

Комплексная модель АэроГЭС

Предыдущие статьи по АэроГЭС ^{[1][2][3]} были направлены на то, чтобы рассмотреть отдельные критические проблемы, которые возникали при обсуждении проекта. Например, при написании статьи по ТЭО я исходил из известных данных по системам сбора тумана, хотя мои последующие расчеты по оптимизации сети показали, что эффективность сеток может реально быть в 2-3 раза ниже указанных 50%. Также в расчетах ТЭО я ориентировался на аэростатический баланс сил, предполагая, что свободный подвес сети позволит автоматически избежать существенных аэродинамических нагрузок, оставляя за скобками существенное уменьшение производительности при наклоне сеток. Та же проблема возникает и при использовании вместо сеток продуваемых кайтов, которые также должны менять угол атаки или площадь поверхностей водосборника для предотвращения чрезмерных аэродинамических нагрузок. Пришло время собрать комплексную модель АэроГЭС, пригодную для параметрической оптимизации.

Исходные данные и параметры оптимизации:

1 Расчетное время жизни, LT, годы

Оценивается примерно в 10 лет по данным для аналогичных устройств. Например, в ^[4] такая оценка приводится для систем сбора тумана, а в ^[5] для парусов морских судов. Следует заметить, что данная величина используется только для экстенсивных критериев и на интенсивные целевые функции (например, на срок окупаемости) не влияет.

2 Средняя скорость ветра, V_a , м/с

Оценивается на основании метеоданных для расчетной высоты и предполагаемого местоположения АэроГЭС. Например, согласно ГОСТ Р 53460 - 2009 ^[6] (таблица 149, стр. 184) средняя скорость скалярного ветра на высоте 2 км в Санкт-Петербурге летом оценивается величиной 2.7 м/с. Тогда как среднегодовая скорость ветра над Европой в ^[7] оценивается величиной 6.8 м/с. В то же время можно встретить и оценку 10 м/с на высоте 2 км, например, в обзорах ^[8] по ветрогенерации. Эта скорость используется в простых расчетах среднегодового потока влаги в облаках или в более сложных расчетах для определения коэффициентов распределения Вейбулла ^{[9][10][11][12]}.

3 Макс. скорость ветра при фиксированном угле атаки, V_m , м/с

Это та расчетная скорость ветра, при которой АэроГЭС должна все еще выдерживать ветровые нагрузки при заранее заданном угле атаки своих парусов с заданным запасом прочности. Разумеется, реальная скорость ветра может значительно превышать эту скорость, но при этом предполагается, что нагрузки будут автоматически контролироваться за счет уменьшения угла атаки парусов или другими методами, как это изложено в статье ^[2].

4 Макс. скорость ветра при фиксированной площади, V_s , м/с

Это та расчетная скорость ветра, при которой АэроГЭС должна все еще выдерживать ветровые нагрузки при заранее заданной площади своих парусов с заданным запасом прочности. При этом предполагается, что ветровые нагрузки будут контролироваться за счет уменьшения площади парусов, либо спуска всей АэроГЭС.

5 Расчетная водность облаков, LWC, г/м3

Оценивается на основании метеоданных для нижнего слоя облачности, пригодного для АэроГЭС. Например, в ^[13] для разных типов облаков указан диапазон 0.25-0.45 г/м3. Если ориентироваться на слоистые облака, то в ^[14] дана оценка 0.28-0.30 г/м3. С другой стороны, там же указывается, что водность облака значительно растет вверх от базы облаков. Это можно оценить по графикам водности в разрезе облака в ^[15] (стр. 7-8), которые показывают, что максимальная водность достигается примерно на высоте 1 км от базы кучевых облаков и составляет ~ 1 г/м3. Так как АэроГЭС может выбирать оптимальную высоту приема влаги, то распределение водности также может быть использовано для оптимизации высоты.

6 Коэффициент покрытия облаков, CCF, %

Оценивается на основании метеоданных для нижнего слоя облачности. Примерно коррелирует с уровнем осадков. В целом по планете составляет 67% ^[16]. Для указанной территории может быть получен по спутниковым данным NASA ^[17]

7 Площадь сетей или парусов для приема влаги, S, м2

Расчетная величина поверхностей для приема влаги. Определяет производительность АэроГЭС. Выбирается с учетом проектной потребности в воде и электроэнергии.

8 Начальный угол атаки, α_{in} , град

Расчетный параметр, который определяет изначально зафиксированный угол наклона к горизонту сетей или парусов АэроГЭС. При достижении максимальной расчетной скорости ветра V_m этот угол будет автоматически уменьшаться, чтобы снизить ветровые нагрузки, по условиям обеспечения расчетного запаса прочности такелажа.

С одной стороны 'этот параметр определяет производительность по воде, соответствующую ветровой проекции парусов, с другой стороны определяет аэродинамическую подъемную силу, соответствующую данному ветровому напору и общему балансу сил, т. е. определяет аэродинамическое качество ^[18] и основной геометрический угол сноса при кайтовом исполнении АэроГЭС. Обычно для кайтов ~ 15 град.

9 Коэффициент лобового сопротивления C_x

C_x — это главным образом функция свойств материала (проницаемости сети или паруса) и угла атаки. Этот коэффициент позволяет вычислить горизонтальную силу, оказываемую на сеть или парус кайта ветровым напором. Упрощенно может использоваться постоянное значение для данного материала, если угол атаки зафиксирован. При малых углах атаки α можно использовать аппроксимацию $C_x \sim C_{x0} + K_x * \alpha^2$, где C_{x0} зависит от аспектного соотношения, а K_x вычисляется по заданному значению C_x для заданного угла атаки (см. ^{[2][19]}). Для предполагаемой конструкции ^[20] парусов АэроГЭС мы можем использовать значение C_{x0} от 0.0066 (для плоской удлиненной пластины) до 0.025 (CFD расчет).

Здесь надо сразу оговорить, что значения C_x , полученные в ^[3] при двумерном CFD моделировании, являются сугубо оценочными, так как не учитывают продольные (вертикальные) структуры сети или ткани паруса. В частности, это видно по тому, что C_x для двойной сети остается практически постоянным до весьма малых углов атаки, так как элементы сети почти не перекрывают друг друга в ветровой проекции.

10 Коэффициент подъемной силы C_y

C_y — это также функция свойств материала (проницаемости сети или паруса) и угла атаки. Этот коэффициент позволяет вычислить вертикальную подъемную силу, создаваемую ветровым напором. Упрощенно может использоваться постоянное значение для данного материала, если угол атаки зафиксирован. При малых углах атаки α можно использовать линейную аппроксимацию $C_y \sim K_y \cdot \alpha$, где K_y вычисляется по заданному значению C_y для заданного угла атаки.

Как было сказано выше, значения C_y , полученные в при двумерном CFD моделировании, являются сугубо оценочными, так как не учитывают продольные (вертикальные) структуры сети или ткани паруса. В частности, это видно по тому, что C_y для двойной сети не имеет асимптотической устойчивости до весьма малых углов атаки (т. е. практически должен приниматься нулевым). Таким образом необходимы натурные измерения и дальнейшие исследования для уточнения всех аэродинамических характеристик.

11 Эффективность сети или паруса по приему влаги, X , %

Это важнейший параметр, который показывает, какая доля атмосферной капельной влаги оседает на приемных поверхностях АэроГЭС в соответствующей ветровой проекции. Это также функция свойств материала (проницаемости сети или паруса) и угла атаки, так как эффективность рассчитывается не по полной площади сетки или паруса, а только по площади ветровой проекции. По данным систем сбора высокогорного тумана эта эффективность может достигать 50-70%, хотя интегральная эффективность обычно не превышает 25%. В моих лабораторных опытах я также получал величину, доходящую до 50%. Мои CFD расчеты для обычных систем сбора тумана с перпендикулярной потоку двойной сеткой также показывают величины $\sim 20\%$. Для парусов кайтов эти величины могут быть значительно выше при соответствующих углах атаки ~ 15 град, но при этом следует помнить, что ветровая проекция такого кайта составляет лишь около 26% его площади.

Как и сказано выше для аэродинамических коэффициентов C_x и C_y , значения X , полученные в при двумерном CFD моделировании, являются сугубо оценочными, так как не учитывают продольные (вертикальные) структуры сети или ткани паруса.

12 Удельный вес сети или паруса, CSW , кг/м²

13 Удельная цена материала сети или паруса, CSP , \$/м²

14 Коэффициент утяжеления сети или паруса, CWF

Задаёт утяжеление материала сети или паруса за счет накопления влаги, а также дополнительного такелажа и дренажа. Используется при подсчете веса сети или паруса, а также влияет на угол атаки при свободном подвесе сети. Обычно принимается ~ 2 и выше.

Вообще говоря, модель АэроГЭС может содержать несколько различных типов поверхностей как для приема влаги, так и просто для аэродинамической поддержки — тогда, соответственно, для каждого типа поверхностей пункты 7-14 должны быть повторены со своими значениями.

15 Длина шланга/каната (максимальный напор), L , м

Это важнейший параметр, который определяет максимальную высоту подъема АэроГЭС, а также существенно влияет на ее стоимость. Должен коррелировать с соответствующими метеоданными для нижнего слоя облачности в данном месте. Теоретически, для максимальной производительности по воде и энергии, должен обеспечивать подъем приемных поверхностей на высоту максимальной водности облака (на 0.5 - 1 км выше базы облаков) с учетом ветрового сноса для всех подходящих метеоусловий. Учитывая, что высота базы облаков может сильно варьироваться, являясь функцией температуры и точки росы (формула Ферреля ^[21]), выбор L является дополнительной оптимизационной задачей.

16 Гидравлические потери в шланге, HL , %

Важный оптимизационный параметр при использовании АэроГЭС для выработки электроэнергии. Позволяет найти баланс между КПД АэроГЭС и весом воды в шланге. Обычно принимается $\sim 10\%$. (К этому при вычислении КПД АэроГЭС добавляются еще потери в турбогенераторе, которые зависят от многих факторов, но обычно тоже составляют $\sim 10\%$.) Для производства только воды этот параметр принимается равным 100%, т. е. вода теряет всю свою потенциальную энергию в шланге, двигаясь с максимальной возможной скоростью для данного потока, обеспечивая минимальный вес воды в шланге.

17 Коэффициент гидравлических потерь в шланге, DFF

Если не использовать специализированные алгоритмы для гидравлических расчетов ^[22], а ограничиться формулой Дарси-Вейсбаха ^[23], то наилучшее совпадение для пластикового гладкого шланга получается при коэффициенте ~ 0.00762 (если не применять специальные гидрофобные покрытия).

18 Гидростатический запас прочности, HMS

Это тот запас прочности, который применяется при расчете толщины стенки шланга из Дайнимы, находящегося под гидростатическим давлением в нижней (наиболее напряженной) точке при максимально возможном гидравлическом напоре (который определяется длиной шланга в вертикальном положении). Рекомендованный расчетный запас прочности ~ 5 .

19 Аэродинамический запас прочности, AMS

Это тот запас прочности, который применяется при расчете толщины стенки шланга из Дайнимы (или суммарного сечения канатов и шланга), находящегося под продольным напряжением от суммарного действия веса, аэростатических и аэродинамических сил в верхней (наиболее напряженной) точке крепления этого шланга (или канатов и шланга). За основу принят коэффициент безопасности, используемый в авиастроении, который обычно равен 1.5 ^[24]. Для АэроГЭС рекомендуется принять эту величину ~ 2 .

20 Коэффициент избыточной аэростатической силы, BVF

Этот параметр задает избыточную аэростатическую подъемную силу по сравнению с аэростатическим балансом, при котором он равен 1. Избыточная аэростатическая сила может быть использована при оптимизации аэродинамической подъемной силы, чтобы обеспечить необходимую высоту приема влаги и оптимизировать напор и мощность АэроГЭС.

21 Коэффициент лобового сопротивления аэростата, Сах

Для идеального аэростата эта величина ~ 0.03 , для реального $\sim 0.06-0.08$. Обычно лобовое сопротивление аэростата пренебрежимо мало по сравнению с сетями или парусом и в первом приближении при инженерных расчетах может не учитываться.

22 Удельная цена Дайнимы, DSP, \$/кг

Один из важнейших параметров, так как стоимость шланга и канатов из Дайнимы обычно в несколько раз превышает стоимость остальных элементов АэроГЭС. Цена исходного сырья (полиэтилена), из которого делается Дайнима, обычно $\sim \$1/\text{кг}$, тогда как цена Дайнимы $\sim \$100/\text{кг}$ (минимальная $\sim \$50/\text{кг}$). Удешевление до $\sim \$10/\text{кг}$ могло бы значительно улучшить ТЭ показатели АэроГЭС, что представляется вполне достижимым при массовом производстве.

Общая идеология оптимизации АэроГЭС

Главная идея АэроГЭС — это получение воды и гидроэнергии в любом месте из капельных облаков, используя технологию сбора тумана. Соответственно, главная задача и проблема — как удержать поверхности, собирающие облачную влагу (сети или продуваемые ткани), на необходимой высоте при реальных ветровых нагрузках вплоть до ураганных ветров.

Рассматривались три главных направления решения этой задачи:

- 1) Свободно подвешенные сети, которые будут автоматически отклоняться при увеличении ветровой нагрузки, при соответствующем аэростатическом удержании.
- 2) Тканевые кайтовые поверхности, которые будут автоматически или контролируемо менять угол атаки для устойчивого аэродинамического удержания.
- 3) Контролируемое изменение активной аэродинамической площади сеток или парусов.

Очевидно, что при разных исходных данных, мы можем оптимизировать любую из этих схем, либо их комбинацию. Таким образом, комплексная модель должна описывать все возможные варианты и комбинации проектных решений, и оптимизационный расчет просто должен автоматически находить необходимые конструктивные решения и оптимизируемые параметры для указанного критерия оптимизации при заданных исходных данных.

Идеология такой оптимизации состоит в том, чтобы максимально увеличить положительные результаты и максимально уменьшить противодействующие негативные факторы. Главный позитивный результат работы АэроГЭС — это получение воды и, связанной с ней, гидроэнергии. Главный негативный — стоимость при данных условиях эксплуатации.

Таким образом, оптимальная АэроГЭС должна обеспечивать максимальный поток воды при минимальной стоимости. Расчеты показывают, что какого бы типа АэроГЭС мы не рассматривали, основные затраты — это стоимость шланга и канатов из Дайнимы при текущей рыночной стоимости на этот материал. В свою очередь эти затраты определяются теми горизонтальными ветровыми нагрузками, которые воздействуют на сети и ткани АэроГЭС, так как вертикальные аэродинамические или аэростатические силы должны коррелировать с ними для поддержания необходимой высоты сбора влаги из облаков.

Итак, все сводится к следующему базовому соотношению:

$$\text{Критерий оптимальности} \sim (LWC * CCF * Va * S * \sin(a) * X) / (Cx * S * \rho * Va^2 / 2) \sim X * \sin(a) / Cx / Va$$

что показывает очевидные выводы, что поверхности АэроГЭС должны иметь максимальную

эффективность сбора влаги в ветровой проекции при минимальном лобовом сопротивлении, а также то, что относительная выгодность АэроГЭС растет при снижении средней скорости ветра (что, например, отвечает условиям экваториальной зоны).

Рассмотрим, например, как меняется указанный критерий оптимальности для материалов, просчитанных при CFD моделировании (см. приложение в ^[3]).

Va, m/s	a, o	Cx	X, %	X*sin(a)/Cx/Va
CFD calculations for a double-layered Raschel mesh				
5.000	15.0	0.364	46.200	6.570
10.000	15.0	0.320	84.600	6.843
15.000	15.0	0.424	76.500	3.113
20.000	15.0	0.346	83.800	3.134
5.000	30.0	0.671	22.700	3.383
10.000	30.0	0.600	25.300	2.108
15.000	30.0	0.511	33.600	2.192
20.000	30.0	0.531	36.400	1.714
5.000	45.0	0.731	29.000	5.610
10.000	45.0	0.698	39.900	4.042
15.000	45.0	0.551	47.100	4.030
20.000	45.0	0.609	47.400	2.752
5.000	60.0	0.767	11.200	2.529
10.000	60.0	0.687	15.400	1.941
15.000	60.0	0.687	19.000	1.597
20.000	60.0	0.566	21.200	1.622
5.000	75.0	0.715	7.000	1.891
10.000	75.0	0.694	9.900	1.378
15.000	75.0	0.665	9.900	0.959
20.000	75.0	0.593	10.100	0.823
5.000	90.0	0.784	17.300	4.413
10.000	90.0	0.745	26.000	3.490
15.000	90.0	0.682	28.900	2.825
20.000	90.0	0.540	28.400	2.630
CFD calculations for a single-layered Raschel mesh				
8.000	5.0	0.136	18.100	1.450
8.000	10.0	0.160	46.000	6.240
8.000	15.0	0.186	58.900	10.245
8.000	30.0	0.290	18.700	4.030
8.000	45.0	0.317	13.600	3.792
8.000	60.0	0.328	10.200	3.366
8.000	75.0	0.371	9.900	3.222
8.000	90.0	0.351	8.900	3.170
CFD calculations of permeable kite fabric (sail)				
8.000	1.0	0.030	46.000	3.345
8.000	2.0	0.047	48.100	4.465
8.000	3.0	0.059	44.500	4.934
8.000	4.0	0.075	44.800	5.208
8.000	5.0	0.093	43.700	5.119
8.000	10.0	0.183	39.200	4.650
8.000	15.0	0.315	37.800	3.882

В реальности на оптимизацию АэроГЭС влияет очень много различных противоречивых факторов, поэтому данный критерий только показывает главную тенденцию, которую необходимо учитывать при проектировании. Более сложные технико-экономические расчеты, которые будут рассмотрены в следующем разделе, показывают, что задача оптимизации АэроГЭС не может быть сведена к одной простой формуле.

Алгоритм расчета комплексной модели АэроГЭС

Данный алгоритм построен на основе предыдущих численных расчетов отдельных систем АэроГЭС и предполагает, что для задачи оптимизации можно ограничиться инженерными аппроксимациями сделанных ранее точных расчетов. Это позволяет провести целевые технико-экономические обоснования в привычной экономистам форме электронных таблиц (где инженерные расчеты вынесены в макросы), либо оптимизацию для Java/C [класса](#).

1 Расчет производительности по воде

Простейший вариант расчета предполагает, что сетка или парус, установленные под указанным начальным углом атаки $a = Avm$, в основном и работают в данной геометрии, т. е. ветровая проекция вычисляется просто как $S * \sin(a)$, а соответствующий поток воды вычисляется как $LWC * CCF * Va * S * \sin(a) * X$. В действительности это дает завышенный поток воды, так как не учитывается уменьшение ветровой проекции при изменении угла атаки или площади для адаптации к ветровому воздействию со скоростями больше Vm или Vs .

Будем предполагать, что распределение вероятности ветра по скоростям подчиняется распределению Вейбулла со средним значением параметра $k = 2$ (распределение Рэля):

$f(v) = 2 * v / c^2 * \exp[-(v/c)^2]$, где параметр $c = 1.13 * Va$ определяется по средней скорости.

Таким образом, чтобы корректно решить эту задачу, мы должны сначала решить задачу нахождения угла атаки a для каждой заданной скорости v для данного способа крепления сети или паруса, потом найти соответствующую эффективность X и поток воды, а потом просуммировать (или проинтегрировать) эти значения по указанной плотности вероятности.

Для этого мы должны сначала аппроксимировать (хотя бы приблизительно) зависимости Cx , Cy , X для наших возможных сетей и парусов на базе проведенных CFD расчетов. В первом приближении ограничимся кусочно-линейными зависимостями только от угла атаки.

(1) Rmesh1: CFD calculations for a single-layered Raschel mesh

$$Cx = 0.00626 * a + 0.0991 \text{ [} < 30^\circ, R^2 = 0.993 \text{]} \quad Cx = 0.00117 * a + 0.261 \text{ [} > 30^\circ, R^2 = 0.797 \text{]}$$

$$Cy = 0$$

$$X = -0.406 * a + 39.8 \text{ [} R^2 = 0.464 \text{]}$$

(2) Rmesh2: CFD calculations for a double-layered Raschel mesh

$$Cx = 0.0143 * a + 0.149 \text{ [} < 30^\circ, R^2 = 0.810 \text{]} \quad Cx = 0.00159 * a + 0.556 \text{ [} > 30^\circ, R^2 = 0.175 \text{]}$$

$$Cy = 0$$

$$X = -0.615 * a + 64.7 \text{ [} R^2 = 0.511 \text{]}$$

(3) Kmesh: CFD calculations of permeable kite fabric (sail)

$$Cx = 0.0201 * a + 0.0 \text{ [} < 30^\circ, R^2 = 0.988 \text{]}$$

$$Cy = 0.0350 * a + 0.0207 \text{ [} < 30^\circ, R^2 = 0.993 \text{]}$$

$$X = -0.695 * a + 47.4 \text{ [} R^2 = 0.903 \text{]}$$

Первый вариант расчета предполагает, что сеть используется в режиме свободного подвеса (что задается нулевой скоростью V_m). Тогда угол отклонения сети при данной скорости ветра определяется через тангенс угла атаки по соотношению веса сети (с учетом коэффициента утяжеления сети CWF) и силы лобового сопротивления:

$$TAN(a) = S * CSW * CWF * g / (Cx * S * \rho * v^2 / 2) = CSW * CWF * g / (Cx * \rho * v^2 / 2)$$

Второй вариант расчета предполагает, что начальный угол атаки постоянен и равен заданному до скорости V_m , а затем угол атаки a вычисляется из условия, что равнодействующая аэродинамических сил поддерживается постоянной по модулю при дальнейшем увеличении скорости ветра v :

$$c * S * \rho * v^2 / 2 = C * S * \rho * V_m^2 / 2 \rightarrow c * v^2 = C * V_m^2, \text{ где } C = \sqrt{(Cx^2 + Cy^2)}$$

Третий вариант расчета (который может также сочетаться с первым или вторым вариантом расчета) предполагает, что заданная площадь S постоянна только до скорости V_s , а затем аэродинамическая площадь s активных поверхностей уменьшается так, что равнодействующая аэродинамических сил поддерживается постоянной по модулю при дальнейшем увеличении скорости ветра v :

$$C * s * \rho * v^2 / 2 = C * S * \rho * V_s^2 / 2 \rightarrow s * v^2 = S * V_s^2$$

При любом варианте по найденным углам атаки при данной скорости ветра вычисляется эффективность X и поток воды, который потом интегрируется по распределению Рэлея.

Параллельно вычисляется и максимальные аэродинамические нагрузки при максимальной расчетной скорости ветра V_f , которые будут затем использованы для расчета баланса сил. При этом в общем случае C_x не равен нулю даже при нулевом угле атаки, т. е. может быть такая скорость ветра, которая разрушит конструкцию АэроГЭС, несмотря на предполагаемые меры автоматического контроля. В частности, при расчете ветроустановок такую экстремальную скорость обычно принимают равной 5-ти кратной величине средней скорости V_a , что примерно соответствует вероятности один раз за 50 лет наблюдений.

Расчеты показывают, что при таких ураганных скоростях ветра (~ 50 м/с) возможно только использование третьего варианта — контролируемого уменьшения активной площади аэродинамической поверхности сети или паруса (вплоть до нуля). Фактически это означает, что сети или паруса должны либо сворачиваться (подобно системам автоматической постановки и уборки парусов современных яхт), либо отдельные полотнища должны последовательно спускаться ближе к земле, либо вся АэроГЭС должна спускаться к земле при критических ветровых нагрузках, превышающих заданный уровень.

Формально будем считать, что третий вариант расчета будет использован, если $V_s < 0$, иначе будем считать, что $V_s > 0$ просто задает максимальную скорость ветра, при которой производят спуск АэроГЭС целиком для предотвращения ее разрушения без регулирования.

По результатам расчета производительности по воде при заданной величине гидравлических потерь можно из формулы Дарси-Вейсбаха посчитать требуемый внутренний диаметр шланга и скорость воды в нем:

$$HL = (DFF/D) * V_w^2 / 2g = (DFF/D) * [Q / (\pi * D^2 / 4)]^2 / 2g$$

а затем рассчитать толщину шланга dh , необходимую для данного давления воды внизу.

2 Расчет баланса сил

Расчет баланса сил строится для самой напряженной точки — места крепления шланга и канатов к полетной части АэроГЭС. В этой точке одновременно действуют аэростатические подъемные силы от аэростата $T0y$, аэродинамические силы на аэростат Tax/Tay , аэродинамические силы на поддерживающий кайт или планер Tkx/Tky , аэродинамические силы на водоприемные сети или паруса Tcx/Tcy , и веса всех элементов, включая вес оболочки аэростата Ws , вес кайта/планера Wk , вес сети или паруса Wc , вес шланга/канатов Wh и воды в шланге Ww . При отсутствии ветра аэростатическую подъемную силу с учетом коэффициента избыточности BVF можно записать как:

$$T0y = (Ws + Wk + Wc + Ww + Wh) * BVF * g$$

Тогда общая сила со стороны полетной части Tm будет геометрически складываться из:

$$Tm^2 = (T0y + Tay + Tky + Tcy - g*Wk - g*Wc - g*Ws)^2 + (Tax + Tkx + Tcx)^2$$

Предварительные расчеты показывают, что обычно аэродинамические силы Tax/Tay , действующие на аэростат, на три порядка меньше остальных сил, и ими в инженерном приближении можно пренебречь. Аналогично можно пренебречь и весом оболочки аэростата Ws , так как для достаточно больших АэроГЭС это дает ошибку лишь на уровне 1%.

Учитывая, что толщина стенки шланга da диаметра D (или, вообще говоря, суммарное сечение стенки шланга и канатов) с плотностью ρ и удельной прочностью YS прямо определяется касательной силой Tm в наиболее напряженной точке, получаем, что вес шланга/канатов Wh можно прямо выразить через эту силу при заданном аэродинамическом запасе прочности:

$$da = AMS * Tm / (\pi * D * YS) \rightarrow Wh = \pi * D * da * L * \rho = AMS * \rho * L * Tm / YS$$

Собрав вместе эти три уравнения, получаем стандартное квадратное уравнение для $T0y$, решая которое и используя максимальное значение корня (так как наша задача поднять АэроГЭС как можно выше), получаем значение Tm максимальной нагрузки при заданной максимальной расчетной скорости ветра Vf , полученной при расчете производительности.

Тут, собственно, и находится главное противоречие: максимизация производительности АэроГЭС предполагает работу в районе средней скорости ветра Va , а расчет ее прочностных элементов, который и определяет ее стоимость, приходится делать для скорости ветра Vf , которая в 5 раз больше (т. е. создает нагрузки в 25 раз больше эксплуатационных) и при которой реально АэроГЭС работает только раз в 50 лет.

По результатам этого первичного расчета проводится окончательный расчет аэростатики, суммируются все весовые нагрузки, вычисляется объем аэростата и условный вес его оболочки, а также его аэродинамические нагрузки, после чего вычисляется окончательное значение максимальной силы T и определяется уровень ошибки первичного расчета Err .

Наконец, по наклону вектора максимальной силы T вычисляется условный напор и мощность АэроГЭС. На самом деле и напор и мощность меняются при различной скорости ветра и также должны интегрироваться по распределению Вейбулла. Кроме того, как было показано в [2], шланг в области малых скоростей довольно сильно отклоняется от линии вектора силы. Однако, для расчета в области значений максимальной силы T эти отклонения не превышают уровня инженерной точности 10% и в данной модели не учитываются.

3 Расчет экономических показателей

При расчете экономических показателей вычисляются и суммируются стоимости основных элементов АэроГЭС:

1. сетей или парусов облачного коллектора, $S * CSP$
2. парусов поддерживающего кайта или планера, $Sk * KSP$
3. шланга и канатов из Дайнимы, $Wh * DSP$
4. оболочки аэростата по условному радиусу шара того же объема, $4 * \pi * BR^2 * SSP$

Суммарная стоимость материалов умножается на коэффициент удорожания MWF , связанный с затратами на сам процесс производства АэроГЭС. Обычно, **при массовом производстве** (в среднем по себестоимости продукции промышленности) этот коэффициент примерно равен двум (это можно приблизительно оценить по анализу себестоимости, например, компьютеров или автомобилей). Производство АэроГЭС по специфике работ ближе всего к швейной промышленности. По экспертным оценкам экономистов и технологов, работающих в области ценообразования в швейной промышленности, в себестоимости изделий 2/3 или больше составляет стоимость материала, т. е. этот коэффициент MWF в швейном производстве ~ 1.5 . Таким образом, если мы рассматриваем именно массовое производство устройств на основе технологии АэроГЭС (например, для получения воды в труднодоступных районах), то оценка $MWF=2$ является вполне оправданной и даже весьма консервативной, учитывая что самый дорогой элемент АэроГЭС (шланг из Дайнимы) практически не нуждается в дополнительных трудозатратах.

В случае использования АэроГЭС для производства электроэнергии к этим затратам добавляется стоимость турбогенератора, цена которого условно оценивается по удвоенной цене электродвигателя соответствующей мощности в кВт — это задается следующей аппроксимацией на основе анализа ценового ряда электродвигателей: $\sim 225.16731 * P^{0.6924}$

Наконец, в первичные затраты включается также водород для наполнения аэростата $BV * \rho * HSP$, где $\rho = 0.1 \text{ кг/м}^3$ — плотность водорода.

Окончательно вычисляется полная стоимость АэроГЭС, удельная стоимость за кВт (если есть выработка электроэнергии), а также условная себестоимость воды (т. е. отношение полной стоимости к полной выработке воды за все время жизни установки, $\$/\text{м}^3$) и условная себестоимость электроэнергии (т. е. отношение полной стоимости к полной выработке ЭЭ за все время жизни установки, $\$/\text{кВтч}$). Условность этих показателей возникает оттого, что АэроГЭС производит сразу два (или даже три продукта, если включать водород) и нет возможности разнести затраты по отдельности на воду и ЭЭ. Тем не менее можно учесть среднемировую стоимость пресной воды и ЭЭ, чтобы посчитать общую выручку по воде, ЭЭ и суммарную выручку за предполагаемое время жизни установки.

Это позволяет вывести окончательные экономические критерии для инвестирования и оптимизации АэроГЭС. Важнейшим таким критерием является ROI — возврат инвестиций, т. е. какой % прибыли на каждый вложенный доллар ожидается получить от АэроГЭС за время жизни установки. Еще большую информативность дает срок окупаемости, т. е. время, за которое инвестор полностью вернет свои деньги и сможет получать чистую прибыль. Этот параметр не зависит от предполагаемого времени жизни и других аддитивных параметров, поэтому это наилучший кандидат на целевой критерий оптимизации — т. е. та конструкция АэроГЭС, которая будет обеспечивать минимальный срок окупаемости (максимальную скорость оборота капитала) может рассматриваться как наиболее выгодная (в рамках заданных технических ограничений, конечно). Также по этой величине легко сравнивать АэроГЭС с другими альтернативами для инвестиций в области энергетики и водоснабжения.

Оптимизация комплексной модели АэроГЭС

Инженерная математическая модель АэроГЭС, реализованная программно в виде Java/C [класса](#), включает большое число заданных параметров, которые можно подстраивать, например, под соответствующие метеоданные, либо под требуемую производительность, либо под соответствующие оценки свойств материалов. Большинство таких параметров имеет заранее заданные значения, соответствующие средним оценкам, но их можно корректировать по своему усмотрению.

Так как заранее было невозможно предсказать конструктивные предпочтения и их влияние на целевую функцию, то девять следующих параметров было выделено для комплексной оптимизации:

```
int CCT = 3; // * Cloud collector type: Rmesh [1/2] or Kmesh[3], CCT [1,2,3]
double Vm = 10; // * Max possible wind speed with fixed attack angle, Vm, m/s [0...50]
double Vs = 20; // * Max possible wind speed with fixed collection area, Vs, m/s [-50...50]
double Avm = 15; // * Initial fixed attack Angle, Avm, degrees [0...90]
double CWF = 2; // * Cloud collector weight factor, CWF [1...10]
double L = 2000; // * Length of hose (max altitude and head), L, m [1500...3000]
double HL = 100; // * Head loss in hose, HL, % [0...100]
double BVF = 1; // * Balloon Volume factor, BVF [1...10]
double Sk = 0; // * Area of supporting kite, Sk, m2 [0...S]
```

Простейший метод оптимизации (метод Монте-Карло) с постепенным сужением диапазона параметров позволяет довольно быстро проверить все возможные конструктивные решения и определить наиболее перспективные наборы параметров, например, с помощью следующего кода на Java:

```
double Kmin = 100;
for(int i=0; i<1000000000; i++)
{
    airhes.CCT = getRndInt(1,3);
    airhes.Vm = getRndInt(-50,50); if(airhes.Vm < 0) airhes.Vm = 0;
    if(airhes.Vm == 0 && airhes.CCT == 3) continue;
    airhes.Vs = getRndInt(-50,50); if(airhes.Vs == 0) airhes.Vs = airhes.Vm;
    airhes.Avm = airhes.CCT==3?getRndInt(0,30):getRndInt(0,90);
    if(airhes.Vm == 0) airhes.Avm = 90;
    airhes.CWF = getRndInt(20,100)/10.;
    airhes.L = getRndInt(1500,3500);
    airhes.HL = getRndInt(0,110); if(airhes.HL > 100) airhes.HL = 100;
    airhes.BVF = getRndInt(10,100)/10.;
    airhes.Sk = getRndInt(0,airhes.S);

    airhes.AirHES_calc();
    if(airhes.H < airhes.Hmin) continue;
    if(airhes.PB < Kmin) Kmin = airhes.PB;
}
}
```

В этом коде случайный набор параметров из указанных диапазонов сначала проверяется на ограничения модели, потом производится расчет для экземпляра класса, дополнительно проверяется, что высота подъема АэроГЭС превышает заданный порог *Hmin*, и при достижении очередного минимума целевой функции (срока окупаемости) данные параметры запоминаются. Несколько итераций со сжатием искомого диапазона параметров позволяют быстро найти необходимые конструктивные решения и величины оптимальных параметров.

В таблице представлены примеры таких оптимизационных вычислений для $S=1 \text{ km}^2$, где:

1. полная оптимизация, которая дает минимальный срок окупаемости и использует оба механизма регулировки (как по углу атаки, так и по площади сетки)
2. использует свободно подвешенные сети и регулирует площадь сетки
3. использует свободно подвешенные сети и спуск АэроГЭС целиком
4. использует регулировку по углу атаки и спуск АэроГЭС целиком
5. использует регулировку по углу атаки, не предусматривая спуск до 50 м/с
6. использует свободно подвешенные сети, не предусматривая спуск до 50 м/с

7. использует фиксированный угол атаки без регулировки и спуск при 12 м/с
8. использует фиксированный угол атаки без регулировки и спуск при 15 м/с
9. использует фиксированный угол атаки без регулировки и спуск при 20 м/с

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Cloud collector (Rmesh[1/2] or Kmesh[3]) type, CCT	1.00	1.00	1.00	1.00	3.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Possible Lifetime, LT, yrs	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00
Average wind speed (base mode for calculation), Va, m/s	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00
Max possible wind speed with fixed attack angle, Vm, m/s	25.00	0.00	0.00	9.00	9.00	0.00	12.00	15.00	20.00
Max possible wind speed with fixed collection area, Vs, m/s	-6.00	-8.00	11.00	14.00	50.00	50.00	12.00	15.00	20.00
LWC, g/m3	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30
Cloud capacity factor, % [CCF]	67.00	67.00	67.00	67.00	67.00	67.00	67.00	67.00	67.00
Collection area, m2 [S]	1000000.00	1000000.00	1000000.00	1000000.00	1000000.00	1000000.00	1000000.00	1000000.00	1000000.00
Attack angle, deg [a]	40.00	90.00	90.00	38.00	26.00	90.00	28.00	42.00	38.00
-> Cx = f(a,v) for this Cloud collector by CFD	0.31	0.37	0.37	0.31	0.52	0.37	0.27	0.31	0.31
-> Cy = f(a,v) for this Cloud collector by CFD	0.00	0.00	0.00	0.00	0.93	0.00	0.00	0.00	0.00
-> Efficiency X = f(a,v) for this Cloud collector by CFD, %	23.56	3.26	3.26	24.37	29.33	3.26	28.43	22.75	24.37
-> Cloud collector specific weight, CSW, kg/m2	0.05	0.05	0.05	0.05	0.04	0.05	0.05	0.05	0.05
-> Cloud collector specific price, CSP, \$/m2	0.25	0.25	0.25	0.25	1.00	0.25	0.25	0.25	0.25
Cloud collector weight factor [CWF]	2.00	9.50	6.10	4.80	9.10	9.90	8.60	2.90	4.60
Length of hose (max altitude and head), L, m	2312.00	2272.00	2350.00	2009.00	1655.00	2329.00	2291.00	2249.00	2273.00
Head loss in hose, HL, %	1.00	3.00	2.00	7.00	7.00	2.00	1.00	2.00	1.00
Hydrostatic margin of safety [HMS]	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00
Aerodynamic margin of safety [AMS]	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00
Balloon Volume factor [BVF]	1.90	1.30	2.80	4.90	1.20	8.60	3.20	8.00	7.80
Balloon Cax	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03
Rope/hose specific price, DSP, \$/kg	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
Area of supporting kite, m2 [Sk]	1281.00	8425.00	21737.00	140.00	12992.00	87203.00	36579.00	44920.00	98091.00
Attack angle of supporting kite, deg [ak]	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00
-> Ckx = f(a,v) for supporting kite by CFD	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
-> Cky = f(a,v) for supporting kite by CFD	0.38	0.38	0.38	0.38	0.38	0.38	0.38	0.38	0.38
Kite fabric specific weight, KSW, kg/m2	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04
Kite fabric specific price, KSP, \$/m2	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Flow by real wind speed, m3/h	293.21	438.56	363.87	517.95	650.05	722.16	498.35	785.40	993.54
Diameter with this % head loss, mm	211.03	199.00	200.28	179.54	196.62	263.46	260.91	272.46	343.83
Flow velocity, m/s	2.33	3.92	3.21	5.69	5.95	3.68	2.59	3.74	2.97
Water weight in hose, kg	80865.81	70666.66	74036.34	50863.53	50251.27	126968.39	122485.59	131123.86	211047.74
The calculated wall thickness at HMS, mm	4.98	4.62	4.80	3.68	3.32	6.26	6.10	6.26	7.98
Weight of Cloud collector with drops at CWF, Wc, kg	100000.00	475000.00	305000.00	240000.00	364000.00	495000.00	430000.00	145000.00	230000.00
Weight of supporting kite, Wk, kg	51.24	337.00	869.48	5.60	519.68	3488.12	1463.16	1796.80	3923.64
Tmax, N	5039254.91	10168175.31	14599162.75	18261672.71	82506910.38	187278913.57	25267568.82	45367575.55	79837306.94
The calculated wall thickness at AMS, mm	6.34	13.56	19.35	26.99	111.37	188.65	25.70	44.19	61.62
Hose weight (Dyneema), kg	9422.49	18674.19	27732.33	29655.89	110433.30	352752.50	46816.64	82517.63	146763.16
Load weight, kg	190339.54	564677.85	407638.14	320525.02	525204.25	978209.01	600765.40	360438.29	591734.54
Balloon Volume at BVF, m3	401827.93	815645.78	1268207.56	1745080.67	700272.33	9347330.52	2136054.74	3203895.93	5128366.01
The calculated radius of balloon (by aerostatic balance), m	45.78	57.96	67.15	74.69	55.09	130.68	79.89	91.45	106.98
Balloon shell weight (155 g/m2), kg	4081.72	6543.61	8782.33	10864.92	5911.00	33261.45	12432.48	16290.53	22291.31
T, N	5422489.52	10895973.20	15331791.43	19467699.39	83196940.70	194145848.68	26557750.13	47367236.45	83089064.18
% of error for aerostatic balance	7.07	6.68	4.78	6.20	0.83	3.54	4.86	4.22	3.91
Head, m	1501.29	1509.91	1508.34	1511.67	1571.11	1509.83	1516.20	1505.36	1508.51
Power with efficiency 90% + % of head loss in hose, kW	1067.69	1573.68	1317.76	1784.01	2327.02	2617.89	1832.70	2838.72	3635.25
Total Cost, \$	2774121.84	4949629.59	7096563.80	7764734.14	24739863.13	77238482.62	11526685.10	19381307.30	33541623.90
Specific Cost, \$/kW	2598.24	3145.25	5385.33	4352.41	10631.55	29504.04	6289.47	6827.49	9226.78
Prime cost (only for water), \$/m3	0.11	0.13	0.22	0.17	0.43	1.22	0.26	0.28	0.39
Prime cost (only for electricity), \$/kWh	0.03	0.04	0.06	0.05	0.12	0.34	0.07	0.08	0.11
Water (income for LT, tariff \$1/m3), \$K	25685.30	38417.72	31874.95	45372.78	56944.07	63260.97	43655.41	68800.81	87034.17
Electricity (income for LT, tariff \$0.1/kWh), \$K	9353.00	13785.45	11543.56	15627.91	20384.73	22932.76	16054.42	24867.16	31844.77
Total income for LT, \$K	35038.30	52203.17	43418.51	61000.69	77328.79	86193.73	59709.83	93667.96	118878.94
ROI for LT, %	1263.04	1054.69	611.82	785.61	312.57	111.59	518.01	483.29	354.42
Payback period, yrs	0.79	0.95	1.63	1.27	3.20	8.96	1.93	2.07	2.82

Легко заметить, что оптимизация пытается максимально уменьшить вес и стоимость шланга или канатов из Дайнимы как поддержанием минимально возможной высоты, ограниченной 1500 м, так и максимальным снижением ветровых нагрузок в ущерб производительности АэроГЭС. Поэтому снижение цены на Дайниму является решающим фактором для прогресса АэроГЭС (достаточно сказать, что при цене \$50/кг срок окупаемости уменьшается почти до полугода, а при \$10/кг — до трех месяцев).

Последние три примера рассмотрены как возможный компромисс, когда мы заведомо идем на ухудшение ТЭ показателей для увеличения производительности установки и ее технологической простоты. Такой подход вполне оправдан для создания пилотных установок, например, для получения пресной воды в проекте Water Xprize ^[25], где предлагается создать установку, дающую 2 м3 воды в сутки с себестоимостью воды ниже \$0.02/литр = \$20/м3. Из данных таблицы видно, что АэроГЭС перекрывает эти показатели на два порядка, т. е. в данном случае есть смысл оптимизировать АэроГЭС не только по срокам окупаемости, а и по производительности. Для поиска решения добавим площадь облачного коллектора [100-300 м2] в число оптимизируемых параметров и установим минимум производительности с двукратным запасом, на уровне 4 м3 в сутки. Также, для практически портативной установки исключим методы активного управления площадью парусов, которые трудно реализовать на первом этапе проекта, и будем минимизировать стоимость установки.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Cloud collector (Rmesh[1/2] or Kmesh[3]) type, CCT	2.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	2.00	3.00
Possible Lifetime, LT, yrs	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00
Average wind speed (base mode for calculation), V, m/s	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00
Max possible wind speed with fixed attack angle, Vm, m/s	17.00	15.00	20.00	25.00	0.00	0.00	0.00	0.00	12.00	9.00
Max possible wind speed with fixed collection area, Vs, m/s	-8.00	15.00	20.00	25.00	15.00	20.00	25.00	50.00	25.00	50.00
LWC, g/m3	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30
Cloud capacity factor, % [CCF]	67.00	67.00	67.00	67.00	67.00	67.00	67.00	67.00	67.00	67.00
Collection area, m2 [S]	206.00	219.00	166.00	156.00	300.00	258.00	241.00	236.00	117.00	257.00
Attack angle, deg [a]	52.00	36.00	44.00	39.00	90.00	90.00	90.00	90.00	50.00	28.00
-> Cx = f(a,v) for this Cloud collector by CFD	0.64	0.30	0.31	0.31	0.37	0.37	0.37	0.37	0.64	0.56
-> Cy = f(a,v) for this Cloud collector by CFD	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00
-> Efficiency X = f(a,v) for this Cloud collector by CFD, %	32.72	25.18	21.94	23.97	3.26	3.26	3.26	3.26	33.95	27.94
-> Cloud collector specific weight, CCSW, kg/m2	0.10	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.10	0.04
-> Cloud collector specific price, CCSP, \$/m2	0.50	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.50	1.00
Cloud collector weight factor [CCWF]	2.30	2.70	2.80	3.00	8.10	8.50	9.10	9.50	3.10	4.90
Length of hose (max altitude and head), L, m	2464.00	2549.00	2412.00	2400.00	2254.00	2184.00	2179.00	2479.00	2321.00	1681.00
Head loss in hose, HL, %	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
Hydrostatic margin of safety [HMS]	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00
Aerodynamic margin of safety [AMS]	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00
Balloon Volume factor [BVF]	1.00	1.00	1.00	1.10	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.10
Balloon Cax	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03
Rope/hose specific price, DSP, \$/kg	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
Area of supporting kite, m2 [Sk]	9.00	131.00	117.00	109.00	132.00	105.00	92.00	59.00	62.00	0.00
Attack angle of supporting kite, deg [ak]	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00
-> Ckx = f(a,v) for supporting kite by CFD	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
-> Cky = f(a,v) for supporting kite by CFD	0.38	0.38	0.38	0.38	0.38	0.38	0.38	0.38	0.38	0.38
Kite fabric specific weight, KSW, kg/m2	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04
Kite fabric specific price, KSP, \$/m2	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Flow by real wind speed, m3/h	0.17	0.17	0.17	0.17	0.16	0.17	0.16	0.16	0.17	0.17
Fm	15.65	34.10	62.50	95.82	19.33	29.80	42.65	138.90	46.56	46.95
Fmx	15.65	34.10	62.50	95.82	19.33	29.80	42.65	138.90	46.56	11.82
Fmy	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	45.44
Vf	50.00	15.00	20.00	25.00	15.00	20.00	25.00	50.00	25.00	49.00
Af	0.00	35.99	44.00	38.99	11.61	7.97	5.97	1.92	0.00	0.49
Wind projection of Collection area, m2 [S*sin(a)]	162.33	128.72	115.31	98.17	300.00	258.00	241.00	236.00	89.63	120.65
Flow by average V, m3/h [LWC*V*S_wind*X*CCF]	0.38	0.23	0.18	0.17	0.07	0.06	0.06	0.06	0.22	0.24
Calculated Water collection rate (in S_wind), L/m2/day	56.82	43.74	38.09	41.62	5.66	5.66	5.66	5.66	58.96	48.52
Diameter with this % head loss, mm	4.24	4.23	4.24	4.24	4.20	4.22	4.21	4.21	4.22	4.27
Flow velocity, m/s	3.30	3.30	3.30	3.30	3.29	3.30	3.29	3.29	3.29	3.31
Water weight in hose, kg	34.80	35.90	34.01	33.86	31.28	30.57	30.27	34.46	32.41	24.03
The calculated wall thickness at HMS, mm	0.11	0.11	0.10	0.10	0.10	0.09	0.09	0.11	0.10	0.07
Weight of Cloud collector with drops at CWF, Wc, kg	47.38	29.57	23.24	23.40	121.50	109.65	109.66	112.10	36.27	50.37
Weight of supporting kite, Wk, kg	0.36	5.24	4.68	4.36	5.28	4.20	3.68	2.36	2.48	0.00
Tkx, N	506.25	663.19	1053.00	1532.81	668.25	945.00	1293.75	3318.75	871.88	0.00
Tky, N	4241.25	5556.04	8821.80	12841.56	5598.45	7917.00	10838.75	27803.75	7304.38	0.00
Tex, N	3223.42	7467.83	10374.34	14947.64	5797.53	7688.00	10278.06	32780.16	5447.81	3038.70
Tcy, N	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	11677.80
Tmax, N	5999.56	10172.81	14821.11	21419.49	8863.97	12062.94	16255.21	46336.97	10044.04	12543.53
The calculated wall thickness at AMS, mm	0.38	0.64	0.93	1.34	0.56	0.76	1.03	2.92	0.63	0.78
Hose weight (Dyneema), kg	11.96	20.97	28.91	41.57	16.16	21.31	28.65	92.90	18.85	17.05
Load weight, kg	94.50	91.68	90.84	103.19	174.22	165.73	172.25	241.82	90.02	91.45
Balloon Volume at BVF, m3	105.00	101.87	100.93	126.13	193.58	184.14	191.39	268.69	100.02	111.77
The calculated radius of balloon (by aerostatic balance), m	2.93	2.90	2.89	3.11	3.59	3.53	3.58	4.00	2.88	2.99
Balloon shell weight (155 g/m2), kg	16.68	16.35	16.25	18.85	25.08	24.26	24.89	31.21	16.15	17.39
Tax, N	834.60	73.61	130.07	235.78	112.94	194.20	311.35	1561.45	202.00	835.68
T0y, N	1028.96	998.29	989.16	1236.03	1897.09	1804.60	1875.64	2633.13	980.18	1095.38
T, N	6507.81	10195.83	14883.63	21562.90	8908.81	12163.25	16439.39	47537.80	10126.25	12713.80
% of error for aerostatic balance	7.81	0.23	0.42	0.67	0.50	0.82	1.12	2.53	0.81	1.34
Head, m	1756.38	1513.28	1519.79	1516.03	1519.89	1502.55	1505.71	1512.78	1775.55	1601.05
Cost of supporting kite, \$	9.00	131.00	117.00	109.00	132.00	105.00	92.00	59.00	62.00	0.00
Cost of Cloud collector, \$	103.00	54.75	41.50	39.00	75.00	64.50	60.25	59.00	58.50	257.00
Cost of hose, \$	1195.56	2097.12	2891.14	4157.50	1615.82	2130.68	2864.58	9290.00	1885.37	1705.29
Cost of shell (\$3/m2), \$	322.89	316.44	314.51	364.87	485.49	469.58	481.82	604.09	312.60	336.64
Sum Cost of material, \$	1630.45	2599.31	3364.15	4670.37	2308.31	2769.76	3498.66	10012.10	2318.47	2298.93
Cost + Work (by doubling), \$	3260.90	5198.61	6728.30	9340.74	4616.63	5539.51	6997.32	20024.19	4636.93	4597.87
Cost of Hydrogen (\$5/kg ~ \$0.5/m3), \$	52.50	50.93	50.47	63.06	96.79	92.07	95.70	134.34	50.01	55.89
Total Cost, \$	3313.40	5249.55	6778.77	9403.80	4713.42	5631.58	7093.01	20158.54	4686.94	4653.75
Prime cost (only for water), \$/m3	0.23	0.36	0.46	0.64	0.33	0.39	0.49	1.40	0.32	0.31
Water (income for LT, tariff \$1/m3), \$K	14.70	14.65	14.67	14.68	14.39	14.54	14.40	14.41	14.50	14.92
ROI for LT, %	443.73	279.13	216.44	156.13	305.20	258.18	203.05	71.49	309.29	320.66
Payback period, yrs	2.25	3.58	4.62	6.41	3.28	3.87	4.92	13.99	3.23	3.12

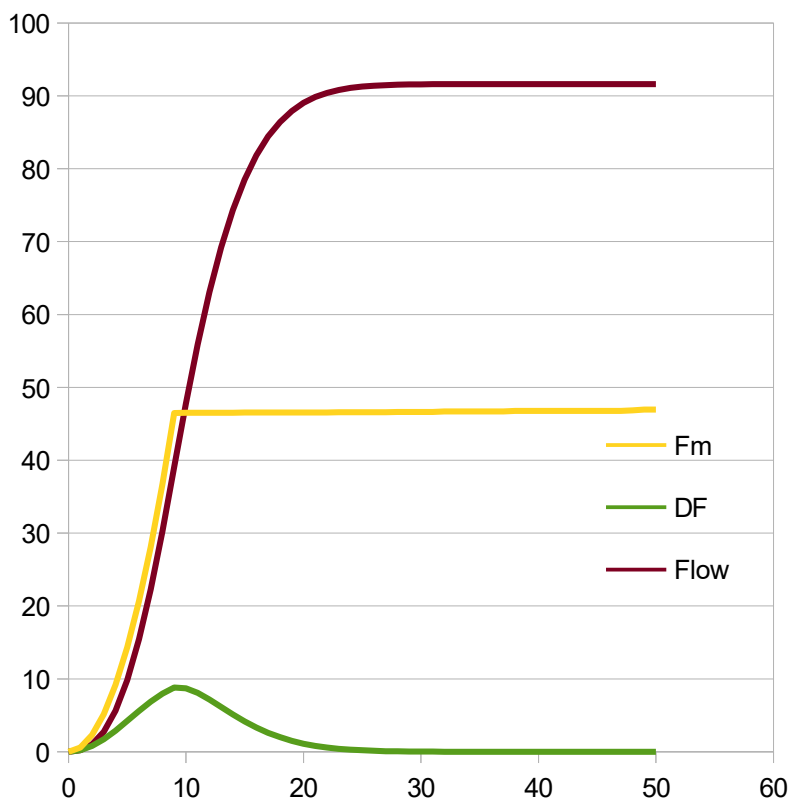
В таблице:

1. полная оптимизация, которая дает минимальный срок окупаемости и использует оба механизма регулировки (как по углу атаки, так и по площади сетки)

2. использует фиксированный угол атаки без регулировки и спуск при 15 м/с
3. использует фиксированный угол атаки без регулировки и спуск при 20 м/с
4. использует фиксированный угол атаки без регулировки и спуск при 25 м/с
5. использует свободно подвешенные сети и спуск АэроГЭС целиком при 15 м/с
6. использует свободно подвешенные сети и спуск АэроГЭС целиком при 20 м/с
7. использует свободно подвешенные сети и спуск АэроГЭС целиком при 25 м/с
8. использует свободно подвешенные сети, не предусматривая спуск до 50 м/с
9. использует регулировку по углу атаки и спуск АэроГЭС целиком при 25 м/с
10. использует регулировку по углу атаки, не предусматривая спуск до 50 м/с

Вариант 1 приведен для примера, но вряд ли может быть реализован в пилотной версии. Варианты 2, 3, 4, 5, 6, 7, 9 предполагают дополнительное обслуживание такой АэроГЭС. Вариант 8 представляется чрезвычайно дорогим. Наиболее перспективным представляется вариант 10, который требует разработки системы автоматического управления углом атаки. Идеально, если эта система будет работать автоматически на чисто физических обратных связях (например, за счет введения в такелаж задней кромки паруса упругих элементов).

v	a	Fm	DF	Flow
0	28.00	0.00	0.00	0.00
1	28.00	0.57	0.20	0.20
2	28.00	2.30	0.80	1.00
3	28.00	5.16	1.72	2.72
4	28.00	9.18	2.90	5.62
5	28.00	14.35	4.22	9.85
6	28.00	20.66	5.58	15.43
7	28.00	28.12	6.86	22.28
8	28.00	36.73	7.97	30.25
9	28.00	46.48	8.82	39.07
10	22.60	46.51	8.72	47.79
11	18.60	46.51	8.08	55.87
12	15.56	46.52	7.17	63.04
13	13.19	46.52	6.15	69.18
14	11.31	46.52	5.13	74.31
15	9.80	46.53	4.18	78.49
16	8.56	46.54	3.33	81.83
17	7.53	46.54	2.60	84.43
18	6.67	46.55	1.99	86.42
19	5.94	46.55	1.50	87.92
20	5.31	46.55	1.11	89.02
21	4.78	46.55	0.80	89.83
22	4.31	46.55	0.57	90.40
23	3.91	46.57	0.40	90.80
24	3.55	46.57	0.28	91.07
25	3.24	46.59	0.19	91.26
26	2.96	46.59	0.12	91.39
27	2.71	46.59	0.08	91.47
28	2.49	46.61	0.05	91.52
29	2.29	46.62	0.03	91.55
30	2.11	46.63	0.02	91.57
31	1.94	46.63	0.01	91.59
32	1.80	46.69	0.01	91.59
33	1.66	46.69	0.00	91.60
34	1.54	46.69	0.00	91.60
35	1.42	46.69	0.00	91.60
36	1.32	46.69	0.00	91.60
37	1.22	46.69	0.00	91.60
38	1.14	46.78	0.00	91.60
39	1.05	46.78	0.00	91.60
40	0.98	46.78	0.00	91.60
41	0.91	46.78	0.00	91.60
42	0.84	46.78	0.00	91.60
43	0.78	46.78	0.00	91.60
44	0.72	46.78	0.00	91.60
45	0.67	46.78	0.00	91.60
46	0.62	46.78	0.00	91.60
47	0.57	46.78	0.00	91.60
48	0.53	46.85	0.00	91.60
49	0.49	46.95	0.00	91.60
50	0.45	46.95	0.00	91.60



В таблице и на графике показано, как ведут себя удельные ветровые нагрузки F_m (N/m^2), а также дифференциальный и интегральный поток влаги в зависимости от скорости ветра.

Следует помнить, что все расчеты себестоимости воды основаны на предполагаемом сроке службы основных элементов АэроГЭС 10 лет. Однако для удовлетворения требований проекта Water Xprize достаточно, чтобы данная установка проработала хотя бы 3 месяца.

Применение кайтовой АэроГЭС для глобального водоснабжения

Проект Water Xprize подразумевает создание локального источника приемлемо дорогой пресной и питьевой воды в основном для бедных стран Африки, Азии и Латинской Америки, т. е. примерно для 1 млрд. человек. При этом очевидно, что даже если удастся создать такое высокотехнологичное устройство, то поставить этот дорогостоящий прибор в каждую африканскую деревню — задача невыполнимая в сравнительно короткие сроки и при недостаточности материальных ресурсов этих бедных стран. Кажется, что цель недостижима, но выход есть! Именно технология АэроГЭС позволяет настолько упростить это устройство, что сделать его можно будет даже в маленькой мастерской любой африканской деревни.

Самый технологически сложный элемент АэроГЭС — это аэростат, который постоянно удерживает АэроГЭС в воздухе и который действительно сложно сделать в деревенской мастерской, и тем более постоянно наполнять его водородом или гелием. Поэтому от него придется отказаться! Очевидно, что идеальная пресная вода, которая повсеместно находится у каждого из нас прямо над головой в облаках, может быть получена оттуда только при наличии ветра, который прогоняет эти облака через паруса АэроГЭС. Но этот же ветер может и удерживать саму АэроГЭС, если она выполнена в кайтовом исполнении.

А как же безветрие? А просто АэроГЭС не будет работать в безветрие, и мы будем спускать ее на землю. Такая АэроГЭС — это же просто большой параплан, она совершенно безопасно может быть спущена при недостаточном ветре и затем вновь запущена при подходящем ветре. Сильно ли это повлияет на выработку воды? Оказывается, совсем не сильно, если АэроГЭС правильно оптимизирована, так как при малом ветре мы бы все равно получали бы незначительную часть общей выработки согласно нашим прошлым расчетам по распределению Вейбулла. А кроме того, вода — аккумулируемый ресурс, ее не надо производить постоянно как электричество...

Добавим в модель параметр V_r , ту минимальную скорость ветра, которая будет удерживать АэроГЭС на надлежащей высоте H_r (допустим, только на 100-200 м ниже основной рабочей высоты H_{min} , но все равно уже внутри облака). При этом очевидно, что запуск будут дополнительно облегчать два фактора: во-первых, наиболее тяжелые элементы (трос и шланг) будут добавлять свой вес постепенно, по мере подъема, но при этом и ветер с высотой обычно усиливается, а во-вторых, при подъеме шланг будет пустой, и вес воды будет добавляться постепенно, и только по мере поступления воды с парусов, т. е. когда подъем уже будет закончен. А кроме того, так как такая АэроГЭС не будет производить электроэнергию, мы можем, увеличив диаметр шланга, допустить разрыв потока по сечению шланга и тем самым значительно снизить возможное гидростатическое давление, чтобы использовать вместо Дайнимы дешевый шланг из ПЭ или ПВХ. Тогда аэродинамические нагрузки будут нести не дорогой и технологически сложный шланг из Дайнимы, а более дешевые и имеющиеся в широкой доступности тросы из Дайнимы того же суммарного сечения.

Тогда весь процесс производства такой АэроГЭС сведется фактически к элементарным швейным и сборочным операциям, которые действительно легко могут быть выполнены в любой мастерской любой африканской деревни, что позволит быстро и повсеместно внедрить эту технологию для получения чистой питьевой и пресной воды.

Рассмотрим примеры в таблице:

1. вариант 10 предыдущей таблицы, из конструкции которого удален аэростат
2. тот же вариант (регулировка по углу атаки без спуска до 50 м/с) с оптимизацией
3. фиксированный угол атаки без регулировки и спуск при 16 м/с (оптимизировано)
4. фиксированный угол атаки без регулировки и спуск при 20 м/с

	1	2	3	4	5	6	7	8
Cloud collector (Rmesh[1/2] or Kmesh[3]) type, CCT	3.0000	3.0000	3.0000	3.0000	3.0000	1.0000	1.0000	2.0000
Possible Lifetime, LT, yrs	10.0000	10.0000	10.0000	10.0000	10.0000	10.0000	10.0000	10.0000
Average wind speed (base mode for calculation), Va, m/s	10.0000	10.0000	10.0000	10.0000	5.0000	5.0000	5.0000	5.0000
Min possible wind speed for run, Vr, m/s	5.0000	4.0000	4.0000	4.0000	2.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Max possible wind speed with fixed attack angle, Vm, m/s	9.0000	8.0000	16.0000	20.0000	20.0000	20.0000	0.0000	20.0000
Max possible wind speed with fixed collection area, Vs, m/s	50.0000	50.0000	16.0000	20.0000	20.0000	20.0000	20.0000	20.0000
LWC, g/m3	0.3000	0.3000	0.3000	0.3000	0.3000	0.3000	0.3000	0.3000
Cloud capacity factor, % [CCF]	67.0000	67.0000	67.0000	67.0000	67.0000	67.0000	67.0000	67.0000
Collection area, m2 [S]	257.0000	299.0000	297.0000	292.0000	100.0000	48.0000	48.0000	48.0000
Attack angle, deg [a]	28.0000	27.0000	17.0000	14.0000	29.0000	44.0000	90.0000	90.0000
-> Cx = f(a,v) for this Cloud collector by CFD	0.5628	0.5427	0.3417	0.2814	0.5829	0.3125	0.3663	0.6991
-> Cy = f(a,v) for this Cloud collector by CFD	1.0007	0.9657	0.6157	0.5107	1.0357	0.0000	0.0000	0.0000
-> Efficiency X = f(a,v) for this Cloud collector by CFD, %	27.9400	28.6350	35.5850	37.6700	27.2450	21.9360	3.2600	9.3500
-> Cloud collector specific weight, CSW, kg/m2	0.0400	0.0400	0.0400	0.0400	0.0400	0.0500	0.0500	0.1000
-> Cloud collector specific price, CSP, \$/m2	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	0.2500	0.2500	0.5000
Cloud collector weight factor [CWF]	4.9000	2.8000	2.4000	2.4000	5.0000	5.3000	10.8000	2.0000
Length of hose (max altitude and head), L, m	1681.0000	1683.0000	1734.0000	1729.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Head loss in hose, HL, %	100.0000	100.0000	100.0000	100.0000	100.0000	100.0000	100.0000	100.0000
Hydrostatic margin of safety [HMS]	5.0000	5.0000	5.0000	5.0000	5.0000	5.0000	5.0000	5.0000
Aerodynamic margin of safety [AMS]	2.0000	2.0000	2.0000	2.0000	2.0000	2.0000	2.0000	2.0000
Balloon Volume factor [BVF]	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Balloon Cax	0.0300	0.0300	0.0300	0.0300	0.0300	0.0300	0.0300	0.0300
Rope/hose specific price, DSP, \$/kg	100.0000	100.0000	100.0000	100.0000	100.0000	100.0000	100.0000	100.0000
Area of supporting kite, m2 [Sk]	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Flow by real wind speed, m3/h	0.1599	0.1679	0.1669	0.1722	0.0479	0.0265	0.0224	0.0163
Fm	46.9521	35.8657	90.1329	116.6191	237.6121	62.4960	31.7015	139.8168
Fmx	11.8237	6.0325	43.7376	56.2800	116.5398	62.4960	31.7015	139.8168
Fmy	45.4389	35.3547	78.8096	102.1400	207.0700	0.0000	0.0000	0.0000
Vf	49.0000	49.0000	16.0000	20.0000	20.0000	20.0000	20.0000	20.0000
Af	0.4900	0.2500	17.0000	14.0000	28.9900	44.0000	9.4900	89.9900
Fnx with Vr, N/m2	7.0325	4.3400	2.7336	2.2512	1.1654	0.0000	0.0000	0.0000
Fny with Vr, N/m2	12.5044	7.7228	4.9256	4.0856	2.0707	0.0000	0.0000	0.0000
Wind projection of Collection area, m2 [S*sin(a)]	120.6542	135.7432	86.8344	70.6412	48.4810	33.3436	48.0000	48.0000
Flow by average V, m3/h [LWC*V*S_wind*X*CCF]	0.2439	0.2813	0.2236	0.1926	0.0478	0.0265	0.0057	0.0162
Calculated Water collection rate (in S_wind), L/m2/day	48.5217	49.7287	61.7983	65.4192	23.6574	19.0475	2.8307	8.1188
Diameter with this % head loss, mm	4.1592	4.2408	4.2308	4.2844	2.5671	2.0266	1.8949	1.6670
Flow velocity, m/s	3.2708	3.3028	3.2988	3.3197	2.5697	2.2832	2.2077	2.0707
Water weight in hose, kg	22.8385	23.7727	24.3773	24.9263	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
The calculated wall thickness at HMS, mm	0.0714	0.0729	0.0749	0.0756	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Weight of Cloud collector with drops at CWF, Wc, kg	50.3720	33.4880	28.5120	28.0320	20.0000	12.7200	25.9200	9.6000
Tcxr with Vr, N	1807.3493	1297.6576	811.8792	657.3504	116.5398	0.0000	0.0000	0.0000
Tcyr with Vr, N	3213.6244	2309.1172	1462.9032	1192.9952	207.0700	0.0000	0.0000	0.0000
Tcx, N	3038.6972	1803.7212	12990.0672	16433.7600	11653.9800	2999.8080	1521.6710	6711.2074
Tcy, N	11677.8037	10571.0628	23406.4512	29824.8800	20707.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Tmax, N	11589.6106	10400.4812	26525.4883	33812.4356	23590.5992	3002.3969	1542.7271	6711.8668
The calculated wall thickness at AMS, mm	0.7395	0.6509	1.6639	2.0945	2.4388	0.3932	0.2161	1.0686
Hose weight (Dyneema), kg	15.7561	14.1563	37.1984	47.2806	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Load weight, kg	88.9666	71.4170	90.0877	100.2390	20.0000	12.7200	25.9200	9.6000
T, N	11589.6106	10400.4812	26525.4883	33812.4356	23590.5992	3002.3969	1542.7271	6711.8668
Tr with Vr, N	3265.6999	2368.1254	1435.1955	1129.3142	117.0644	124.6560	254.0160	94.0800
Head with Vf, H, m	1622.1917	1657.4971	1511.8393	1511.0487	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Head with Vr, Hr, m	1400.0932	1407.8280	1429.8847	1405.9053	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Cost of Cloud collector, \$	257.0000	299.0000	297.0000	292.0000	100.0000	12.0000	12.0000	24.0000
Cost of hose, \$	1575.6084	1415.6284	3719.8396	4728.0622	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Sum Cost of material, \$	1832.6084	1714.6284	4016.8396	5020.0622	100.0000	12.0000	12.0000	24.0000
Cost + Work (by doubling), \$	3665.2168	3429.2569	8033.6791	10040.1243	200.0000	24.0000	24.0000	48.0000
Additional costs for for LFC posts, \$					0.0000	300.0000	300.0000	300.0000
Total Cost, \$	3665.2168	3429.2569	8033.6791	10040.1243	200.0000	324.0000	324.0000	348.0000
Prime cost (only for water), \$/m3	0.2617	0.2332	0.5496	0.6656	0.0483	0.1396	0.1651	0.2443
Water (income for LT, tariff \$1/m3), \$K	14.0068	14.7047	14.6179	15.0849	4.1414	2.3215	1.9625	1.4244
ROI for LT, %	382.1543	428.8023	181.9576	150.2461	2070.7226	716.5022	605.7036	409.3232
Payback period, yrs	2.6167	2.3321	5.4958	6.6557	0.4829	1.3957	1.6510	2.4431

Таким образом видно, что скорость ветра ~ 4 м/с обеспечивает достаточную подъемную силу для удержания такой кайтовой станции водоснабжения на необходимой высоте. Обычно толщина пограничного слоя атмосферы (в котором наблюдаются неустойчивость воздушных потоков и резкие изменения скорости ветра) как раз не превышает 1500 м, поэтому на больших высотах АэроГЭС должна продолжать работать довольно устойчиво длительное время. Нам представляется, что необходимость отслеживать текущие метеоусловия и предотвращать незапланированные спуски — это умеренная и приемлемая плата за упрощение конструкции, при выполнении главной поставленной задачи — получение дешевого и общедоступного глобального источника пресной воды для 1 млрд человек.

Оптимизация систем сбора тумана с помощью модели АэроГЭС

Модель АэроГЭС можно применить и для оптимизации существующих систем сбора тумана. В предыдущей таблице последние 4 колонки как раз и показывают примеры такого подхода:

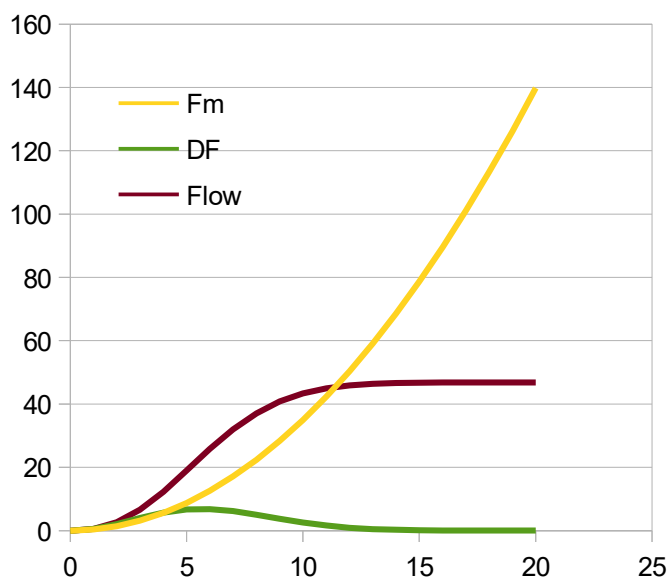
5. кайтовый вариант системы сбора тумана до скорости ветра 20 м/с
6. фиксированный угол атаки однослойной сети без регулировки до скорости 20 м/с
7. свободно подвешенная однослойная сеть до скорости ветра 20 м/с
8. стандартный LFC коллектор 48 м² с двухслойной сетью до скорости ветра 20 м/с

Как видно из таблицы во всех вариантах длина шланга нулевая, потому что эти устройства (как и традиционные сборщики тумана) расположены прямо на земле и оптимизированы для наземного использования. Вариант 5 был подобран так, чтобы его ветровая проекция примерно соответствовала площади стандартного LFC — 48 м². Для вариантов 6 и 7 аналогично была зафиксирована площадь сетки — 48 м². Кроме того, все расчеты выполнены для средней скорости ветра V_a 5 м/с, учитывая влияние поверхности земли.

Кроме того, так как расчет по модели АэроГЭС автоматически предполагает эффект флюгера (автоматический разворот сетки или кайта против ветра), то производительность для вариантов 6, 7 и 8 была в наших расчетах заведомо завышена (чисто геометрически, в 2 раза) по сравнению с вариантом 5, так как такие коллекторы установлены стационарно.

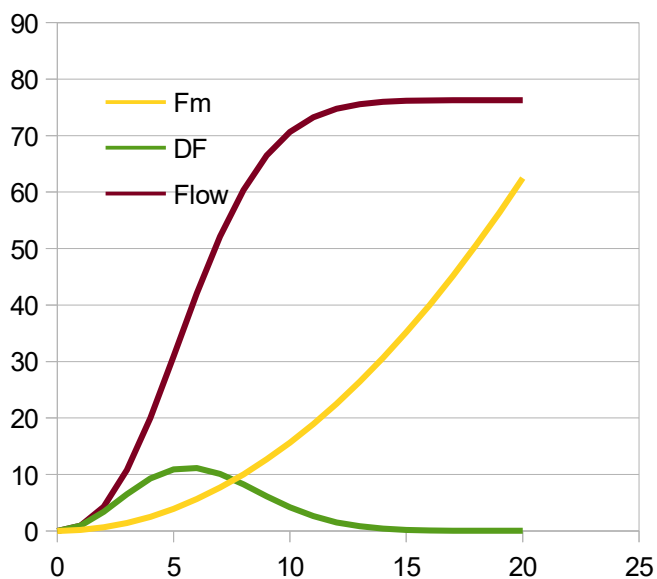
Наконец, стационарное исполнение предполагает значительное удорожание конструкции коллекторов за счет дополнительных элементов (столбов, распорок). В ^[26] подробно описана конструкция LFC 48 м² с оценкой стоимости \$378 (\$225 in materials, \$63 in labor, and \$39 in incidentals). В FogQuest Manual 2011 (стр. 62) для LFC 40 м² рекомендована оценка \$500. На основе этих оценок мы примем, что удорожание стационарного коллектора составит ~ \$300.

Для начала оценим, насколько точны наши корреляции для известных данных по LFC из ^[26]. Приводимые данные по сбору тумана 5.3 - 13.4 л/м²/день вполне соответствуют оценке по модели АэроГЭС — 8.1188 л/м²/день для варианта 8. Себестоимость воды по нашей модели равна \$0.2443/м³, но это включает только капитальные затраты в LFC. Однако эти затраты составляют по данным ^[26] только 22.7% общих капитальных затрат. Если это учесть, а также нормализовать указанную себестоимость \$1.9/м³ по указанной для нее производительности ~ 5 л/м²/день, то мы получим для варианта 8 довольно близкую оценку ~ \$1.74/м³.



Как и ожидалось, существующая конструкция LFC 48 м² (вариант 8, перпендикулярная двойная сетка) имеет самые плохие показатели по себестоимости воды от коллектора \$0.2443/м³, наибольшую стоимость коллектора \$348 при наименьшей интегральной производительности по всему распределению Вейбулла 16.3 л/час, а кроме того подвержена очень высоким ветровым нагрузкам (до 139.8 Н/м² при скорости ветра 20 м/с).

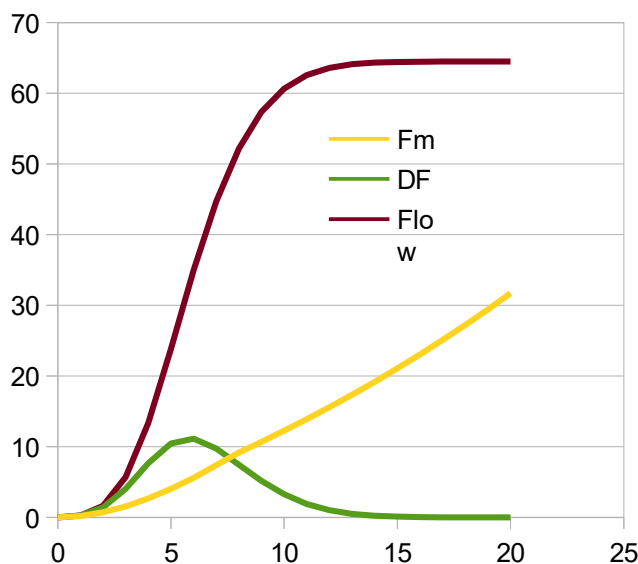
Теперь посмотрим, что дает наша модель, которая автоматически находит более оптимальные решения.



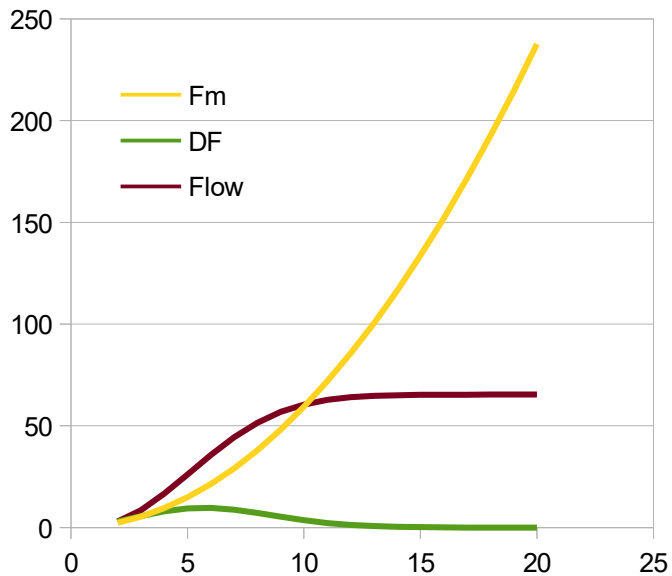
Даже при использовании стационарного коллектора, модель находит более оптимальным использование одиночной (однослойной) сети с заранее заданным фиксированным углом атаки 44-45 градусов (вариант 6). Это значительно увеличивает общую эффективность сети (до 26.5 л/час), даже несмотря на уменьшение ветровой проекции сети того же исходного размера (48 м²) до 33 м². Потери капель от срыва при прогибе сети также уменьшатся при такой наклонной геометрии сетки. В результате снижается и себестоимость воды до \$0.1396/м³, и ветровые нагрузки до 62.5 Н/м² (при 20 м/с).

Почти такой же оптимальный результат (22.4 л/час общей производительности) наша модель показывает при свободном подвесе сети (вариант 7). При этом модель предлагает значительное «утяжеление» сети до величины $CFW=10.8$ (например, за счет использования дополнительных элементов дренажа), чтобы обеспечить примерно те же оптимальные углы атаки ~ 40-50 градусов при средних скоростях ветра ~ 5-6 м/с. Изменение углов атаки такой свободно подвешенной сетки, удельных горизонтальных нагрузок (Fm, Н/м²), а также дифференциальных (DF) и интегральных (Flow) потоков влаги показано в таблице.

v	a	Fm	DF	Flow
0	90,00	0,00	0,00	0,00
1	88,04	0,1820034	0,2461197861	0,2461197861
2	82,31	0,7146054	1,3983546026	1,6444743887
3	73,56	1,5617934	4,0528193305	5,6972937192
4	63,15	2,679084	7,672446979	13,3697406982
5	52,69	4,03309125	10,4791962026	23,8489369009
6	43,33	5,6105298	11,1282827493	34,9772196501
7	35,53	7,41296745	9,7538653985	44,7310850487
8	29,98	9,1767936	7,4554507588	52,1865358074
9	26,34	10,6915302	5,1821453187	57,3686811262
10	23,35	12,26355	3,2830008397	60,6516819658
11	20,86	13,8958578	1,9102143428	62,5618963086
12	18,76	15,5907072	1,0260783949	63,5879747035
13	16,97	17,3505709	0,5106868811	64,0986615846
14	15,43	19,1777964	0,2361359627	64,3347975473
15	14,1	21,078675	0,1016749405	64,4364724878
16	12,94	23,0533632	0,0408223367	64,4772948245
17	11,91	25,0933787	0,0152887292	64,4925835536
18	11,01	27,2196612	0,0053542968	64,4979378504
19	10,2	29,412836	0,0017518983	64,4996897487
20	9,49	31,70148	0,0005369722	64,5002267209



При этом также есть экспериментальные основания полагать, что потери капель уменьшатся при такой свободно подвешенной однослойной сети, так как ветер будет не срывать капли, а гнать их вдоль сети. В результате снижается и себестоимость воды до \$0.1651/м³, и особенно ветровые нагрузки до 31.7 Н/м² (при 20 м/с).



Ну и самые лучшие показатели по себестоимости воды показывает кайтовый сборщик (вариант 5) - \$0.0483/м³ при наименьшей стоимости \$200 и наибольшей общей производительности 47.3 л/час, что в три раза выше стандартного LFC при той же ветровой проекции. Причем видно, что наша модель выбрала предельный угол атаки из заданного диапазона. Очевидно, что если бы это ограничение было снято, то были бы достигнуты еще лучшие показатели при еще больших углах атаки. О такой возможности я писал раньше в ^[3] на основе анализа аэродинамики и эффективности кайта (стр 8):

«Существующие сборщики тумана

являются довольно дорогими, так как используют по две опоры, между которыми натягивается сетка. Эти опоры надо крепить растяжками, и весь процесс монтажа довольно трудоемкий и должен обязательно выполняться в полевых условиях прямо в горах. Кроме того, фиксированное положение сетки не оптимально при смене направления ветра.

В этом смысле сборщик тумана, построенный на основе многоярусного кайта, давал бы много преимуществ. Такие кайты-сборщики можно было бы заранее массово изготавливать в мастерских промышленным способом и транспортировать к месту установки в сложенном компактном виде. При монтаже в горах им нужна была бы только одна наземная опора-якорь. Они автоматически всегда поддерживали бы свое оптимальное расположение против ветра, а кроме того, они могли бы сами подниматься на куда большую высоту и захватывать больший объем тумана или облака. Для автоматического раскрытия под ветром им было бы достаточно просто иметь небольшие конструктивные клапаны на верхнем ярусе кайта. При этом такие практически наземные кайты имели бы низкое аэродинамическое качество (т. е. поднимались над землей всего на ~ 20°), но очень высокую эффективность по воде ~ 60%.»

Тем не менее у кайтового варианта тоже есть свои недостатки. При простоте его крепления в одной точке, это крепление должно выдерживать самые большие нагрузки — до 2359 кгс (при 20 м/с), что в 3.5 раза больше, чем нагрузки на опоры стандартного LFC (671 кгс), и в 15 раз больше, чем нагрузки для варианта свободного подвеса сети (154 кгс).

Другой недостаток связан с тем, что полное раскрытие кайта для достижения расчетной производительности требует некоторой начальной скорости ветра V_r (2 м/с для данного варианта 5), что для наземных систем является важным и критичным условием. Можно предложить некоторые конструктивные компромиссы (например, использование флажштока для заведомого подъема кромки кайта), но это будет усложнять и удорожать систему.

Таким образом модель не дает однозначных рекомендаций, но дает научные основания для практических проверок данных выводов в рамках программ [FogQuest](#), [WasserStiftung](#) и других подобных групп.

- [1] Казанцев А.Н. [ТЭО для различных примеров АэроГЭС.](#)
- [2] Казанцев А.Н. [Снос АэроГЭС.](#)
- [3] Казанцев А.Н. [Оптимизация сети АэроГЭС.](#)
- [4] <http://tiempo.sei-international.org/portal/archive/issue26/t26art3.htm>
- [5] <http://www.vokrugsveta.ru/article/257827/>
- [6] ГОСТ Р 53460-2009. <http://vsegost.com/Catalog/50/50915.shtml>
- [7] <http://www.sevparaplan.com/meteorology/veter>
- [8] <http://euanmearns.com/high-altitude-wind-power-reviewed/>
- [9] https://en.wikipedia.org/wiki/Weibull_distribution
- [10] http://www.itp.nsc.ru/conferences/mzhz_2015/files/S04_Achitaev.pdf
- [11] <http://cyberleninka.ru/article/n/matematicheskoe-modelirovanie-energii-vetra>
- [12] <https://www.c-o-k.ru/images/library/cok/362/36231.pdf>
- [2] Казанцев А.Н. [Снос АэроГЭС.](#)
- [13] https://en.wikipedia.org/wiki/Liquid_water_content
- [14] http://www-das.uwo.edu/~geerts/cwx/notes/chap08/moist_cloud.html
- [15] <http://voeikovmgo.ru/download/publikacii/2008/OFO.pdf>
- [16] [Spatial and Temporal Distribution of Clouds Observed by MODIS Onboard the Terra.](#)
- [17] [Giovanni](#)
- [18] https://en.wikipedia.org/wiki/Lift-to-drag_ratio
- [2] Казанцев А.Н. [Снос АэроГЭС.](#)
- [19] http://oat.mai.ru/book/glava05/5_7/5_7.html
- [20] Байбиков А.С. [Пример расчета для пилотной установки.](#)
- [3] Казанцев А.Н. [Оптимизация сети АэроГЭС.](#)
- [21] <http://meteorologist.ru/formula-ferrelya.html>
- [22] http://www.ivtechno.ru/raschet_10
- [23] https://en.wikipedia.org/wiki/Darcy%E2%80%93Weisbach_equation
- [24] http://dic.academic.ru/dic.nsf/enc_tech/2867/%D0%9D%D0%BE%D1%80%D0%BC%D1%8B
- [3] Казанцев А.Н. [Оптимизация сети АэроГЭС.](#)
- [2] Казанцев А.Н. [Снос АэроГЭС.](#)
- [25] <http://water.xprize.org/>
- [26] <http://www.oas.org/dsd/publications/unit/oea59e/ch12.htm>