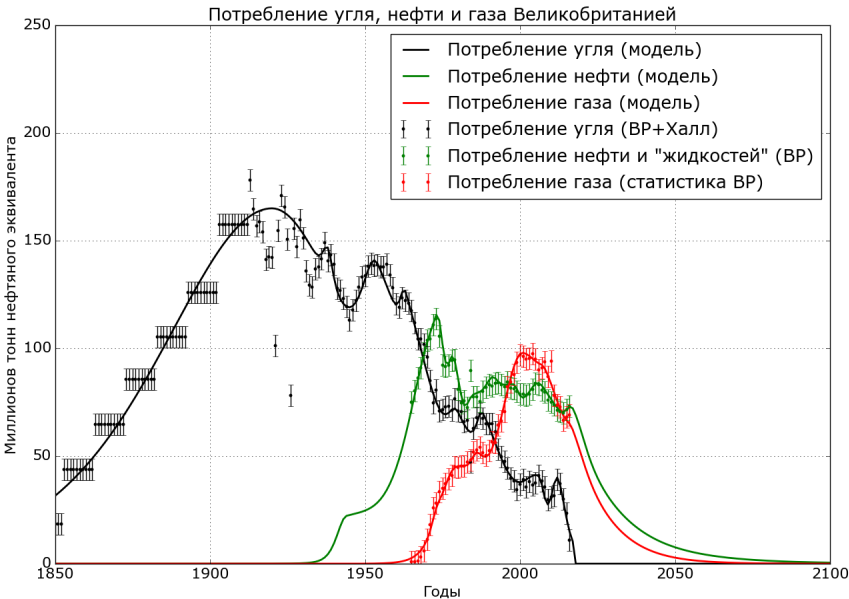


Заметим, что графики производства ископаемого топлива не являются простыми кривыми, вроде хаббертианы, функции Вейбулла или «капицианы» из восьмой главы. Однако они удовлетворяют условиям Хабберта: ограничены сверху — бесконечный дебит невозможен физически — и выходят на ноль в плюс и минус бесконечности по времени (если говорить про уголь, добыча в 2017 году ожидается нулевая). Общее количество ископаемого топлива на островах Великобритании, включая шельф, – 23.0 млрд тонн нефтяного эквивалента, из которых уже добыто 22.5 млрд тонн. Геологи не сомневаются,

что «острова», включая шельф, изучены вдоль и поперёк, так что крупных новых открытий не предвидится. А «новое месторождение с гигантскими запасами 480 тысяч тонн нефти», о которых примерно дважды в год объявляют газетчики, – погоды не сделают. 480 тысяч тонн, даже если извлечь всё до капли, хватит Великобритании на... 60 часов!

Так как площадь Великобритании составляет 243'610 км<sup>2</sup>, на каждом квадратном километре до начала индустриальной революции было в среднем 95±5 тыс тонн «условной нефти». Считая по 41 ГДж на тонну, каждый квадратный километр содержал  $3.9 \cdot 10^{15}$  Дж ископаемой энергии. Теперь на квадратном километре в среднем осталось  $0.09 \cdot 10^{15}$  Дж.

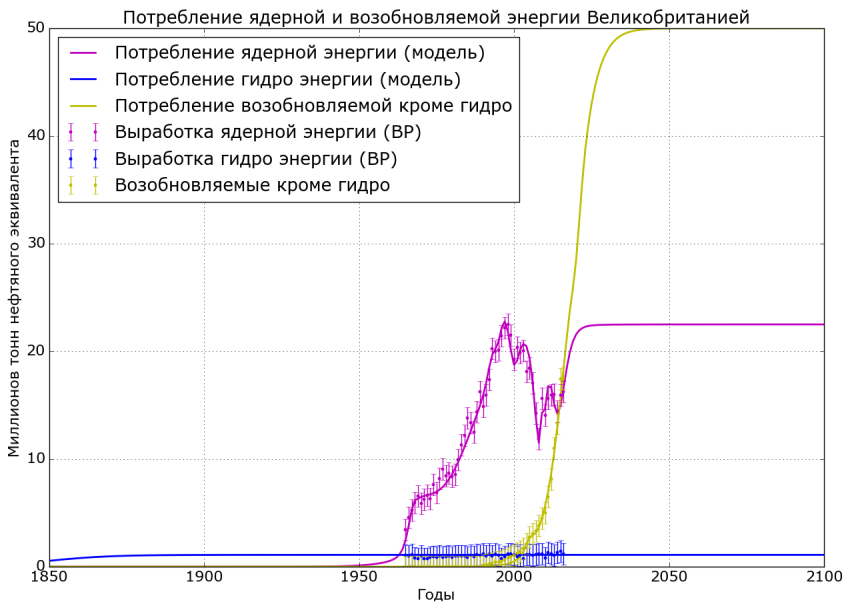
Посмотрим, как обстоит дело с расходом энергии. Программа \Chapter 12\Test\_03\_UK\_Energy.py



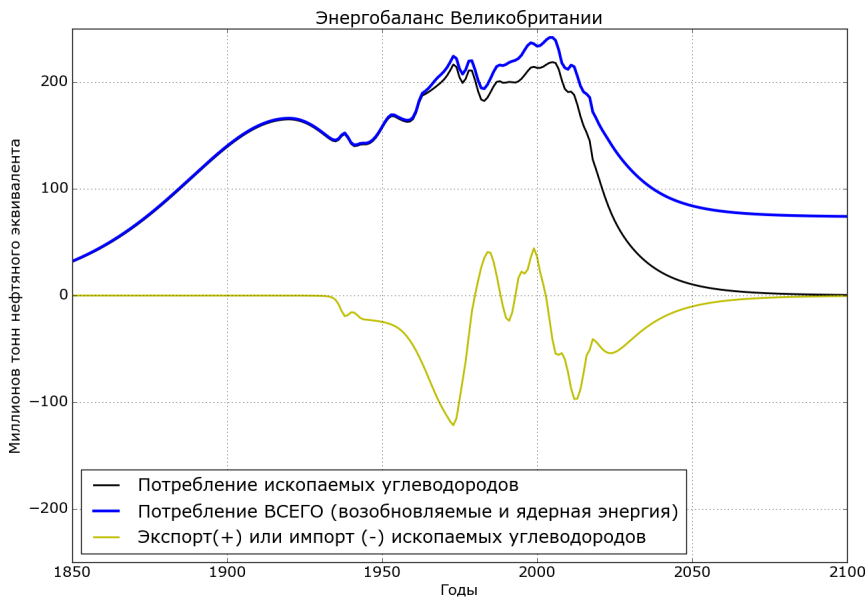
Следующий график – для ядерной и возобновляемой энергии. Вертикальный масштаб – 1/3 от графика выше. На гидроэлектростанции закладываться не стоит: в Британии потенциал выбран ещё в XIX веке. По ядерной энергии и возобновляемым кроме гидро – наши предположения оптимистичны. Пик производства ядерной энергии Британией пройден в 1999 году, однако будем надеяться, хваленый здравый смысл возобладает. На графике «кроме гидро» до 1980 отсутствуют биотопливо (солома и дрова) и мусоросжигание – они в статистике тогда не учитывались, данных просто нет.

Практический предел возобновляемой энергии, рассчитанный для всей планеты во второй главе: 4.6 ТВт. За год набегает  $1.45 \cdot 10^{20}$  Дж, переводя в нефть, получаем 3'540 млн тонн условного топлива. Великобритания после потери колоний имеет население 0.89% от общей популяции Земли. Если делить «справедливо и по-братски» (а как ещё можно делить наше родное

Солнце?) от практического предела британцам достанется около 32 млн тонн. Мы возьмём оптимистично: 50 млн тонн, благо ветром, волнами и приливами Бог Британию не обидел. Программа \Chapter 12\Test\_04\_UK\_Energy.py

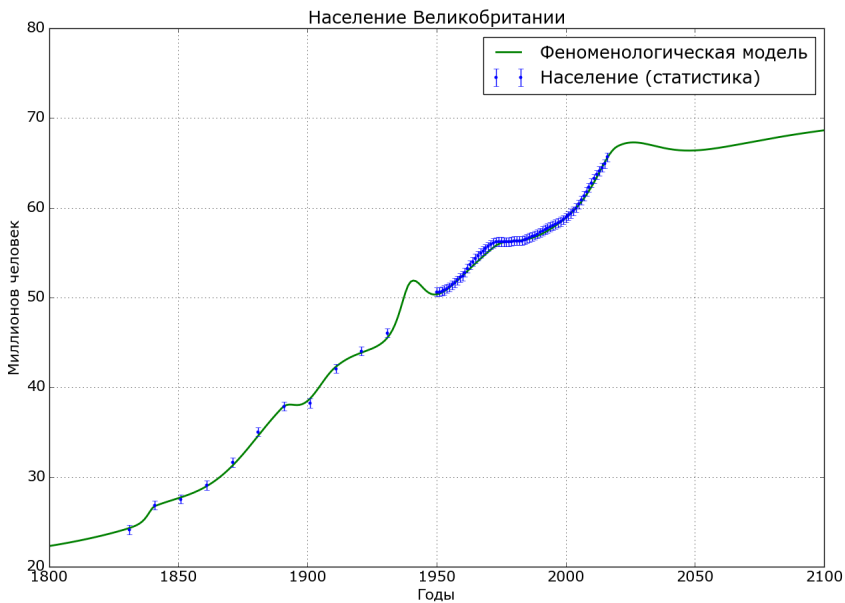


Сложим углеводороды и возобновляемые программой \Chapter 12\Test\_05\_UK\_Energy.py Жёлтая кривая показывает импорт-экспорт углеводородного сырья.

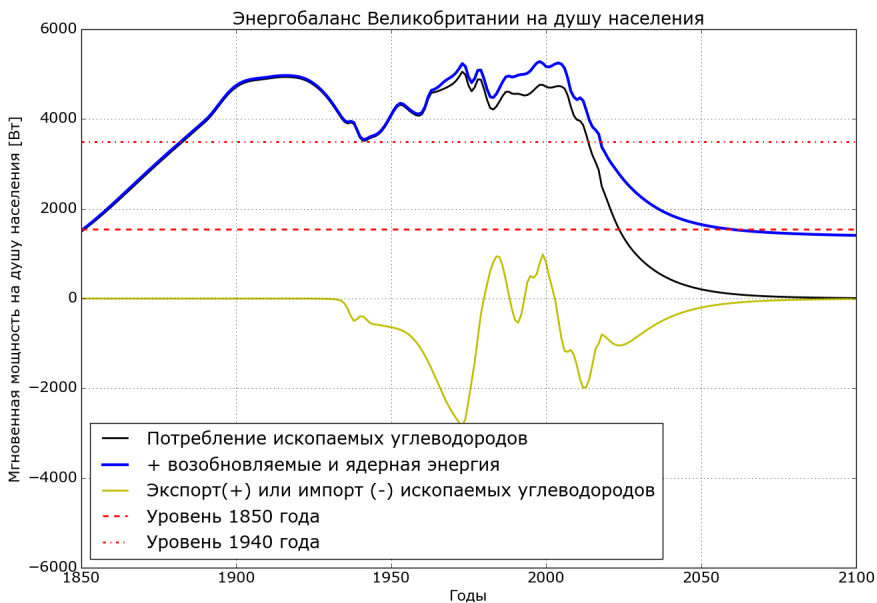


Великобритания была экспортёром нефти и газа (но импортёром угля) с 1980 по 2003 годы. Точно как в книге, примерно к 2050 году Великобритания

откажется от 95% ископаемого топлива. Для проверки вычислений Мак-Кея надо добавить модель населения Великобритании, рассчитанной программой \Chapter 12\Test\_01\_UK\_Energy.py

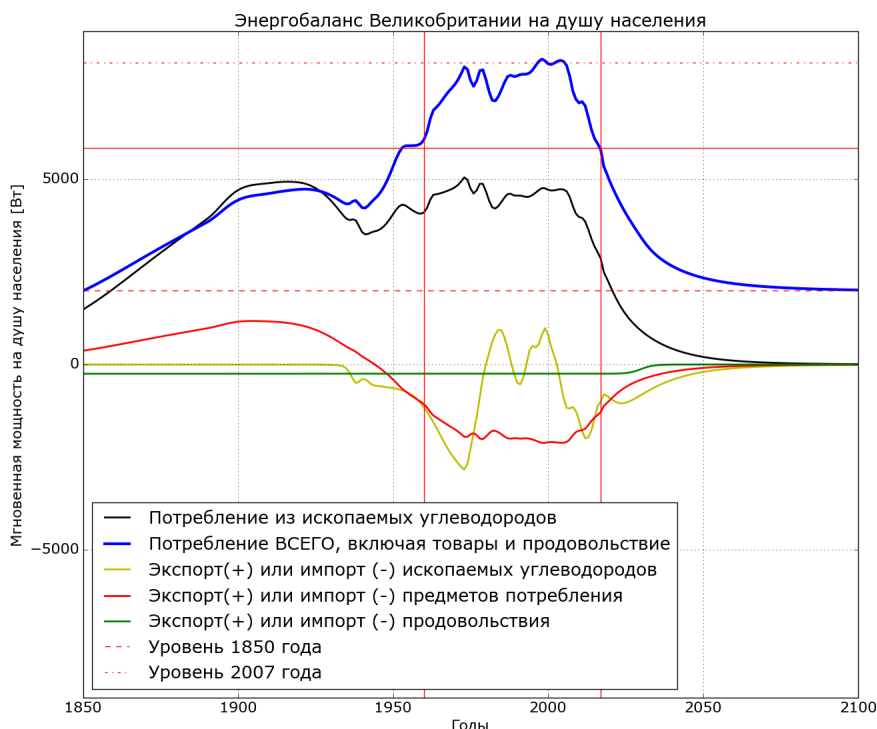


Оптимистично предположим, британцам удастся и далее сдерживать нелегальную миграцию, а население остановится на уровне несколько менее 70 млн человек. Поделим график энергобаланса на население программой \Chapter 12\Test\_06\_UK\_Energy.py



Внезапно оказывается, душевое потребление энергии в Великобритании уже опустилось до уровня мировых войн. Конечно, британцы в 2017 живут

значительно лучше соотечественников образца 1940 года. Разница – те самые 2'000 Вт, получаемых в кредит в виде товаров из Азии. Для полноты сравнения остаётся добавить программой \Chapter 12\Test\_07\_UK\_Energy.py импорт-экспорт товаров народного потребления (например, из Китая) и продовольствия (например, из Бразилии).

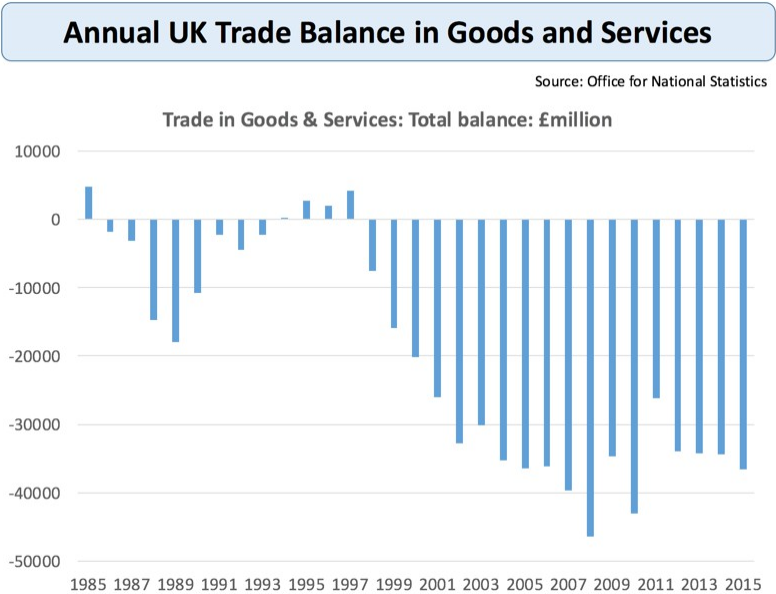


Проверка из независимых данных хорошо воспроизводит оценки Д.Мак-Кея 2008 года. Напоминаем, что он получил для 2007 года оценку 8'150 Вт, в том числе 2'000 Вт в виде импортных товаров и 625 Вт в виде продовольствия. Наша оценка находится в пределах  $\pm 200$  Вт от Мак-Кея – и вполне укладывается в погрешность.

По состоянию на конец 2017 материальное потребление Великобритании вернулось на уровень ниже 1952-1960 годов. Сейчас британцы имеют ту же энерговооружённость, что в скудном послевоенном 1950 (конечно, в те далёкие годы часть энергии уходила на восстановление порушенного войной хозяйства). В 2015 году страна импортировала до 25% энергоносителей, до 50% продовольствия, до 90% чёрных и цветных металлов, до 95% товаров народного потребления, до 98% удобрений. Конечно, имеется и экспорт (данные за «удачный» для британского экспорта 2011 год):

Товар	Млрд фунтов стерлингов
Ядерные реакторы и компоненты	34.8
Продукты нефтехимии	33.4
Автомобили и запасные части	23.5
Компоненты электрических машин	17.2
Фармацевтические продукты	16.9
Ювелирные изделия	12.3
Медицинские инструменты	9.1
Продукты тонкого органического синтеза	9
Запасные части и компоненты авиации	8
Пластики и полимеры	6.7

Снижение добычи нефти в Северном море больно ударило по торговому балансу. Страна живёт в кредит последние 18 лет:



Если не предпринимать самых серьёзных мер, писал Мак-Кей в 2008, к 2075 году средний британец станет жить на уровне середины XIX века. Добро пожаловать в Новую Викторианскую Англию! Вместо газа – светодиодная лампа, вместо газеты – телефончик с Интернет. Пожалуй, доктора разбираются в болячках несколько лучше костоправов 1850 года. Остальное – читайте у Диккенса!

Впрочем, и 1900 Вт на человека – ещё не самая пессимистичная оценка. Снизу есть хорошо рассчитанный историками суровый 1560 год, когда средний житель Англии и Уэльса имел чуть менее 850 Вт, исключительно из



возобновляемых источников. Жизнь простая и удивительная: предметы потребления и транспорт на уровне 1% от нынешних, 4 кг дров на день (да, по всей Англии шумели леса); но грубой растительной пищи достаточно для физического труда – 2'700 ккал.<sup>155</sup> Мясо – дважды в год по праздникам. Ожидаемая продолжительность жизни – 27 лет, детская смертность до 5 лет – половина от числа живых при родах. Ренессанс, мля.



Теперь разберёмся с ядерной энергией. Если считать не термоядерные бомбы, а выработку электроэнергии из ядерного топлива на душу населения, Россия, Китай, Великобритания и США не являются «великими ядерными державами».

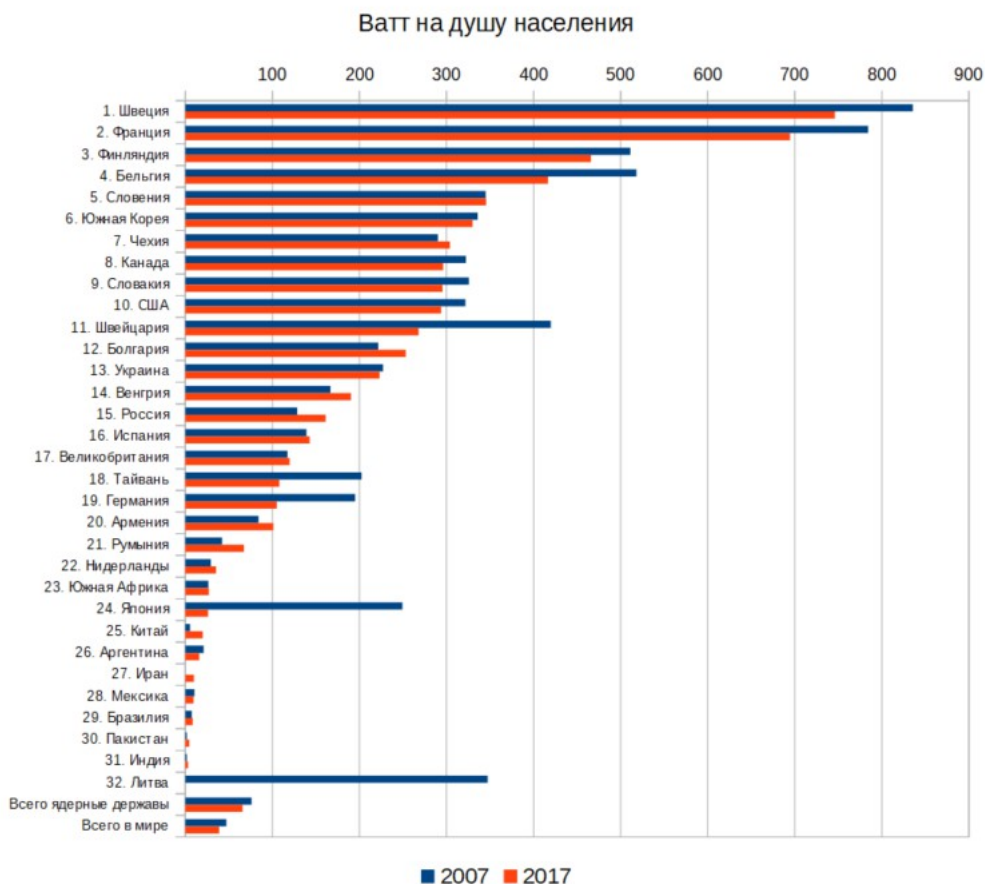
В 2007 году Россия находилась на 20 месте (129 Вт) из 31 страны с ядерными мощностями, между Испанией (139 Вт) и Великобританией (117 Вт). В первой тройке находились Швеция (835 Вт), Франция (784 Вт) и Бельгия (518 Вт). США были на 11 месте (322 Вт), КНР – на 29 (всего 5.4 Вт на душу).

В 2017 году состояние России несколько поправилось, и с 161 Вт на душу она поднялась на 15 место, между Венгрией (190 Вт) и Испанией (142 Вт). Лидеры гонки сдуваются: из первой тройки выбыла Бельгия (закрывает реакторы и переехала на 4 место), теперь там Швеция (746 Вт), Франция (695 Вт), и Финляндия (466 Вт) – все три идут с уменьшением по сравнению с 2007 годом. США поднялись на 10 место (294 Вт), Китай – на 25 (20 Вт). Кроме Бельгии и Швеции, сильную отрицательную динамику продемонстрировали Швейцария, Германия, Япония. Впрочем, у последней есть шанс восстановиться, –

<sup>155</sup> [https://www.fas.harvard.edu/~histecon/energyhistory/data/Warde\\_Energy%20Consumption%20England.pdf](https://www.fas.harvard.edu/~histecon/energyhistory/data/Warde_Energy%20Consumption%20England.pdf)

запускают реакторы снова после трагических событий 2011 года. Литва в 2009 закрыла Игналинскую АЭС и стала второй страной мира (после Италии), добровольно отказавшейся от ядерной энергии. К счастью на дистанцию бодро вошёл Иран, обогнав за 9 лет Мексику, Индию, Пакистан и Бразилию.

## Производство ядерной энергии в мире



Ежели вкратце, даже лидерам гонки до безжалостно-нищенских 1'800-1'900 Вт на душу надо утроить производство. Для «середнячков», вроде России, Великобритании и США, речь идёт уже об увеличении на порядок, а перед КНР стоит задача увеличить производство ядерной энергии в 150 раз за 25 лет, или по 22% роста в год. С одной стороны, под мудрым руководством Коммунистической Партии трудолюбивые китайцы и не такое вершили. С другой – реактор не сельская домна времён Культурной Революции. Как бухнет – мало не покажется.

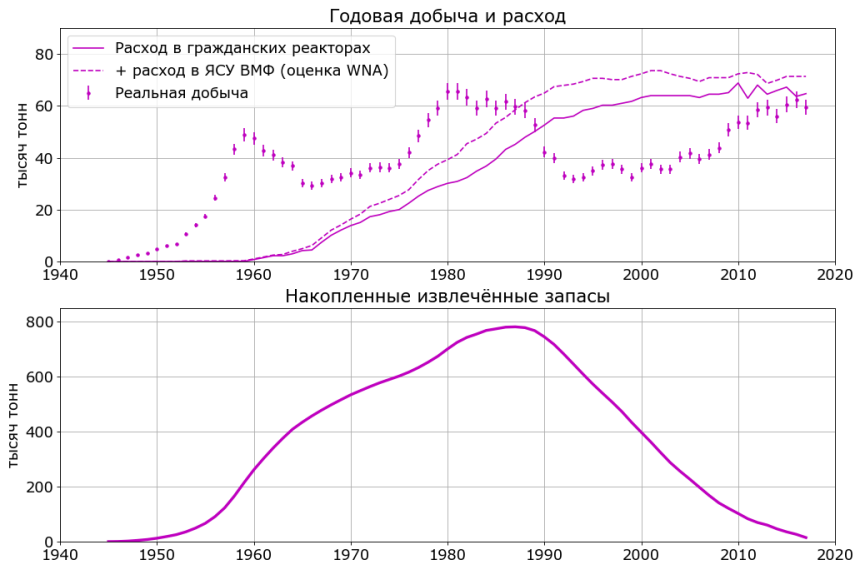
Мак-Кей даёт оценку необходимой мощности атомных станций и разведанное количество урана в мире. Теоретически, реакторы-бридеры способны обеспечить все энергетические потребности человечества на 250-1000 лет вперёд, однако их не строит никто, кроме России, да ещё Индия бесконечно

экспериментирует с «Ториевым циклом».

М.К.Хабберт в 1956 году про ядерную энергетику знал только, что она технически осуществима, но абсолютных значений выработки предсказать, натурально, не мог. Первая АЭС (в Обнинске) к моменту публикации статьи Хабберта отработала ровно 24 месяца, а «*Калдер Холл-1*» в Великобритании ещё строилась. Мы вооружены данными за 70 лет и можем выдать прогноз несколько лучше. В качестве входных данных используем публично доступные с веб-ресурса Ассоциации производителей ядерного топлива (WNA)<sup>156</sup>

Программа Chapter 12\Test\_08\_Uranium.py

Добыча, расход и стратегические запасы урана



За время Холодной войны накопились огромные запасы добытого, но не обогащённого урана: почти 800 тыс тонн. Однако на волне Чернобыльской катастрофы добыча в конце восьмидесятых рухнула, и с тех пор не было ни одного года, когда добыча была бы выше потребления. В 2017 году только гражданские ядерные установки сожгли 65 тыс тонн урана, а добыча составила 59.5 тыс тонн. О стратегических запасах урана с точностью до тысячи тонн сказать трудно – эти данные секретны, но, по-видимому, к 2018 накопленные запасы практически исчерпаны во всех странах. Скоро – если не «уже» – заводы по производству топливных элементов для АЭС будут работать напрямую с месторождений, а добыча урана последние шесть лет стагнирует. Цены на уран остаются низкими, отчего добыча заморожена там, где добывать дороже всего: в Чехии, Бразилии, Франции, Германии и Малави.

<sup>156</sup> <http://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/mining-of-uranium/world-uranium-mining-production.aspx>

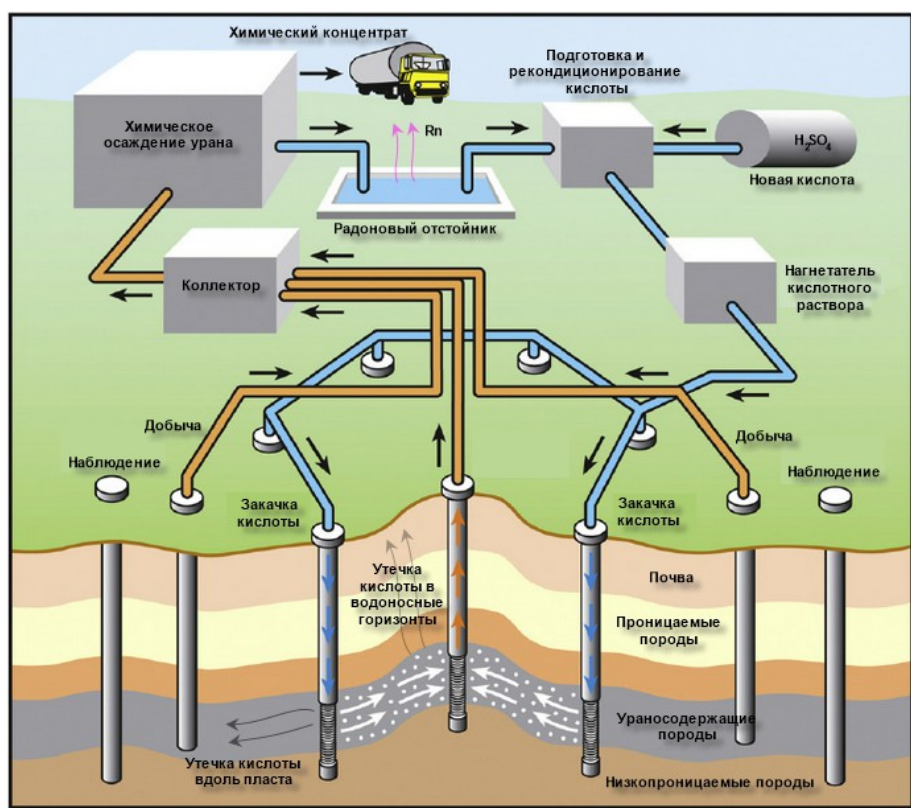
Страна	Добыча 2016 г (тонн)	Добыча 2017 г (тонн)	Потребление 2017 г (тонн)	Нетто Экспорт (тонн)	Нетто Импорт (тонн)
Казахстан	24'575	23'391	0	23'391	
Канада	14'039	13'116	1'592	11'524	
Австралия	6'315	5'882	0	5'882	
Нигер	3'479	3'449	0	3'449	
Намибия	3'654	4'224	0	4'224	
Россия	3'004	2'917	5'380		2'463
Узбекистан	2'404	2'404	0	2'404	
КНР	1'616	1'885	8'289		6'404
США	1'125	940	18'996		18'056
Украина	1'005	550	1'944		1'394
ЮАР	490	308	279	29	
Индия	385	421	843		422
Пакистан	45	45	217		172
Чехия	138	0	649		649
Бразилия	44	0	321		321
Франция	Добычи нет с 2015 года		9'502		9'502
Германия	Добычи нет с 2014 года		1'480		1'480
Малави	Добычи нет с 2014 года		0		
Всего	62'368	59'531	65'014		

Подтверждённые запасы урана в мире (по данным той же WNA) велики: не менее 6.1 млн тонн при цене \$130 за кг и 8.0 млн тонн при цене 260 (в долларах 2000 года). Из этих запасов в странах из «списка Чуковского» всего шестая часть (Намибия, Нигер, Ботсвана, Танзания, Иордания, Малави), а крупнейшие запасы сосредоточены в странах мирных и надёжных: Австралии (30%), Казахстане (14%), Канаде (8%) и России (8%)<sup>157</sup>. Добыча ограничивается огромным экологическим уроном: примерно половина урана в мире добывается так называемым подземным выщелачиванием, по технологии слегка схожей с известной нефтяникам кислотной обработкой пласта. Только вместе с относительно «безобидной» соляной кислотой (HCl) используется серная (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>). Ещё в процессе участвуют<sup>158</sup> актёры на вторых ролях (в алфавитном порядке, дабы никого не обидеть): азотная кислота (HNO<sub>3</sub>), аммиак(NH<sub>3</sub>), гидроксид калия (KOH), гидроксид натрия (NaOH), лимонная

157 А вот США Бог ураном обделил. При существующем уровне потребления 19 тыс тонн – разведанных запасов на 3 года.

158 IAEA, *Manual of acid in situ leach uranium mining technology*, IAEA-TECDOC 1239, 2001

кислота ( $\text{CH}_3\text{COOH}$ ), фосфорная кислота ( $\text{H}_3\text{PO}_4$ ), хлористая кислота ( $\text{HCl}$ ). Если вы полагаете, что «нефтесланцевый» гидроразрыв на «быстрой воде» с лигроином с метанолом – это треш и угар, попробуйте на вкус наше блюдо!



А так это выглядит в натуре.

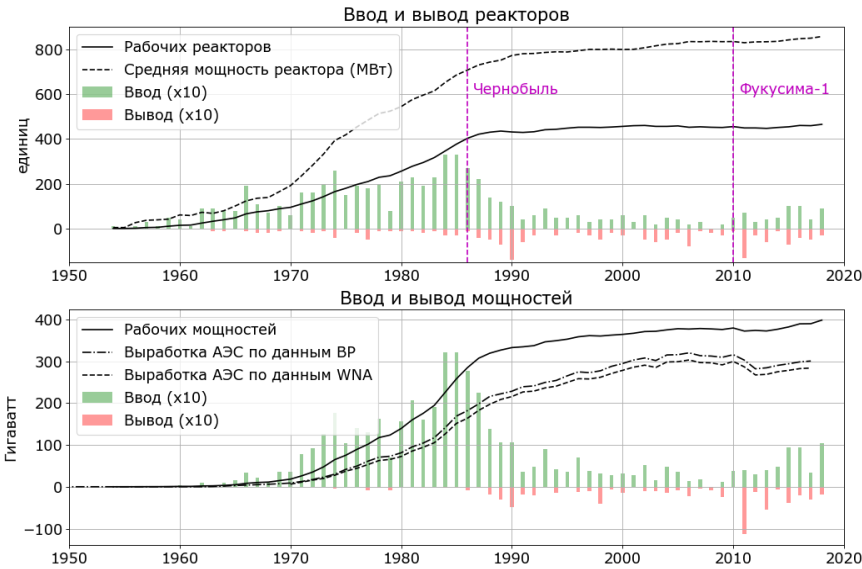




В отличие от гидроразрыва и кислотной обработки пласта, где химия закачивается в скважины на достаточно больших глубинах – обычно глубже 400 метров – и притом одномоментно, выщелачивание урана протекает годами на глубинах от нескольких десятков метров до полукилометра. По дневной поверхности и в водоносных горизонтах «размазываются» сопутствующие урану соединения: свинец, арсениды, таллий, ртуть... Сказать, что после окончания работ в этом месте ничего расти не будет, – нельзя. Растёт, конечно. Только в пищу это лучше не употреблять. Ну и естественно остаётся великолепная роща из головок скважин. В металлолом их не примут, опять-таки из-за тяжёлых металлов и прочих полезностей. Короче, добывать уран можно, но методом подземного выщелачивания его надо добывать там, где низкая плотность населения, предпочтительно в пустыне. Казахстан, арктические районы Канады, Северные Территории Австралии – великолепные кандидаты.

Со строительством новых реакторов дело обстоит не так плохо, как иногда представляют на форумах. По состоянию на конец 2018 года в строительстве 54 реактора общей мощностью 54.7 ГВт(электрических)<sup>159</sup>, в том числе 13 в КНР, 7 в Индии и 6 в России<sup>160</sup>. В 2015 и 2016 годах в мире добавилось по 10 реакторов (9.4 и 9.5 ГВт соответственно), в 2018 – 9 реакторов (10.4 ГВт). Конечно, по сравнению с 1984 и 1985 годами, когда в мире ввели в строй по 33 реактора (32.1 ГВт), это не так уж много.

Гражданские генерирующие мощности ядерной энергетики



159 Здесь и далее – заявленная (номинальная) мощность по данным МАГАТЭ. «Википедия» часто цитирует большие числа, и некоторые даже верные: реакторы проходят модификации. Проверять, однако, доверим международному агентству.

160 <https://pris.iaea.org/PRIS/home.aspx>

После аварии в Чернобыле количество работающих реакторов в мире оставалось примерно постоянным, около 450 единиц, но средняя мощность работающих реакторов выросла с 700 до 850 МВт. Рекордное число реакторов было выведено из работы в 1990 году: 14 единиц (4.8 ГВт), но это были в основном энергоблоки старые и уже выслужившие срок; просто после Чернобыля народ понял, что поддерживать на ходу «дедушек» постройки начала 1960-х с мощностями порядка 300 МВт – себе дороже. В 2011, после цунами и «Фукусимы-Дайичи», состоялась повторная ревизия «старичков»; было выведено из эксплуатации 13 реакторов общей мощностью 11.4 ГВт, то есть в среднем по 880 МВт на энергоблок.

Помимо графика установленной мощности, выше показаны ещё кривые выработки электроэнергии в пересчёте из ТВт·ч во мгновенную мощность делением на количество часов в среднем году (8'766). Кривая по данным «BP» считается «на генераторе», WNA выдаёт данные «на счётчике потребителя»; разница – потери электропередачи, то есть технически разница между  $ERoEI_{st}$  и  $ERoEI_{rou}$ . Заметим, однако, интересную картину. С 2013 года установленная мощность растёт, а производство энергии так и не восстановилось после снижения 2011 года. Максимальная утилизация установленной мощности наблюдалась перед Глобальным Финансовым, в 2006 году – 85%. Средняя утилизация с 1991 по 2017 год – 78%, а с 2014 по 2017 гг включительно – 77%. Реакторы в среднем простаивают по 84 дня в году. Связано ли это с накоплением технических проблем в старых реакторах или с недостатком урана – трудно сказать.

Средняя мощность у энергоблоков, остановленных в 1990 году и ранее, – всего 220 МВт, а среднее время работы – 14 лет. Крупных реакторов шесть: «Тримайл-Айленд-2» (880 МВт, проработал меньше года), «Чернобыль-4» (925 МВт, 3 года), построенный с грубейшими нарушениями регламента «Мюльхайм-Керлих» в Германии («Mülheim-Kärlich», 1'219 МВт, 2.5 года), повредивший в 1978 году теплообменник «Ранч Секо-1» в Калифорнии (873 МВт, 15 лет на 38% мощности) и невинно пострадавшие от рук Зелёных «Шорхэм» в Великобритании (820 МВт, проработал на 5% мощности 3 года и был закрыт в связи с набегами аборигенов на проходную) и «Каосо» в Италии (хороший, годный реактор 860 МВт, проработавший на момент закрытия всего 12 лет и павший жертвой референдума). Примерно треть из 67 остановленных с 1957 по 1990 год реакторов – экспериментальные установки с мощностями в районе 50 МВт<sup>161</sup>. Ясно, что статистику по таким установкам строить нельзя – всё равно что определять ТТХ МиГ-29 по авиеткам братьев Фарман.

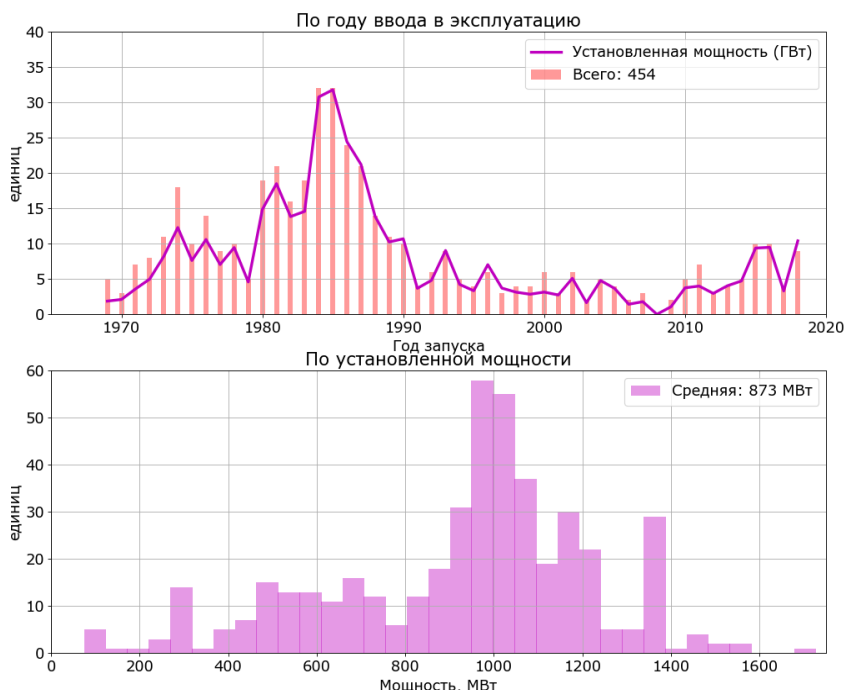
С 1991 года по 2018 выведено из эксплуатации 103 реактора. Средняя продолжительность жизни машинки составила 33.6 года, средняя мощность – 524 МВт. Самым неудачным из группы был японский размножитель «Монзю» (246 МВт, размножение по проекту 1.2), запущенный 29 августа 1995 года, а 8 декабря того же года вставший на бесконечную «профилактику». В последний

---

<sup>161</sup> Реактор в Обнинске был фактически отключен от сети в 1959 году и до 1991 использовался в качестве экспериментальной установки.

раз реактор недолго работал в 2010, и с тех пор принимается решение о демонтаже.

#### Распределение реакторов



Удивительный долгожитель – реактор «Устричный ручей» в Нью-Джерси, США (619 МВт), отслуживший без малого 48 лет и торжественно закрытый в полностью рабочем состоянии 17 сентября 2018 года. Не выслужили полный срок «Чернобыль-2» (925 МВт, 13 лет), «Чернобыль-1» (740 МВт, 19 лет), «Чернобыль-3» (925 МВт, 19 лет)<sup>162</sup>. Тринадцать лет проработал американский размножитель «КНК II» (17 МВт), на год меньше размножал французский «Superphénix» (1'200 МВт). Сейчас самые старые реакторы в эксплуатации – 1969 года запуска: «Безнау-1» в Швейцарии (365 МВт), «Гинна» (580 МВт) и «Найн-Майл-Поинт-1» (621 МВт) в США, «Тарапур-1» и «Тарапур-2» в Индии (по 150 МВт). Последние два – близнецы японских «Фукусима-1/2», и, вероятно, наш следующий Чернобыль – если только не остановят вовремя. С другой стороны, швейцарцы заверяют, что, «Безнау-1/2» ~~могут~~ обязаны работать как местные часы с кукушкой: лет по 60 минимум, – отключение энергоблоков ожидается не ранее 2030 года!

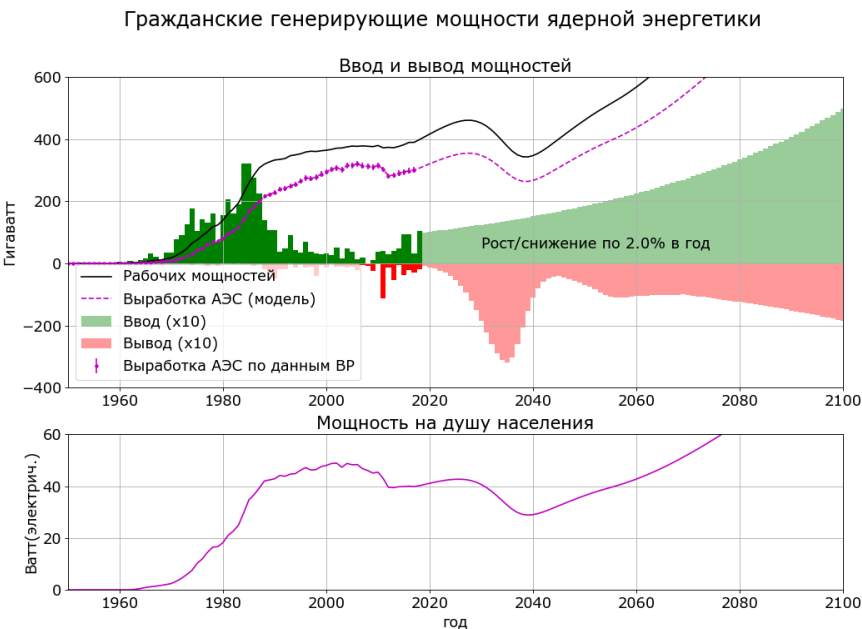
Типичная мощность «новых» энергоблоков – 1'000 МВт(электрических). Это логично: строить АЭС с одним энергоблоком в большинстве случаев невыгодно. Если по любым причинам реактор надолго останавливается, окружающие территории начинают испытывать энергетический голод. Опыт России, Канады и США, а теперь и КНР, показывает, что оптимальное число

<sup>162</sup> На «Фукусима-Дайичи» к моменту цунами реакторы были членами клуба «Кому за 30».



энергоблоков на АЭС – от 3 до 8.

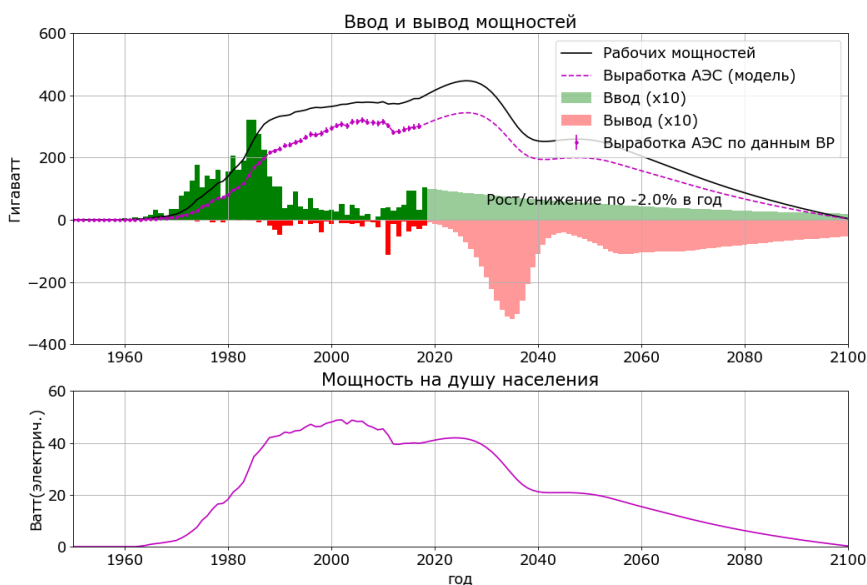
Можно принять в качестве параметров умеренно-оптимистической базовой модели подключение, начиная с 2019 года, 10 ГВт установленных мощностей ежегодно, с ростом по 2% в год. Функция остановки энергоблоков будет выглядеть как сглаженное распределение мощностей по возрасту, сдвинутое на 50 лет. Утилизацию установленной мощности оставим постоянной по факту на уровне 77% (даже если будет 90%, существенной роли это не сыграет).  
Программа `Chapter 12\Test_10_Nuclear_Reactors_Projection.py`



К сожалению, ждать чудес от ядерной энергетики не приходится. Вплоть до 2070 года она будет производить на каждого землянина менее 60 Вт мгновенной мощности. Из дров, соломы и сушёного навоза в 2017 году было выработано не менее 120 Вт тепловой энергии на душу, то есть вдвое больше. Это само по себе не значит, что от ядерной энергетики человечество откажется. Просто распределение будет неравномерным: скажем, в 2060 году 2 миллиарда из 10 имеют по 200 Вт в среднем от мирного атома, зато оставшиеся 8 миллиардов могут использовать больше дров; не 120 Вт, а целых 150!

Ожидаемый вывод мощностей на графике объясняет нежелание добывающих компаний инвестировать в добычу урана. Если возобладают Зелёные, и ввод новых реакторов опять замедлится, то потребность в уране резко снизится примерно с 2030 года. Освоение месторождений урана – дело долгое и дорогостоящее. Прежде чем начинать строить дороги и обоганительный комбинат, надо иметь уверенность, что предприятие проработает хотя бы лет 30. Зеленые предпочитают иметь по 45 кг сушёного навоза на лицо и гарантий не дают. Один из нехороших, негодных сценариев показан ниже.

## Гражданские генерирующие мощности ядерной энергетики



### Подведём итоги главы:

- В 2008 году Д.Мак-Кей попробовал рассчитать уровень жизни Великобритании при условии перехода на 100% возобновляемых источников энергии. Инженерные прикидки показали, что сохранить существующий уровень жизни за счёт одних возобновляемых источников невозможно.
- Комбинируя возобновляемые и невозобновляемые источники, а также с применением технологий энергосбережения, можно к 2050 году обеспечить условно комфортное проживание британцев на уровне потребления порядка 2'600 Вт на душу населения, что соответствует реальному 5.5 кг условной нефти в день (2.01 тонны в год). Эта оценка на 40% ниже, чем предсказание Й.Рандерса для стран ОЭСР<sup>163</sup>.
- Прикидка Д.Мак-Кея подтверждена по независимым данным добычи и потребления Великобритании.
- До коммерческого управляемого термоядерного синтеза ещё довольно далеко. Чтобы не «провалиться» на уровень жизни Викторианской Англии середины XIX века, требуется развитие ядерной энергетики, в том числе реакторов-бридеров.
- Рассмотрена модель подключения и вывода гражданских ядерных мощностей. Развитие будет тормозиться, во-первых, экологическими проблемами при выщелачивании урана, и во-вторых, недостатком

<sup>163</sup> Предсказание Рандерса подробно разбиралось в главе 7.

инвестиций в ядерную отрасль в период после катастрофы в Чернобыле (с начала 1990-х по конец 2000-х).

- В умеренно-оптимистических предположениях, производство ядерной энергии на душу населения будет оставаться низким вплоть до 2070 года. Этот уровень можно оценить в пределах 50 Вт нефтяного эквивалента, то есть ниже, чем энергия, получаемая в среднем от сжигания дров, соломы и прочей биомассы. Приходится согласиться с оценкой Й.Рандерса: ядерная энергетика – это тот козырный туз, который в нашем раскладе не сыграет.