

Аккумуляция энергии в АэроГЭС

АэроГЭС, как и другие ВИЭ (возобновляемые источники энергии: солнце, ветер и другие), метеозависима и нуждается в аккумуляции энергии, кроме случая, когда АэроГЭС используется только для получения воды. Пока ВИЭ, включая АэроГЭС, подключены к общей электросети и занимают незначительную долю в генерации ЭЭ, проблема аккумуляции не стоит слишком остро, так как традиционные источники смогут покрывать неравномерность выработки ВИЭ. Однако эти рассуждения неприемлемы при использовании АэроГЭС в качестве автономного источника энергии, например, для целей армии, ВМФ или МЧС.

В среднем по данным НАСА облака покрывают 67% поверхности Земли, и в смысле природных факторов АэроГЭС по равномерности генерации выглядит даже лучше других ВИЭ с типичным КИУМ ~ 20-40% ^[1]. Тем не менее мы можем выделить следующие три уровня неравномерности, которые нужно рассмотреть:

1. Локальная неравномерность - разрывы в потоке облаков.
2. Метео неравномерность - перемены типа погоды (например, с «облачно» на «ясно»).
3. Сезонная неравномерность - смена времен года (например, наступление зимы).

Очевидно, что для каждого типа неравномерности можно использовать разные подходы. В целом, можно предложить следующий набор возможных мер:

1. Традиционные химические аккумуляторы. Во многих работах ^[2] по ВИЭ показано, что из всех существующих способов хранения энергии обычные свинцово-кислотные аккумуляторы остаются пока самым дешевым способом аккумуляции ^[3] (~\$150/кВтч капиталовложений при лимите в 500 полных циклов разряда или при пересчете на издержки за все время жизни аккумулятора ~\$0.30/кВтч при характеристиках ~0.013м³/кВтч, ~25kg/кВтч, КПД ~80%).
2. Локальное гидроаккумуляция. Это одно из преимуществ АэроГЭС перед другими ВИЭ. АэроГЭС может удерживать некоторое количество воды в верхнем бьефе, что потребует дополнительных расходов на аэростатическое удержание. Легко подсчитать, что при высоте 2 км каждый кг воды запасает $1\text{ кг} \cdot 10\text{ м/с}^2 \cdot 2000\text{ м} = 0.02\text{ МДж} = 0.0056\text{ кВтч}$, для удержания которого требуется примерно 1 м³ или 0.1 кг водорода с минимальной текущей стоимостью ~\$0.2-0.3, что эквивалентно ~\$35-53/кВтч, что как минимум в три раза дешевле химических аккумуляторов. Реально выгода еще больше, так как АэроГЭС не покупает водород, а производит его сама, т. е. не создает никаких внешних издержек. При этом нет никаких лимитов по циклам гидроаккумуляции и обычно выше КПД. Кроме того, регулирование количества воды в верхнем бьефе дает дополнительный удобный механизм управления высотой подъема АэроГЭС для оптимизации сбора воды.
Впрочем, даже без этого дополнительного запаса воды АэроГЭС может использовать и тот запас воды, который все равно находится в шланге и на сетках. Например, для базового технического прототипа из ТЭО запас воды в шланге для средней оценки производительности составляет 3572 кг. Учитывая, что в среднем напор этой воды лишь половина от исходного, т. е. 1 км, получаем запас энергии ~10 кВтч, что соответствует нескольким минутам работы, в течение которых АэроГЭС будет продолжать работу, постепенно снижая мощность от номинальной мощности 185 кВт (например, в случае разрыва в потоке облаков).
3. Каскадное гидроаккумуляция. Это еще одно принципиальное преимущество АэроГЭС стационарного типа. Как известно, одним из лучших решений задачи неравномерности для любых ВИЭ сейчас является использование ГАЭС ^[4]. Для этого, используя подходящую возвышенность, строят обратимую ГЭС, которая работает то в

насосном, то в генераторном режиме. При этом КПД обратимых гидроагрегатов как правило существенно хуже обычных гидротурбин.

АэроГЭС каскадного типа изящно решает эту проблему, заодно решая и проблему своей метеозависимости. Если имеется подходящая возвышенность, но с нее не течет никакая река, то АэроГЭС может легко организовать эту "реку" и промежуточный верхний бьеф, сливая свою воду в естественном (метеозависимом) режиме не до нижнего бьефа, а до этого промежуточного верхнего бьефа такой каскадной ГЭС. Тогда эта нижняя ГЭС и будет играть роль гидроаккумулятора, причем с нормальными гидротурбинами, а согласованная работа самой АэроГЭС и этой каскадной обычной ГЭС позволит полностью исключить метеозависимость. Насосный режим при этом можно исключить - насосом будет работать само солнышко, поднимая воду до облаков.

4. Индуцированная или поверхностная конденсация. Еще одна возможность снижения неравномерности, связанная с физическими принципами работы АэроГЭС. В нормальном режиме сетки АэроГЭС предназначены для улавливания микрокапель облаков, т. е. используется влага от эффекта объемной конденсации. Тем не менее, предполагается, что и в отсутствие облаков на сетках АэроГЭС должна происходить поверхностная конденсация (подобно выпадению росы), так как по технологии они подняты заведомо выше точки росы. По предварительным оценкам, этот эффект, конечно, будет давать значительно меньше воды, чем просеивание облака, но тем не менее этот эффект должен существовать и может быть проверен экспериментально.
5. Накопление водорода. Тут АэроГЭС также имеет значительное преимущество перед другими ВИЭ. Преобразование, накопление и дальнейшее использование энергии в виде водорода — это одна из основных идей альтернативной энергетики по замене углеводородных видов топлива. При сравнительно небольших доработках водород можно использовать практически во всех энергетических и транспортных установках, которые сейчас используют углеводороды, что создает возможность постепенного перехода к новой зеленой энергетике с минимальными затратами и без кардинального разрушения прежней энергетической инфраструктуры.

Главная проблема для всех других видов ВИЭ при получении водорода от избыточной энергии — это отсутствие в месте расположения солнечных панелей или ветротурбин источников пресной воды высокого качества очистки, необходимой для работы электролизеров. Напротив, АэроГЭС имеет в избытке и энергию, и идеальную пресную воду (практически, дистиллят). Более того, АэроГЭС технологически и конструктивно может естественным образом хранить водород в своих аэростатах или даже транспортировать накопленный водород в таких аэростатах (уже в виде дирижаблей) потребителю.

Легко посчитать, что таким способом можно модифицировать АэроГЭС для увеличения ее аккумулирующей способности примерно в 600 раз! Для этого достаточно кроме водовода спустить вниз и водородовод и использовать баллонетные аэростаты, которые при этом не только будут обеспечивать поддержание элементов АэроГЭС, но и хранить запас водорода в качестве энергоаккумулирующего агента. Легко показать, что 1 кг (10 м³) водорода (с удельной теплотой сгорания 120.9 МДж/кг) удерживает в верхнем бьефе примерно 10 кг воды с запасом гидроэнергии всего в 0.2 МДж. Таким образом на АэроГЭС в период перепроизводства энергии всегда можно путем закачки водорода (полученного внизу электролизом) и сбалансированного слива воды обеспечить необходимое количество воды в верхнем бьефе (для поддержания конструкции в равновесном состоянии и максимального снижения натяжения удерживающих тросов) и увеличенный в 600 раз запас энергии, который при необходимости в энергии всегда можно так же сбалансировано получить обратно в топливных элементах (из водорода) и турбогенераторе (из воды).

Итак мы видим, что из пяти возможных способов борьбы с метеозависимостью, четыре являются либо исключительным, либо существенным преимуществом АэроГЭС перед другими ВИЭ. Рассмотрим примерное влияние на ТЭО ^[5] учета необходимости аккумулирования энергии для минимального (1.85 кВт) и базового (185 кВт) технического прототипа.

Локальная неравномерность - разрывы в потоке облаков

Так как величины интегральной производительности АэроГЭС в ТЭО базируются на интегральных данных по сбору тумана и соответствующего потока воды, то это допускает исходную неравномерность при получении этих данных, которую довольно трудно оценить. В случае АэроГЭС мы предполагаем использовать облака нижнего яруса (слоисто-дождевые, слоисто-кучевые, слоистые) и облака вертикального развития (кучевые, кучево-дождевые) ^[6]. Большинство таких облаков имеют скважность близкую к 1, т. е. идут практически сплошным слоем. Предположим для нашего условного расчета, что АэроГЭС должна устойчиво работать даже при скважности 2 при том, что такой режим может составлять до 10% времени. Для типичных размеров облаков ~ 1 км и типичной скорости ветра на высоте 2 км ~ 10 м/с это означает, что АэроГЭС должна обеспечить номинальную выработку при разрыве облаков ~ 1 км, т. е. в течение ~ 100 секунд, что соответствует разовому необходимому аккумулированию 185 кДж (~0.05кВтч) и 18500 кДж (~5кВтч) соответственно, и при полном аккумулировании в течение ~ 1 года, т. е. по энергии примерно до половины от выработки в течение 10% от расчетного времени жизни установки в 10 лет.

Прототип по расчетам ТЭО	Минимальный	Базовый
Разовое необходимое аккумулирование, 100 сек, кВтч	0.05	5
Полное аккумулирование, ~ 10% за 10 лет, кВтч	~8000	~800000
Полная стоимость установки без аккумулирования, \$	2906	85459
Свинцово-кислотные аккумуляторы		
Разовое удорожание установки \$150/кВтч, \$	7.5	750
Суммарные издержки, ~ 10% за 10 лет, \$0.30/кВтч, \$	~2400	~240000
Удорожание установки за счет аккумулирования, %	~82	~281
Локальное гидроаккумулирование		
Аккумулирующий запас воды в верхнем бьефе, кг	~10	~1000
Прирост веса нагрузки (и объема аэростата), % (G)	~7	~17
Прирост стоимости оболочки аэростата, % (~ G^(2/3))	~3.7	~6.7
Прирост стоимости оболочки аэростата, \$	~16	~325
Удорожание установки за счет гидроаккумулирования, %	~0.6	~0.4
Накопление водорода с использованием обратимых топливных элементов ^{[7][8][9]}		
Разовое удорожание установки \$3400/кВт, \$	6290	629000
Суммарные издержки, ~ 10% за 10 лет, \$170/кВт в год, \$	~315	~31500
Удорожание установки за счет накопления водорода, %	~227	~773

Таким образом, с локальной неравномерностью АэроГЭС легко справляется за счет локального гидроаккумулирования, что уже дает ей глобальное преимущество перед солнечной и ветровой энергетикой, где для решения подобной проблемы приходится использовать свинцово-кислотные аккумуляторы с многократным удорожанием ВИЭ ^[10].

Метео неравномерность - перемены типа погоды

Метео неравномерность для определенного места можно оценить по метеорологическим архивам ^[11] или по данным метеорологических спутников НАСА ^[12]. Например, для СПб анализ облачности в теплый период года показывает, что перемена типа погоды с «облачно» на «ясно» может составлять по длительности примерно до одной недели с периодичностью порядка месяца, т. е. полное число циклов заряда-разряда (120) не превысит лимит циклов аккумулятора (500), и эксплуатационными издержками можно пренебречь. Очевидно, что локальная энергоустановка любого типа ВИЭ не может справиться с аккумулярованием недельной выработки (если только это не стационарная установка, которая может реализовать каскадную схему АэроГЭС). Тем не менее проведем соответствующие расчеты.

Прототип по расчетам ТЭО	Минимальный	Базовый
Разовое недельное аккумулярование, 168 часов, кВтч	310.8	31080
Полная стоимость установки без аккумулярования, \$	2906	85459
Свинцово-кислотные аккумуляторы		
Разовое удорожание установки \$150/кВтч, \$	46620	4662000
Удорожание установки за счет аккумулярования, %	~1600	~5500
Локальное гидроаккумулярование		
Аккумулярующий запас воды в верхнем бьефе, кг	~56000	~5600000
Условный радиус аэростата (по балансу сил), м	23.9	110.34
Вес оболочки (155 г/м ²), кг	1112	23700
Стоимость оболочки аэростата, \$	~21500	~459000
Удорожание установки за счет гидроаккумулярования, %	~740	~537
Накопление водорода с использованием обратимых топливных элементов		
Разовое удорожание установки \$3400/кВт, \$	6290	629000
Суммарные издержки, ~ 25% за 10 лет, \$170/кВт в год, \$	~787	~78700
Удорожание установки за счет накопления водорода, %	~244	~828

Таким образом, как и ожидалось, никакой вариант не является приемлемым. Между тем, по данным википедии ^[13] можно ожидать снижения стоимости обратимых топливных элементов до уровня \$254/кВт (General Electric, 2006), и тогда этот вариант будет приемлемым. Кроме того, этот тип топливного элемента может использовать не только водород, но и обычный пропан, что позволяет его использовать вместо резервного дизель-генератора (ДГ).

Накопление водорода с использованием обратимых топливных элементов (GE)		
Разовое удорожание установки \$254/кВт, \$	~470	~47000
Суммарные издержки, ~ 25% за 10 лет, \$170/кВт в год, \$	~787	~78700
Удорожание установки за счет накопления водорода, %	~43	~147
Удельная стоимость с учетом издержек за 10 лет, \$/кВт	~2250	~1141

Тем не менее, на сегодняшний день все же придется использовать ДГ как резервный источник энергоснабжения.

Сезонная неравномерность - смена времен года

Как уже было сказано, АэроГЭС может работать круглогодично только в южных странах. В условиях России капельные облака существуют в нижней тропосфере только примерно полгода, т. е. АэроГЭС должна за теплый период года либо накапливать достаточное количество воды для каскадной ГЭС, либо накапливать достаточное количество водорода, чтобы использовать его оставшиеся полгода в топливных элементах или вместо природного газа в существующей теплоэнергетике, либо просто замещаться на это время традиционными энергоисточниками. Для случая автономного применения в настоящее время для любых ВИЭ в качестве резервного энергоисточника используют ДГ. Сравним технико-экономические характеристики при автономном круглогодичном использовании только ДГ или ДГ+АэроГЭС в условиях средней России. Примем, что с учетом зимы и перемен погоды АэроГЭС сможет активно работать только треть времени года. По анализу рынка дизельных и бензиновых генераторов примем средние оценки стоимости ~\$150/кВт и издержек ~\$0.15/кВтч.

Прототип по расчетам ТЭО	Минимальный	Базовый
Полная стоимость АэроГЭС без резервирования, \$	2906	85459
Разовое удорожание установки \$150/кВт, \$	~278	~27800
Издержки на топливо, ~ 67% за 10 лет, \$0.15/кВтч, \$	~16287	~1628700
Удорожание установки за счет резервирования, %	~570	~1938
Полная стоимость с учетом издержек за 10 лет, \$	~19471	~1742000
Удельная стоимость с учетом издержек за 10 лет, \$/кВт	~10525	~9416
Использование только автономного ДГ	1.85 кВт	185 кВт
Стоимость ДГ (с предполагаемым ресурсом 10 лет), \$	~278	~27800
Издержки на топливо за 10 лет, \$0.15/кВтч, \$	~24309	~2430900
Полная стоимость с учетом издержек за 10 лет, \$	~24587	~2458700
Удельная стоимость с учетом издержек за 10 лет, \$/кВт	~13290	~13290
Полная экономия от использовании ДГ+АэроГЭС, \$	~5116	~716700

Также рассмотрим использование топливных элементов вместо ДГ, предполагая, что нам придется использовать летом по три модуля АэроГЭС вместо одного, чтобы 2/3 энергии резервировать на зиму в виде водорода.

Накопление водорода с использованием обратимых топливных элементов		
Полная стоимость 3-х АэроГЭС без резервирования, \$	8718	256377
Разовое удорожание установки \$3400/кВт, \$	6290	629000
Суммарные издержки, ~ 67% за 10 лет, \$170/кВт в год, \$	~2107	~210700
Полная стоимость с учетом издержек за 10 лет, \$	~17115	~1096000
Удельная стоимость с учетом издержек за 10 лет, \$/кВт	~9251	~5924
Полная экономия от использовании ТЭ+3АэроГЭС, \$	~7472	~1362700

Таким образом, даже вариант с использованием старых обратимых топливных элементов для запаса водорода, необходимого для длительного полугодового резервирования, вместе с утроенной АэроГЭС (при выдаче той же мощности) оказывается выгоден по сравнению с ДГ.

Сравнение по стоимости воды

Так как АэроГЭС производит не только энергию, но и пресную (практически идеальную дистиллированную) воду, то можно оценить стоимость такой воды по сравнению с альтернативными технологиями ^[14], например, для нужд ВМФ или МЧС.

Technology	Reverse Osmosis	Atmospheric Distillation	Mechanical Vapor Compression	Vacuum Distillation	Multistage flash	M-Cycle
Waste heat consumption, Btu per lb recycled water	0	0	0	1000	104	312
Operating temperature, F	50-90	212	220	130-150	220-240	90-110
Electricity consumption, kWh per m ³ recycled water	1-5	0.5-1	20	1-2	3.5-4	0.1-0.5
Fuel energy consumption, Btu per lb recycled water	0	1000	35	0	0	0
Clean water quality (total dissolved solids reduction)	95%	99%	99%	99%	99%	99%
Water recovery, %	40-50	70-98	95-99	70-98	70-98	90-95
Concentrate discharge, %	50-60	2-30	1-5	2-30	2-30	1-5
Cooling water requirement, lb per lb recycled water	0	50-60	0	50-60	0	0
Unit capacity, GPD	175000	175000	175000	175000	175000	175000
Operating cost, \$ per 1,000 gallons of recycled water	2.91	1.49	3.07	1.44	1.51	0.91

Из расчетов ТЭО следует, что даже если АэроГЭС будет использоваться только для производства воды, то стоимость такой воды будет крайне мала. Например, даже минимальный технический прототип будет производить в сутки ~10 тонн или м³ воды, что при пересчете на срок эксплуатации 10 лет дает 36500 тонн или ~9.64 млн. галлонов, т. е. стоимость воды составит ~ \$0.08/м³ или ~ \$0.3 за 1000 галлонов, что в несколько раз дешевле, чем другие технологии перечисленные в таблице. Базовый технический прототип будет давать воду еще дешевле: ~ \$0.02/м³ или ~ \$0.09 за 1000 галлонов. При том, что производство такой воды будет не потреблять, а производить энергию...

(c) Andrew Kazantsev, inventor of Air HES, andrew@airhes.com

- [1] OpenEI database, Capacity Factor <http://en.openei.org/apps/TCDB>
- [2] FUNDAMENTAL LIMITATIONS OF RENEWABLE ENERGY <https://oneinabillionblog.com/energy/renewable-energy/fundamental-limitations-of-renewable-energy/>
- [3] Got Storage? How Hard Can it Be? <http://physics.ucsd.edu/do-the-math/2011/09/got-storage-how-hard-can-it-be/>
- [4] THE RENEWABLE ENERGY GRID PARITY REALITY CHECK <https://oneinabillionblog.com/energy/renewable-energy/the-renewable-energy-grid-parity-reality-check/>
- [5] ТЭО для различных примеров АэроГЭС http://barixa.net/TEO_airhes_ru.pdf
- [6] Облака (Википедия) <https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9E%D0%B1%D0%BB%D0%B0%D0%BA%D0%B0>
- [7] LOW COST, HIGH EFFICIENCY REVERSIBLE FUEL CELL (AND ELECTROLYZER) SYSTEMS <https://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/pdfs/30535aw.pdf>
- [8] Reversible fuel cell goes both ways for the US Navy <http://newatlas.com/boeing-reversible-us-navy-fuel-cell/41726/>
- [9] Fuel Cell of the Future <http://www.controlglobal.com/articles/2008/223/?show=all>
- [10] THE IMPACT OF ENERGY STORAGE ON SOLAR PV GRID PARITY <https://oneinabillionblog.com/energy/renewable-energy/the-impact-of-energy-storage-on-solar-pv-grid-parity/>
- [11] https://www.windguru.cz/archive.php?id_spot=4859
- [12] Giovanni. The Bridge Between Data and Science [http://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/#service=TmAvMp&starttime=&endtime=&data=MAIMCPASM_5_2_0_Q_L\(z%3D1000\)&variableFacets=dataFieldMeasurement%3AAtmospheric%20Moisture%3B](http://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/#service=TmAvMp&starttime=&endtime=&data=MAIMCPASM_5_2_0_Q_L(z%3D1000)&variableFacets=dataFieldMeasurement%3AAtmospheric%20Moisture%3B)
- [13] Твердооксидный топливный элемент https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A2%D0%B2%D0%B5%D1%80%D0%B4%D0%BE%D0%BE%D0%BA%D1%81%D0%B8%D0%B4%D0%BD%D1%8B%D0%B9_%D1%82%D0%BE%D0%BF%D0%BB%D0%B8%D0%B2%D0%BD%D1%8B%D0%B9_%D1%8D%D0%BB%D0%B5%D0%BC%D0%B5%D0%BD%D1%82
- [14] Анализ дистилляционных систем http://sssrregion.ru/pics/Khalatov_perspectivi.pdf