

ТЭО для различных примеров [АэроГЭС](#)

Исходные данные:

1. Получение воды из тумана (минимальная оценка)

- По данным [чилийских установок](#) : 3-13 л/м2/сутки
- По данным проекта [FogQuest](#) : 5-25 л/м2/сутки
- По данным [LWC](#) для тумана (0.05 г/м3) при скорости ветра у поверхности земли в горах ~5 м/с и [эффективности сеток](#) ~50% : 10.8 л/м2/сутки (расчет)

Видно, что расчетные данные вполне согласуются с опытными для пассивных систем сбора тумана. Таким образом, если взять эти данные за основу для минимальных оценок сбора воды в облаках, то можно принять величину 10 л/м2/сутки в качестве нижней границы в ТЭО.

2. Получение воды из облаков (средняя оценка)

- По данным для [активных высокогорных коллекторов](#) сбора тумана в условиях фактически соответствующим облакам : 160-300 л/м2/сутки
- По данным [LWC](#) для обычных слоистых и кучевых облаков (0.25-0.45 г/м3) при скорости ветра на высоте облаков ~10 м/с и [эффективности сеток](#) ~50% : 108.0-194.4 л/м2/сутки (расчет)

Видно, что расчетные данные вполне согласуются с опытными для активных (флюгерных) систем сбора тумана, конструктивно соответствующих АэроГЭС. Таким образом, если взять эти данные за основу для средних оценок сбора воды в облаках, то можно принять величину 100 л/м2/сутки в качестве базовой в ТЭО.

3. Получение воды из туч (максимальная оценка)

- По данным [LWC](#) и [наблюдениям](#) для туч и кучево-дождевых облаков (1-3 г/м3) при скорости ветра на высоте облаков ~15 м/с и [эффективности сеток](#) ~50% : 648-1944 л/м2/сутки (расчет)

Таким образом, если взять эти данные за основу для максимальных оценок сбора воды в районах интенсивного выпадения осадков (в экваториальной зоне, а также на юге Индии и Китая), то можно принять величину 1000 л/м2/сутки в качестве верхней границы в ТЭО.

Научный прототип

Это минимальная установка, используемая для получения экспериментальных данных по сбору воды из облаков и проверки конструктивных решений. Аналогично системам сбора тумана можно использовать сборник SFC (standard fog collector, 1 m2). [Такая установка](#) была испытана на [Селигере 30.07.13](#) с подъемом на высоту ~1.5 км, но при спуске произошел обрыв троса. Испытания показали, что [альтернативная конструкция](#) на основе кайта может иметь преимущество за счет использования аэродинамических подъемных сил, но сама такая конструкция нуждается в более подробных и сложных аэродинамических расчетах (XFlow, ANSYS, etc.). [Гидравлический расчет](#) выполняется здесь для нахождения минимального диаметра водовода, который способен пропустить данный гравитационный поток в режиме водопада (т.е. такого диаметра, который соответствует равенству гидравлического сопротивления и гидравлического напора на малом участке водовода, например, на длине 10 м = 1 атм). Расчет в таблице приведен для высоты 2 км. Для оценки аэродинамической

подъемной силы кайта использована [упрощенная формула](#) $0.04 \cdot V^2 \cdot S$ при скорости ветра 5 и 10 м/с. Для оценки аэростатической подъемной силы аэростата принято, что каждый м³ водорода или гелия примерно соответствует 1 кг веса.

		На базе аэростата			На базе кайта (5-10 м/с)		
		10	100	1000	10	100	1000
Расчетная производительность, л/м ² /сутки	Тестированный прототип						
Сечение сбора, м ²	0.9	1	1	1	1	1	1
Поток, м ³ /час	[~0.005]	0.000417	0.00417	0.0417	0.000417	0.00417	0.0417
Минимальный D, мм	[1.55] 2.0x0.4	0.84	1.48	2.23	0.84	1.48	2.23
Вес воды в водоводе, кг	[3.77]	1.11	3.44	7.81	1.11	3.44	7.81
Вес ПВХ водовода (толщина стенки 0.5 мм), кг	[6.82] 7.04 (\$60)	3.70	6.50	9.81	3.70	6.50	9.81
Вес троса (дунеема 1.2 мм), кг	2.2 (\$256)	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2
Вес двойной сетки и воды на ней, кг	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
Вес дополнительных элементов, кг	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
Вес нагрузки, кг	[14.0]	8.21	13.34	21.02	8.21	13.34	21.02
Условный радиус аэростата (подбор), м	1.52	1.53	1.75	1.97			
Вес оболочки (ПВХ 0.16 мм), кг	6.5 (\$550)	4.75	8.6	10.9			
Объем аэростата, м ³	14.7	15.0	22.4	32.0			
Площадь кайта, м ²					8.2-2.05	13.4-3.35	21.0-5.25
Вес кайта (45 г/м ²), кг					0.37-0.09	0.60-0.15	0.95-0.24

Минимальный технический прототип

Это полноценная техническая установка, которая позволит при минимальных затратах проверить конструктивные элементы и ТЭО концепции АэроГЭС. Она отличается от научного прототипа тем, что содержит напорный водовод, гидротурбину (или гидродвигатель) и электрогенератор. При расчете толщины стенки шланга, армированного дунеема с расчетной прочностью 2.4 ГПа, применен 5-кратный запас. Водовод играет также роль троса, что проверяется в наиболее напряженной верхней точке, где расчетный запас равен 9.25 во всех вариантах. Предполагаемое время жизни установки — 10 лет.

	На базе аэростата			На базе кайта (5-10 м/с)		
	10	100	1000	10	100	1000
Расчетная производительность, л/м2/сутки	10	100	1000	10	100	1000
Сечение сбора, м2	100	100	100	100	100	100
Поток, м3/час	0.0417	0.417	4.17	0.0417	0.417	4.17
D при 10% потерь, мм	5.45	8.4	20.0	5.45	8.4	20.0
Вес воды в водоводе, кг	46.7	110.8	628.3	46.7	110.8	628.3
Расчетная толщина стенки на 20 МПа при 5-кратном запасе, мм	0.11	0.18	0.42	0.11	0.18	0.42
Вес шланга (дупеема), кг	3.77	8.95	50.76	3.77	8.95	50.76
Вес двойной сетки и воды на ней, кг	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0
Вес нагрузки, кг	70.4	139.7	698.8	70.4	139.7	698.8
Условный радиус аэростата (подбор по балансу аэростатических сил), м	2.73	3.39	5.67			
Вес оболочки (155 г/м2), кг	14.51	22.4	62.6			
Объем аэростата, м3	85.2	163.1	763.2			
Площадь кайта, м2				70-17.5	140-35	700-175
Вес кайта (taffeta), кг				3.15-0.79	6.3-1.58	31.4-7.9
Мощность при КПД 80%, кВт	0.185	1.85	18.5	0.185	1.85	18.5
Стоимость сетки (\$0.25/м2)*2, \$	50	50	50	50	50	50
Стоимость шланга (\$100/кг), \$	377	895	5076	377	895	5076
Стоимость оболочки (\$3/м2), \$	281	433	1212			
Стоимость кайта(\$2/м2), \$				140	280	1400
Суммарная стоимость материала, \$	708	1378	6338	567	1225	6526
Стоимость + труд (*2), \$	1416	2756	12676	1134	2450	13052
Стоимость гидрогенератора (по цене электродвигателя = кВт *2), \$	~70	~150	~1000	~70	~150	~1000
Полная стоимость установки, \$	1486	2906	13676	1204	2600	14052
Удельная стоимость, \$/кВт	8032	1571	739	6508	1405	760
Вода (прибыль за 10 лет, \$1/м3), \$K	3.65	36.5	365	3.65	36.5	365
ЭЭ (за 10 лет, \$0.1/кВтч), \$K	1.62	16.2	162	1.62	16.2	162
Суммарная прибыль за 10 лет, \$K	5.27	52.7	527	5.27	52.7	527
Возврат инвестиций за 10 лет, %	355	1813	3858	438	2027	3756
Срок окупаемости, лет	2.82	0.55	0.26	2.28	0.49	0.27
Возврат (только по ЭЭ) за 10 лет, %	109	557	1187	134	623	1156
Срок окупаемости только по ЭЭ, лет	9.17	1.79	0.84	7.43	1.60	0.87
Обеспечение водой и ЭЭ, человек	~1	~10	~100	~1	~10	~100

Базовый технический прототип

Это полноценная техническая установка, которая позволит осуществить водо- и электроснабжение небольших поселков и городов с помощью АэроГЭС. Она содержит напорный водовод, гидротурбину (или гидродвигатель) и электрогенератор. При расчете толщины стенки шланга, армированного дупеета с расчетной прочностью 2.4 ГПа, применен 5-кратный запас. Водовод играет также роль троса, что проверяется в наиболее напряженной верхней точке, где расчетный запас равен 9.25 во всех вариантах. Предполагаемое время жизни установки — 10 лет.

	На базе аэростата			На базе кайта (5-10 м/с)		
	10	100	1000	10	100	1000
Расчетная производительность, л/м2/сутки	10	100	1000	10	100	1000
Сечение сбора, м2	10000	10000	10000	10000	10000	10000
Поток, м3/час	4.17	41.7	417	4.17	41.7	417
D при 10% потерь, мм	20.0	47.7	140	20.0	47.7	140
Вес воды в водоводе, кг	628	3572	30772	628	3572	30772
Расчетная толщина стенки на 20 МПа при 5-кратном запасе, мм	0.42	0.99	2.92	0.42	0.99	2.92
Вес шланга (дупеета), кг	50.76	288.8	2487	50.76	288.8	2487
Вес двойной сетки и воды на ней, кг	2000	2000	2000	2000	2000	2000
Вес нагрузки, кг	2678	5861	35259	2678	5861	35259
Условный радиус аэростата (подбор по балансу аэростатических сил), м	8.78	11.35	20.51			
Вес оболочки (155 г/м2), кг	150	251	819			
Объем аэростата, м3	2833	6121	36121			
Площадь кайта, м2				2678-670	5861-1465	35259-8814
Вес кайта (taffeta), кг				120-30	264-66	1587-396
Мощность при кпд 80%, кВт	18.5	185	1853	18.5	185	1853
Стоимость сетки (\$0.25/м2)*2, \$	5000	5000	5000	5000	5000	5000
Стоимость шланга (\$100/кг), \$	5076	28875	248740	5076	28875	248740
Стоимость оболочки (\$3/м2), \$	2905	4854	15850			
Стоимость кайта(\$2/м2), \$				5358	11722	70518
Суммарная стоимость материала, \$	12981	38729	269591	15434	45597	324259
Стоимость + труд (*2), \$	25962	77459	539181	30868	92194	648518
Стоимость гидрогенератора (по цене электродвигателя = кВт *2), \$	~1000	~8000	~50000	~1000	~8000	~50000
Полная стоимость установки, \$	26962	85459	589181	31868	99194	698518
Удельная стоимость, \$/кВт	1457	461	317	1719	535	377

Вода (прибыль за 10 лет, \$1/м3), \$K	365	3652	36529	365	3652	36529
ЭЭ (за 10 лет, \$0.1/кВтч), \$K	162	1624	16235	162	1624	16235
Суммарная прибыль за 10 лет, \$K	528	5276	52764	528	5276	52764
Возврат инвестиций за 10 лет, %	1958	6174	8956	1656	5319	7554
Срок окупаемости, лет	0.51	0.16	0.11	0.60	0.19	0.13
Возврат (только по ЭЭ) за 10 лет, %	601	1900	2756	509	1637	2756
Срок окупаемости только по ЭЭ, лет	1.66	0.53	0.36	1.96	0.61	0.43
Обеспечение водой и ЭЭ, человек	~100	~1000	~10000	~100	~1000	~10000

Дальнейшее увеличение мощности

В принципе по той же схеме может быть рассчитан и следующий вариант — модуль большой мощности с сетью ~1 км². Однако здесь мы уже выходим на предельные параметры по размерам аэростатов и кайтов. Чтобы перейти к таким мощностям, надо менять конструктивные решения. Например, использовать сами сети как кайты, для поддержания основного веса, создаваемого водой в водоводе, а аэростат использовать только для поддержания сетей и пустого водовода в полное безветрие. Это потребует создание соответствующей системы управления (желательно на естественных физических обратных связях), которая будет отслеживать скорость ветра и аварийно сливать или распылять воду из водовода при угрозе падения. Вот пример расчета ТЭО такой установки.

Расчетная производительность, л/м2/сутки	10	100	1000
Сечение сбора, км2	1	1	1
Поток, м3/час	417	4170	41700
D при 10% потерь, мм	140	385	900
Вес воды в водоводе, кг	30772	232713	1271700
Расчетная толщина стенки на 20 МПа при 5-кратном запасе, мм	2.92	8.02	18.75
Вес шланга (дунеема), кг	2487	18811	102796
Вес двойной сетки и воды на ней, кг	200000	200000	200000
Вес нагрузки (без учета веса воды в водоводе), кг	202487	218811	302796
Условный радиус аэростата (подбор по балансу аэростатических сил), м	36.59	37.55	41.82
Вес оболочки (155 г/м2), кг	2606	2745	3404
Объем аэростата, м3	205095	221666	306211
Мощность при КПД 80%, кВт	1853	18533	185333
Стоимость сетки (\$0.25/м2)*2, \$	500000	500000	500000
Стоимость шланга (\$100/кг), \$	248740	1881099	10279575
Стоимость оболочки (\$3/м2), \$	50447	53129	65899
Суммарная стоимость материала, \$	799187	2434228	10845474

Стоимость + труд (*2), \$	1598375	4868455	21690948
Стоимость гидрогенератора (по цене электродвигателя = кВт *2), \$	~50000	~300000	~1000000
Полная стоимость установки, \$	1648375	5168455	22690948
Удельная стоимость, \$/кВт	889	279	122
Вода (прибыль за 10 лет, \$1/м3), \$K	36529	365292	3652920
ЭЭ (за 10 лет, \$0.1/кВтч), \$K	16235	162352	1623520
Суммарная прибыль за 10 лет, \$K	52764	527644	5276440
Возврат инвестиций за 10 лет, %	3201	10208	23253
Срок окупаемости, лет	0.31	0.10	0.04
Возврат (только по ЭЭ) за 10 лет, %	984	3141	7155
Срок окупаемости только по ЭЭ, лет	1.02	0.32	0.14
Обеспечение водой и ЭЭ, человек	~10000	~100000	~1000000

Сюда же следует отнести необходимость разработки системы автоматического и взаимосвязанного аккумулирования воды в верхнем бьефе и водорода в баллонетных азростатах, что позволит значительно уменьшить метеозависимость АэроГЭС без использования внешних способов аккумулирования (которые кардинально удорожают солнечные и ветровые установки).

Наконец, для ГВт-ных станций может оказаться вполне экономически выгодным строительство вертикального напорного (или даже вакуумированного безнапорного) водовода высотой 1-2 км с подачей в него воды сверху от расположенных вокруг азростатных сетей общим размером в десятки квадратных километров.

Ирригационный проект

Это специальная установка, которая может продуцировать дождь в засушливых областях, например, создавая оазис в пустыне или дождь над безводным островом (типа Мальты). Она не имеет водовода, но может иметь элементы дренажной системы, для формирования струи воды, чтобы уменьшить испарение дождя по пути к земле. Она может быть сделана как на основе азростата (тогда возможно использование и [эффекта обледенения](#) на больших высотах), так и на основе кайта (тогда сбор влаги из облаков возможен только при положительных температурах, что ограничивает высоту и, соответственно, площадь покрытия такой установки).

Оценим, например, площадь сети такой ирригационной АэроГЭС, для создания оазиса над некоторым населенным пунктом в пустыне Сахара. Для примера возьмем метеорологические данные за год для [Egypt - Wadi El Rayan](#). Видно, что там практически нет дождей, но облачность за год можно оценить примерно в 10%. При этом по аэрологической диаграмме мы можем оценить высоту облаков около 4 км. При типичном отклонении от вертикали ~ 15 градусов получаем площадь ирригации около 3 км². Если мы хотим создать там комфортное число осадков на уровне среднего по планете ~1 м в год, то это дает поток ~ 8200 м³/сутки, что для вышеуказанной средней оценки получения воды из облаков дает площадь сети 82000 м², а с учетом 10% метеорологической оценки облачности увеличивает этот размер еще на порядок до 0.82 км².

Проект по снабжению питьевой водой

Это, возможно, самый выгодный стартовый проект для всей концепции АэроГЭС. Эта установка аналогична ирригационному проекту, но отличается тем, что имеет гравитационный водовод (как в установке научного прототипа). Так как такой водовод по сути является просто канальным водопадом, он не должен выдерживать давление столба воды в 2 км. Аэростат должен при этом держать собственный вес, вес стекающей воды, вес гравитационного водовода и вес сетей с остаточной водой. При расчете шланга из дупеета с 5-кратным запасом прочности в верхней точке надо учитывать только его собственный вес и вес воды в нем.

Рассмотрим, например, ТЕО для водоснабжения острова Мальта (452 тыс. человек), единственного государства, которое вообще не имеет собственной пресной воды. [Метеоданные](#) показывают, что кроме двух летних месяцев в остальное время над Мальтой обычное распределение облачности, но из-за отсутствия высоких гор естественные источники пресной воды отсутствуют.

Расчетная производительность, л/м2/сутки	10	100	1000
Сечение сбора, км2	1	1	1
Поток, м3/час	417	4170	41700
Минимальный D, мм	102	240	570
Вес воды в водоводе, кг	16334	90432	510093
Расчетная толщина стенки по прочности в верхней точке при 5-кратном запасе, мм	1.11	2.61	6.19
Вес шланга (дупеета), кг	690	3816	21493
Вес двойной сетки и воды на ней, кг	200000	200000	200000
Вес нагрузки (с учетом веса воды в водоводе), кг	217024	294247	731586
Условный радиус аэростата (подбор по балансу аэростатических сил), м	37.45	41.43	56.07
Вес оболочки (155 г/м2), кг	2730	3342	6120
Объем аэростата, м3	219899	297724	738006
Стоимость сетки (\$0.25/м2)*2, \$	500000	500000	500000
Стоимость шланга (\$100/кг), \$	68969	381678	2149299
Стоимость оболочки (\$3/м2), \$	52846	64676	118460
Суммарная стоимость материала, \$	621815	946253	2767759
Стоимость + труд (*2) = полная стоимость, \$	1243630	1892507	5535518
Вода (прибыль за 10 лет, \$1/м3), \$K	36529	365292	3652920
Возврат инвестиций за 10 лет, %	2937	19302	65991
Срок окупаемости, лет	0.34	0.05	0.02
Обеспечение водой, человек	~10000	~100000	~1000000