

Снос АэроГЭС

Тезисы

Дискуссии со многими потенциальными инвесторами и даже экспертами показали, что существует устойчивое предубеждение, что при сильных ветрах АэроГЭС будет сильно сносить, и она может буквально «лечь» на землю. Отчасти, это связано с данными по обычным аэростатам, снос которых может быть весьма значительным – см. например, классическую монографию ^[1] (рис. 36, стр. 60) или ^[2] (Fig. 9), ^[3] (Fig. 3). Так как та же проблема возникает при использовании аэростатов, например, для видео наблюдения или предоставления услуг связи и беспроводного интернета, то в некоторых работах предлагается использовать аэростаты с профилем крыла, чтобы скомпенсировать снос за счет увеличения аэродинамических сил – см. например, ^[4].

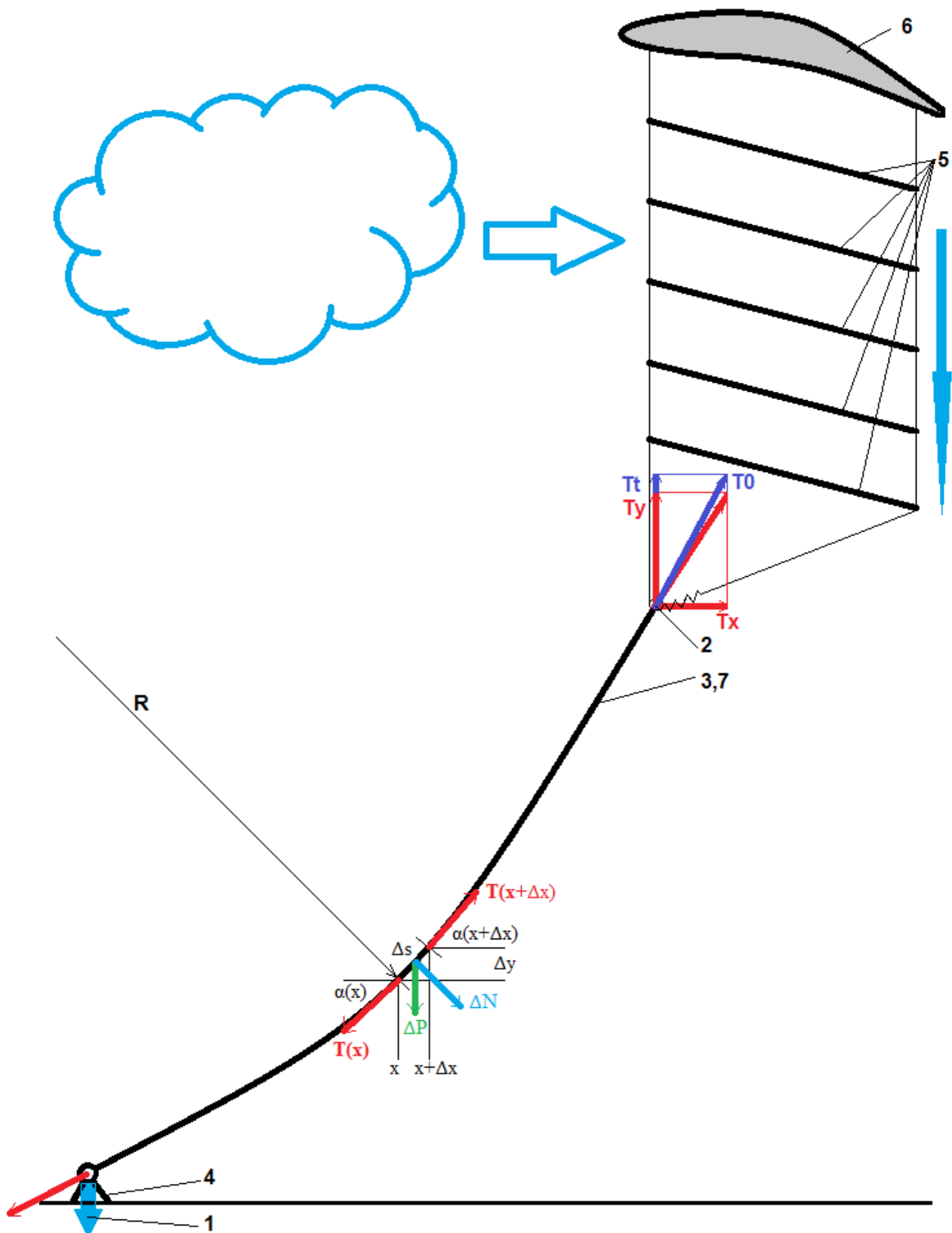
АэроГЭС в этом смысле имеет значительное преимущество перед любыми аэростатами, так как может использовать собственные поверхности для приема влаги для создания дополнительных аэродинамических сил, которые будут стабильно удерживать ее в воздухе с минимальным сносом. В данной работе я рассматриваю теоретические и численные методы расчета такого сноса на основе примера одного из возможных конструктивов АэроГЭС^[5], предложенного профессором, д.т.н. Александром Сергеевичем Байбиковым, с учетом того, что я также буду использовать аэростат с профилем крыла.

Конструкция

Конструкция и расчетная схема такой АэроГЭС показана на фиг. 1. Аэростат 6 с профилем крыла создает в точке 2 свободную подъемную силу T_i , достаточную для того, чтобы поднять на расчетную высоту $L_i = 3000$ м пустой шланг 3, который одновременно играет роль троса 7. Согласно гидравлическим расчетам в ^[5], шланг имеет внутренний диаметр 40 мм. Примем для расчетов внешний диаметр шланга $D = 50$ мм. При этом вес шланга будет 2121 кг, и при удельной прочности 2.4 ГПа (*Dyneema*) он сможет выдержать продольное натяжение до 1.696 МН (~ 173 тонны) в наиболее напряженной точке 2. В этой же точке находится емкость для приема воды (верхний бьеф) и храповик такелажа для регулирования угла атаки аэростата 6 и кайтовых поверхностей 5 площадью $S_k = 15000$ м², собирающих капельную влагу из облаков на своей нижней стороне как в огромном жалюзийном сепараторе. Затем вода поступает в шланг 3, вырабатывает электроэнергию в турбогенераторе 4 и сливается в нижний бьеф 1.

АэроГЭС при этом работает следующим образом. Аэростат 6 поднимает всю конструкцию на рабочую высоту. При достаточной скорости ветра (которую предстоит рассчитать) и достижении необходимой подъемной силы $T_i + T_j$ от аэростата 6 и кайтовых поверхностей 5 вода поступает в шланг 3 и заполняет его (возможно, ступенчато), увеличивая массу «троса» 7 на 3770 кг. Одновременно на «трос» 7 в точке 2 действует и сила горизонтального сноса T_x поверхностей 5. Таким образом, равнодействующая всех этих сил T_0 и создает граничное условие для этой задачи в точке 2, куда и следует поместить начало координат для расчетов. После заполнения шланга 3 АэроГЭС продолжает штатно эксплуатироваться в рабочем диапазоне скоростей ветров и сносов (что также предстоит рассчитать). При снижении скорости ветра ниже критической автоматика АэроГЭС должна провести экстренный слив воды из шланга (также, возможно, ступенчато), чтобы удержать всю конструкцию в воздухе. Наоборот, при превышении скорости ветра автоматика АэроГЭС должна выполнить мероприятия для удержания ее в воздухе с предотвращением разрушения конструкции от ветровых нагрузок. Это может быть дополнительный набор воды в емкость верхнего бьефа, либо «сброс парусов» (перевод нескольких поверхностей 5 в режим свободного подвеса),

либо изменение угла атаки поверхностей 5 с помощью силы колебаний самого ветра, используя управляемый храповик или упругость такелажа в точке 2. Последний вариант (как наиболее универсальный и предпочтительный) также будет рассчитан в данной работе.



Фиг. 1. Конструкция и расчетная схема АэроГЭС.

Постановка задачи

Данная задача имеет очень славную математическую историю и сводится к суперпозиции двух аналитических решений – уравнению цепной линии и уравнению невесомого каната или паруса под ветровым давлением.

Для решения данной задачи надо сделать два исходных допущения:

1. Следуя ^[1] (стр. 59), будем считать, что ветровое давление $W_k = \rho v^2/2$ постоянно по высоте, где ρ – плотность воздуха (0.943 кг/м³ на высоте 3 км), а v – скорость ветра.
2. Следуя ^[1] (стр. 38), будем считать, что на канат действует только нормальная составляющая силы ветрового давления, т. е. что сила $\Delta N = C_n W_k D \Delta s$ всегда перпендикулярна канату в любой точке (где C_n – коэффициент аэродинамического сопротивления по нормали к «тросу»).

Следуя классическому [решению для цепной линии](#), рассмотрим равновесие сил, действующих на элемент длиной Δs , и напишем следующую систему дифференциальных уравнений:

$$d(T(x) \cos \alpha(x)) = -d(N(x) \sin \alpha(x)) = -C_n W_k D d(s \sin \alpha(x)) = -C_n W_k D dy$$

$$d(T(x) \sin \alpha(x)) = dP(x) + d(N(x) \cos \alpha(x)) = dP(x) + C_n W_k D d(s \cos \alpha(x)) = dP(x) + C_n W_k D dx$$

Проводя интегрирование первого уравнения и подставляя граничное условие, получаем:

$$T(x) \cos \alpha(x) = T_x - C_n W_k D y(x)$$

Подставляя $T(x)$ во второе уравнение и учитывая, что $\sin \alpha(x) / \cos \alpha(x) = \tan \alpha(x) = y'(x)$, получаем, деля на dx :

$$T_x y''(x) - C_n W_k D (y'(x))^2 - C_n W_k D y(x) y''(x) = dP(x)/dx + C_n W_k D$$

А учитывая, что $dP(x) = (gM/L_t) ds = (gM/L_t)(1+(y'(x))^2)^{1/2} dx$ окончательно получаем итоговое дифференциальное уравнение данной линии:

$$y''(x)(1-y(x)/a_t) = (1+(y'(x))^2)^{1/2}/a + (1+(y'(x))^2)/a_t$$

где: $a = T_x/(gM/L_t)$ – классический параметр цепной линии,
 g – ускорение свободного падения,
 M – масса шланга (с водой или без воды),
 $a_t = T_x/(C_n W_k D)$ – аналогичный параметр ветрового напора.

Это уравнение можно легко решить численно, используя граничные условия в точке 2, т. е. в начале координат: $y(0) = 0$, $y'(0) = (T_t + T_x)/T_x$

Аналитические решения

Очевидно, что чем слабее ветер и тяжелее «трос», тем ближе численное решение будет к аналитическому уравнению цепной линии, и наоборот, чем сильнее ветер и легче «трос», тем ближе оно будет к аналитическому решению для невесомого каната под ветровым давлением.

Аналитическое решение для цепной линии было получено и опубликовано еще в 1691 году сразу несколькими знаменитыми математиками (*Христианом Гюйгенсом, Готфридом*

Вильгельмом Лейбницем и Иоганном Бернулли) и выглядит крайне просто: $y(x) = a \cosh(x/a)$
 В нашем случае надо удовлетворить граничные условия, что приводит к уравнению:

$$y_c(x) = a (\cosh((x+b)/a) - \cosh(b/a))$$

где: $a = T_x/(gM/L_t)$ – классический параметр цепной линии,
 $b = a \operatorname{asinh}((T_t+T_y)/T_x)$

К сожалению, мне пока не удалось получить общее математическое решение задачи для невесомого каната под ветровым давлением, но частное решение можно получить, воспользовавшись следующей физической аналогией. Надуем, например, тонкостенный эластичный резиновый шланг воздухом под некоторым давлением. Очевидно, что он примет цилиндрическую форму, т. е. любое сечение шланга примет форму окружности. Причем распределение сил в любом бесконечно малом элементе этой окружности будет точно соответствовать нашей задаче: нормальная сила (ветрового) давления будет полностью скомпенсирована касательными силами натяжения в любой точке этой окружности. Отсюда делаем вывод, что существует по крайней мере частное аналитическое решение этой задачи – дуга окружности очень большого радиуса R_t . Логично предположить, что этот радиус является функцией ветрового давления W_k . Тогда, принимая, что сектор этой дуги окружности имеет угол $2\gamma_0$, учитывая, что длина «троса» $L_t = 2\gamma_0 R_t$, и интегрируя силу ветрового давления на половине этой дуги (по условиям симметрии) от 0 до γ_0 , получаем:

$$T_0 \sin \gamma_0 = \int C_n W_k D R_t \cos \gamma \, d\gamma = C_n W_k D R_t \sin \gamma_0$$

Откуда, учитывая, что при достаточно сильном ветре $T_0 \sim W_k$, получаем замечательный вывод, что радиус кривизны «троса» R_t для чистого кайта (когда массой «троса» и аэростатической подъемной силой можно пренебречь) **не зависит** от ветрового давления W_k , а зависит только от аэродинамического качества кайта k_0 , т. е.:

$$R_t = (C_x S_k / \cos \alpha_0) / (C_n D)$$

где: C_x – коэффициент аэродинамического сопротивления «кайта» (иначе, C_D),
 S_k – площадь «кайта» (здесь, поверхностей 5 АэроГЭС 15000 м²),
 $\alpha_0 = \operatorname{atan} k_0$ – граничное условие, угол вектора силы T_0 к горизонту,
 $k_0 = (T_t+T_y)/T_x$ – условное аэродинамическое качество «кайта» АэроГЭС.

Итак, удовлетворяя граничные условия, окончательно приходим к модифицированному уравнению окружности, дуга которой и является уравнением «троса»:

$$y_t(x) = y_{r0} - (R_t^2 - (x - x_{r0})^2)^{1/2}$$

где: $x_{r0} = -R_t \cos(\pi/2 - \alpha_0)$, $y_{r0} = R_t \sin(\pi/2 - \alpha_0)$ – координаты центра окружности.

Это уравнение было также проверено непосредственно прямым интегрированием исходного дифференциального уравнения при условии «невесомого троса» и дало полное совпадение, что подтвердило правильность использованной физической аналогии.

Интересно, что снос ΔX_t при этом можно вычислить чисто геометрически:

$$\Delta X_t = 2R_t \sin(L_t/(2R_t)) \sin(\pi/2 - \alpha_0 + L_t/(2R_t)) \sim L_t(\pi/2 - \alpha_0 + L_t/(2R_t))$$

т. е. «ветровая» добавка к сносу за счет кривизны окружности всего лишь $\sim L_t^2/(2R_t)$.

Аэродинамические коэффициенты

Аэродинамические коэффициенты C_x (или C_D), C_y (или C_L) и C_n являются важнейшими экспериментальными данными, используемыми в этих расчетах. Начиная с классической работы Людвига Прандтля 1923 года ^[6], во множестве теоретических и экспериментальных статей исследуется обтекание плоской пластины в различных условиях, например, ^[7], где рассматривается влияние каскадных поверхностей, аналогичных случаю АэроГЭС, ^[8], где рассматривается влияние неустойчивости потока и динамическое изменение данных коэффициентов, ^[9], где приводятся подробные таблицы значений данных коэффициентов в зависимости от угла атаки и соотношения сторон (*aspect ratio*, AR). Именно эти данные я и буду использовать в дальнейших расчетах, но для малых углов атаки я дополнил их в нижеприведенной таблице численной аппроксимацией (*значения курсивом*) в соответствии с теоретическими рекомендациями в ^[2] (p. 1532, eq. (6) – $C_L = a_v \sin \alpha$, $C_D = C_{D0} + K\alpha^2$).

α (°)	C_L	C_D	α (°)	C_L	C_D	α (°)	C_L	C_D
AR = 5 : 1			AR = 1 : 1			AR = 1 : 5		
0	0	0.0218	0	0	0.0232	0	0	0.0066
<i>1.0</i>	<i>0.077</i>	<i>0.0228</i>	<i>1.0</i>	<i>0.032</i>	<i>0.0237</i>	<i>1.0</i>	<i>0.013</i>	<i>0.0068</i>
<i>2.0</i>	<i>0.154</i>	<i>0.0257</i>	<i>2.0</i>	<i>0.064</i>	<i>0.0253</i>	<i>2.0</i>	<i>0.025</i>	<i>0.0073</i>
<i>3.0</i>	<i>0.231</i>	<i>0.0305</i>	<i>3.0</i>	<i>0.097</i>	<i>0.0279</i>	<i>3.0</i>	<i>0.038</i>	<i>0.0083</i>
<i>4.0</i>	<i>0.308</i>	<i>0.0373</i>	<i>4.0</i>	<i>0.129</i>	<i>0.0316</i>	<i>4.0</i>	<i>0.050</i>	<i>0.0095</i>
4.9	0.377	0.0450	5.0	0.161	0.0363	5.0	0.063	0.0112
9.7	0.719	0.135	9.9	0.361	0.0842	10.0	0.147	0.0262
14.7	0.774	0.219	14.9	0.591	0.176	14.9	0.300	0.0860

Таблица 1. Экспериментальные и аппроксимированные C_L , C_D от α при различных AR.

Что касается коэффициента C_n для расчета ветровой нагрузки на трос, то в литературе можно найти значения от 1.1 (для гладкостенного троса ^[1]), 1.13 (для витого троса ^[1]) и до 1.2 – 1.25. Просто примем для расчетов довольно консервативную оценку 1.2, которая использовалась и раньше в исходном примере расчета АэроГЭС^[5].

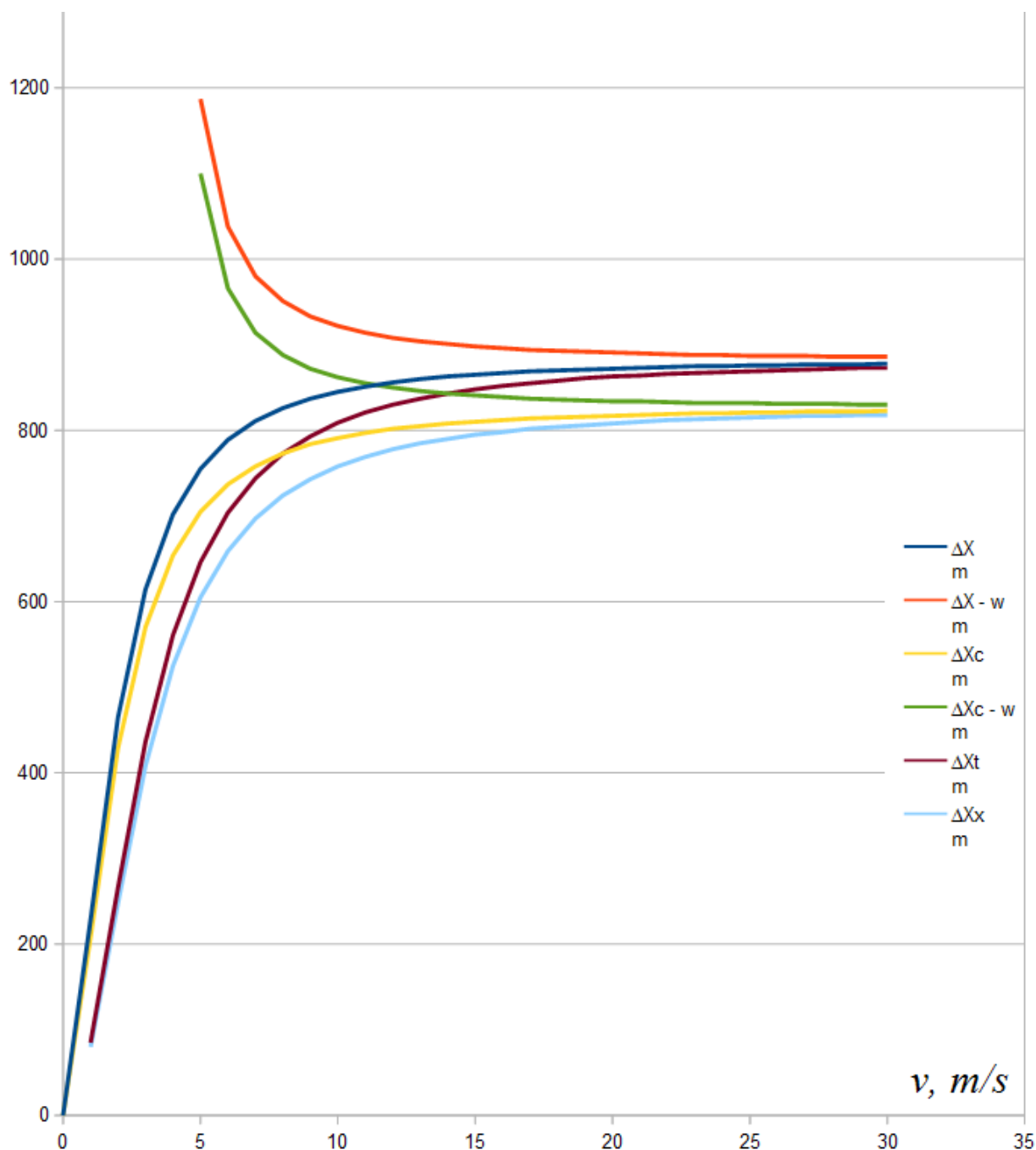
Численные расчеты

Расчеты проводились на основе программы Mathcad для различных режимов работы АэроГЭС при варьировании исходных данных (скорости ветра, угла атаки, AR, заполненности или незаполненности шланга водой). В каждом расчете вычислялась максимальная сила T_0 в точке 2 и соответствующий запас прочности K_σ , а также сносы ΔX как полученные численно – интегрированием вышеприведенного дифференциального уравнения $y(x)$, так и аналитически для цепной линии $y_c(x)$, для только ветровой нагрузки $y_i(x)$, и для чисто геометрического смещения $y_x(x)$ за счет наклона троса, соответствующего данному аэродинамическому качеству. Так как расчеты в рабочих режимах показали очень незначительные отклонения линии троса от прямой линии, то сносы также оценивались упрощенно, без интегрирования по длине, а просто по точке пересечения с окружностью $L_r(x)$ с центром в начале координат и радиусом равным исходной длине троса L_i . По сути, техническая задача сводилась к нахождению устойчивого диапазона рабочих режимов для оперативного управления АэроГЭС в любых прогнозируемых ветровых условиях с допустимым уровнем запаса прочности и величин сноса.

v m/s	T_0 kN	K_σ	ΔX m	$\Delta X - w$ m	ΔX_c m	$\Delta X_c - w$ m	ΔX_t m	ΔX_x m
0	20.80	81.5	0		0		0	0
1	22.93	74.0	228		208		85	80
2	29.38	57.7	465		429		266	248
3	40.27	42.1	614		570		436	408
4	56.60	30.5	702	2696	654	2656	561	525
5	75.39	22.5	755 →	1187	705	1100	646	605
6	99.62	17.0	789	1038	737	966	704	659
7	128.3	13.2	811	980	758	914	744	697
8	161.4	10.5	826	951	773	888	773	724
9	198.9	8.53	837	933	784	872	793	743
10	240.8	7.05	845	922	791	862	809	758
11	287.1	5.91	851	914	797	855	821	769
12	337.9	5.02	856	908	802	850	830	778
13	393.1	4.32	860	904	805	846	837	785
14	452.6	3.75	863	901	808	843	843	790
15	516.6	3.28	865	898	810	841	848	795
16	585.1	2.90	867	896	812	839	852	798
17	657.9	2.58	869	894	814	837	855	802
18	735.1	2.31	870	893	815	836	858	804
19	816.8	2.08	871	892	816	835	861	806
20	902.9	1.88	872	891	817	834	863	808
21	993.4	1.71	873	890	818	834	864	810
22	1088	1.56	874	889	819	833	866	812
23	1188	1.43	875	888	820	832	867	813
24	1291	1.32	875	888	820	832	868	814
25	1400	1.21	876	887	821	832	869	815
26	1512	1.12	876	887	821	831	870	816
27	1629	1.04	877	887	822	831	871	817
28	1750	0.97	877	886	822	831	872	817
29	1876	0.90	877	886	822	830	873	818
30	2006	0.85	878	886	823	830	873	818
40	3552	0.48	880	884	824	829	877	822
50	5538	0.31	880	883	825	828	879	824

Таблица 2. Расчетное усилие T_0 , запас прочности K_σ и сносы ΔX (без воды) и $\Delta X - w$ (с водой), а также аналитические сносы ΔX_c , $\Delta X_c - w$, ΔX_t , ΔX_x в зависимости от скорости ветра v при угле атаки $\alpha = 14.9^\circ$ для AR = 1 : 5, что примерно соответствует проекту АэроГЭС в [1].

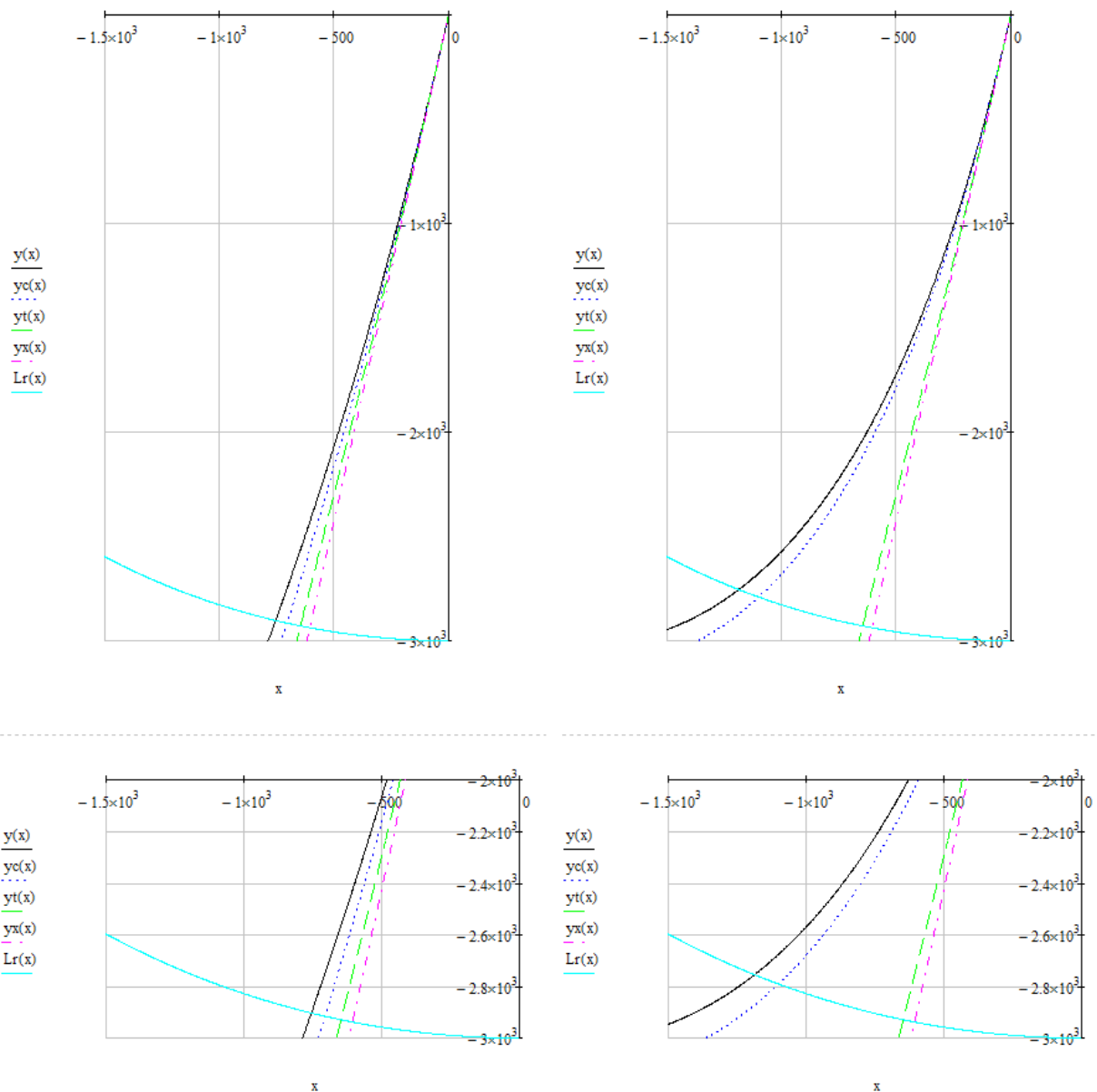
Следующий график (фиг. 2), построенный по данным таблицы 2, отчетливо показывает, что с увеличением скорости ветра снос АэроГЭС в рабочих режимах не только не будет возрастать, но, напротив, будет снижаться, асимптотически стремясь к абсолютно приемлемым значениям. При этом основная рабочая зона 5-19 м/с, показанная в таблице 2 **зеленым фоном**, как раз соответствует диапазону наиболее вероятных ветров на высоте 3 км.



Фиг. 2. Сносы ΔX (без воды) и $\Delta X-w$ (с водой), а также аналитические сносы ΔX_c , ΔX_c-w , ΔX_t , ΔX_x в зависимости от скорости ветра v при угле атаки $\alpha = 14.9^\circ$ для $AR = 1 : 5$.

Особый интерес представляет момент заполнения шланга водой, который в таблице 2 осуществляется при скорости ветра 5 м/с, когда подъемные аэродинамические силы оказываются достаточными, чтобы удержать шланг с водой при приемлемом сносе 1187 м. Разумеется, этот момент может не быть строго фиксированным, так как АэроГЭС можно использовать и при меньших скоростях ветра, заполняя шланг частично, если турбогенератор

способен работать в широком диапазоне напоров воды (что вполне соответствует возможностям турбины Пелтона с поворотным соплом). Однако, если такое заполнение происходит, то интересно визуально продемонстрировать, как меняется кривизна «троса» до и после заполнения. Это показано на следующем рисунке (фиг. 3), где слева показаны графики линии «троса» для пустого шланга, а справа – для шланга после заполнения водой.



Фиг. 3. Расчетные линии для пустого шланга (слева) и заполненного водой (справа) при скорости ветра 5 м/с, угле атаки $\alpha = 14.9^\circ$ и $AR = 1 : 5$.

Наконец, важнейшей задачей является доказательство того, что АэроГЭС при правильном автоматическом управлении углом атаки поверхностей 5 может выдерживать не только штормовой, но даже ураганный ветер 30-50 м/с. В следующей таблице 3 представлены расчеты рабочих режимов АэроГЭС при разных AR в зависимости от изменения скорости ветра с автоматическим управлением углом атаки для поддержания достаточного запаса прочности (> 2) и при ограничении сноса половиной длины «троса» ($L_t/2 = 1500$ м), т. е. углом $\sim 60^\circ$ от горизонта. Как и в таблице 2, **желтым фоном** показаны значения сноса для пустого шланга до заполнения, **зеленым фоном** – основная рабочая зона после заполнения шланга, **оранжевым фоном** – режимы с недостаточным запасом прочности (т. е. меньше 2, но

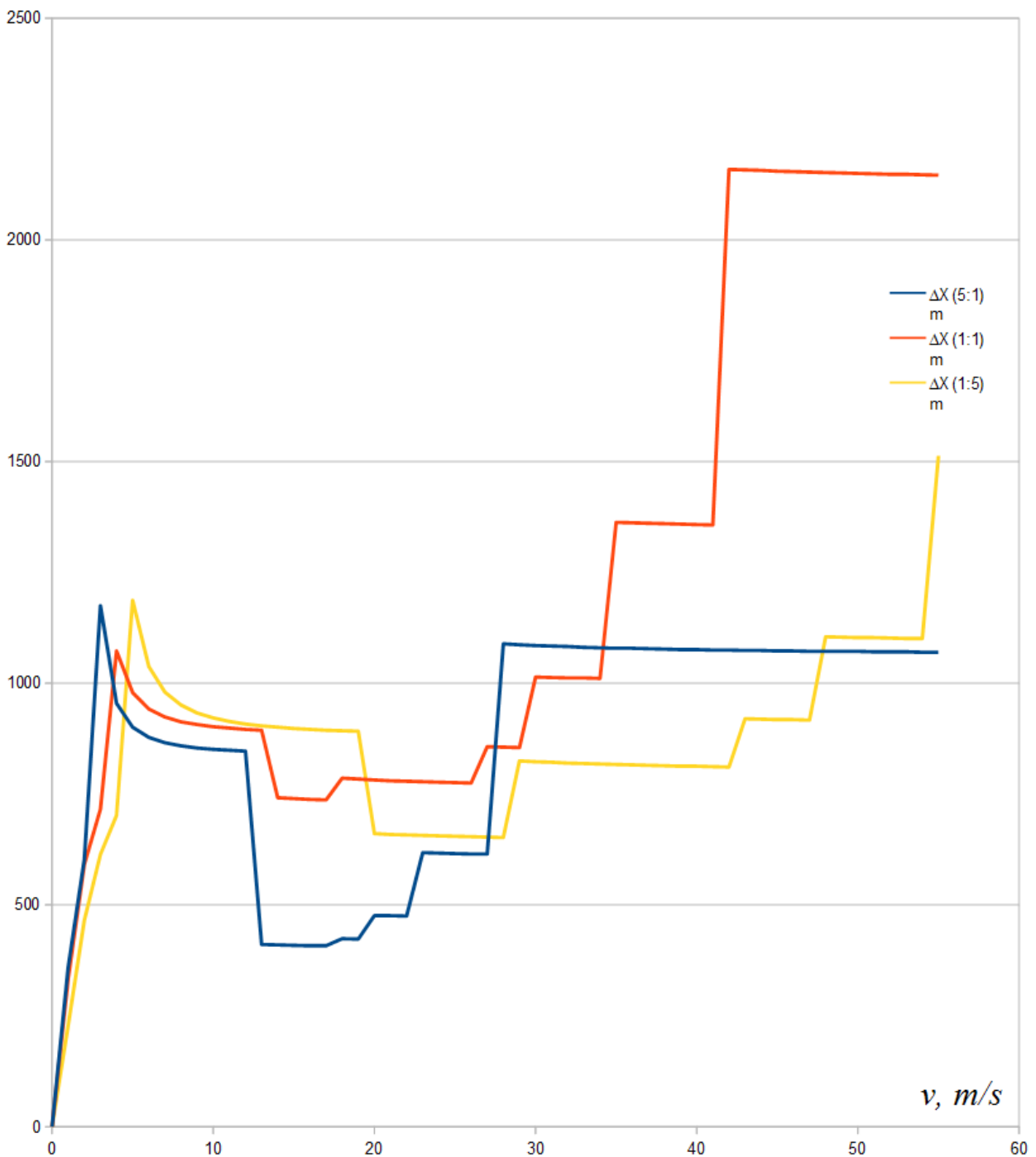
больше 1) или с превышенным сносом, и **красным фоном** – режимы, недопустимые по прочности. Аналогично **оранжевым** и **красным** цветом шрифта показаны и соответствующие рассчитанные коэффициенты запаса прочности. Кроме того, маркерами вида «@ 9.9°» показаны точки изменения угла атаки при достижении критического запаса прочности (здесь принятого равным 2).

v m/s	T_0 kN	K_σ	$\Delta X (-w)$ m	T_0 kN	K_σ	$\Delta X (-w)$ m	T_0 kN	K_σ	$\Delta X (-w)$ m
	AR = 5 : 1			AR = 1 : 1			AR = 1 : 5		
0	20.80	81.5 @14.7°	0	20.80	81.5 @14.9°	0	20.80	81.5 @14.9°	0
1	26.32	64.5	359	25.01	67.8	333	22.93	74.0	228
2	43.14	39.3	602	37.84	44.8	591	29.38	57.7	465
3	71.44	23.8	1175	59.48	28.5	716	40.27	42.1	614
4	111.2	15.3	955	89.91	18.9	1073	56.60	30.5	702
5	162.3	10.5	901	129.1	13.1	979	75.39	22.5	1187
6	224.9	7.54	878	177.0	9.58	942	99.62	17.0	1038
7	298.8	5.68	866	233.7	7.26	924	128.3	13.2	980
8	384.1	4.42	859	299.1	5.67	913	161.4	10.5	951
9	480.9	3.53	854	373.2	4.55	907	198.9	8.53	933
10	588.9	2.88	851	456.1	3.72	902	240.8	7.05	922
11	708.4	2.40	849	547.7	3.10	899	287.1	5.91	914
12	839.2	2.02	847	648.0	2.62	896	337.9	5.02	908
13	474.5	3.58 @ 4.9°	411	757.0	2.24	894	393.1	4.32	904
14	547.0	3.10	410	534.1	3.18 @ 9.9°	742	452.6	3.75	901
15	624.8	2.72	409	610.2	2.78	740	516.6	3.28	898
16	708.1	2.40	408	691.4	2.45	738	585.1	2.90	896
17	796.7	2.13	408	777.9	2.18	737	657.9	2.58	894
18	731.6	2.32 @ 4.0°	424	398.5	4.26 @ 5.0°	786	735.1	2.31	893
19	812.8	2.09	423	441.7	3.84	784	816.8	2.08	892
20	679.8	2.50 @ 3.0°	476	487.2	3.48	782	442.9	3.83 @10.0°	661
21	747.4	2.27	476	535.1	3.17	780	486.2	3.49	659
22	818.2	2.07	475	585.3	2.90	779	531.6	3.19	658
23	604.7	2.81 @ 2.0°	618	637.8	2.66	778	579.1	2.93	657
24	656.6	2.58	617	692.6	2.45	777	628.8	2.70	656
25	710.7	2.39	616	749.8	2.26	776	680.5	2.49	655
26	767.0	2.21	615	809.4	2.10	775	734.4	2.31	654
27	825.5	2.06	615	705.0	2.41 @ 4.0°	857	790.3	2.15	653
28	465.3	3.65 @ 1.0°	1089	756.6	2.24	856	848.4	2.00	652
29	497.6	3.41	1087	810.2	2.09	855	401.1	4.23 @ 5.0°	825

30	531.1	3.19	1085	662.5	2.56 @ 3.0°	1014	427.8	3.97	823
31	565.8	3.00	1084	706.0	2.40	1013	455.4	3.73	822
32	601.6	2.82	1083	751.0	2.26	1012	483.9	3.51	820
33	638.5	2.66	1081	797.4	2.13	1012	513.3	3.31	819
34	676.5	2.51	1080	845.2	2.01	1011	543.6	3.12	818
35	715.7	2.37	1079	615.6	2.76 @ 2.0°	1363	574.9	2.95	817
36	756.0	2.24	1079	650.2	2.61	1362	607.0	2.80	816
37	797.5	2.13	1078	685.7	2.47	1361	640.0	2.65	815
38	840.1	2.02	1077	722.2	2.35	1360	674.0	2.52	814
39	883.8	1.92	1076	759.7	2.23	1359	708.8	2.39	813
40	928.7	1.83	1076	798.1	2.13	1358	744.6	2.28	813
41	974.7	1.74	1075	837.6	2.03	1357	781.2	2.17	812
42	1022	1.66	1075	513.7	3.30 @ 1.0°	2159	818.8	2.07	811
43	1070	1.59	1074	537.6	3.16	2158	686.0	2.47 @ 4.0°	920
44	1120	1.52	1074	562.1	3.02	2157	717.3	2.37	919
45	1170	1.45	1073	587.1	2.89	2155	749.3	2.26	918
46	1222	1.39	1073	612.8	2.77	2154	782.1	2.17	918
47	1275	1.33	1072	639.0	2.66	2153	815.6	2.08	917
48	1329	1.28	1072	665.7	2.55	2152	654.1	2.59 @ 3.0°	1105
49	1384	1.23	1072	693.0	2.45	2151	680.8	2.49	1104
50	1440	1.18	1072	720.9	2.35	2150	708.1	2.40	1103
51	1497	1.13	1071	749.3	2.26	2149	735.8	2.31	1103
52	1556	1.09	1071	778.3	2.18	2148	764.2	2.22	1102
53	1615	1.05	1071	807.9	2.10	2148	793.1	2.14	1101
54	1676	1.01	1070	838.0	2.02	2147	822.5	2.06	1101
55	1738	0.98	1070	868.7	1.95	2146	577.2	2.94 @ 2.0°	1513

Таблица 3. Расчеты рабочих режимов АэроГЭС при разных AR в зависимости от изменения скорости ветра с автоматическим управлением углом атаки для поддержания достаточного запаса прочности (> 2) и при ограничении сноса половиной длины «троса» ($L_t/2 = 1500$ м).

Следующий график (фиг. 4), построенный по данным таблицы 3, показывает, что практически при любом конструктивном исполнении АэроГЭС (любом AR) всегда можно подобрать такие углы атаки, которые обеспечат надежную и устойчивую работу АэроГЭС при любых скоростях ветра, вплоть до ураганных ветров, при приемлемых величинах сноса. К сожалению, график имеет ступенчатую форму, так как я не имел достаточного объема данных для более точной аппроксимации аэродинамических коэффициентов, что позволило бы уменьшить шаг изменения угла атаки и сгладило бы график, однако условно вид таких сглаженных графиков можно легко представить, если мысленно соединить крайние нижние точки соответствующих ступенек, в которых достигался критический расчетный запас прочности, равный 2.



Фиг. 4. Сносы АэроГЭС в зависимости от скорости ветра v при изменяемых углах атаки α .

Из графика видно, что по крайней мере до ветров ураганного уровня (т. е. < 30 м/с) АэроГЭС может поставлять энергию и воду с незначительными сносами (т. е. практически без потери гидравлического напора и энергетического потенциала). При этом надо учитывать, что производительность по воде при сепарации облаков очевидно прямо пропорциональна как скорости ветра, так и вертикальной проекции кайтовых поверхностей 5. Если исходно эта проекция при начальном угле атаки $\sim 15^\circ$ полностью перекрывала ветровой поток, то с уменьшением угла атаки эта проекция будет уменьшаться. Это ставит задачу дальнейшей оптимизации по ТЭ показателям, но из приведенных примеров очевидное преимущество имеет АэроГЭС с $AR = 1 : 5$ (что соответствует проекту ^[5]), так как исходный угол атаки перекрывает практически весь диапазон скоростей наиболее вероятных ветров.

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

- [1] Халепский Б.И. [Механика привязного воздухоплавания](#), 1945
- [2] Rajani, A., Pant, R. S., Sudhakar, K., “[Dynamic Stability Analysis of a Tethered Aerostat](#)”, AIAA Journal of Aircraft, Volume 47, Number 5, September – October 2010
- [3] P. Bilaye, V. N. Gawande, U. B. Desai, A. A. Raina, R. S. Pant, «[Low Cost Wireless Internet Access for Rural Areas using Tethered Aerostats](#)», 2008 IEEE Region 10 Colloquium and the Third International Conference on Industrial and Information Systems, Kharagpur, INDIA December 8 -10, 2008
- [4] Akshay A. Kanoria, Rajkumar S. Pant, «[Winged Aerostat Systems for Better Station Keeping for Aerial Surveillance](#)», 2011 International Conference on Mechanical and Aerospace Engineering (CMAE 2011)
- [5] Байбиков А.С. «[Пример расчета для пилотной установки мощностью 27 кВт](#)»
- [5] Байбиков А.С. «[Пример расчета для пилотной установки мощностью 27 кВт](#)»
- [1] Халепский Б.И. [Механика привязного воздухоплавания](#), 1945
- [1] Халепский Б.И. [Механика привязного воздухоплавания](#), 1945
- [6] Ludwig Prandtl «[Ergebnisse der Aerodynamischen Versuchsanstalt zu Göttingen](#)», 1923
- [7] D. Cebrian, J. Ortega-Casanova, and R. Fernandez-Feria «[Lift and drag characteristics of a cascade of flat plates in a configuration of interest for a tidal current energy converter: Numerical simulations analysis](#)», J. Renewable Sustainable Energy 5, 043114 (2013)
- [8] Kunihiro Taira, William B. Dickson, Tim Colonius, Michael H. Dickinson, Clarence W. Rowley «[Unsteadiness in Flow over a Flat Plate at Angle-of-Attack at Low Reynolds Numbers](#)»
- [9] A. Kragten, «[Aerodynamic characteristics of rectangular flat plates with aspect ratios 5 : 1, 2 : 1, 1 : 1, 1 : 2 and 1 : 5 for use as windmill vane blades](#)»
- [2] Rajani, A., Pant, R. S., Sudhakar, K., “[Dynamic Stability Analysis of a Tethered Aerostat](#)”, AIAA Journal of Aircraft, Volume 47, Number 5, September – October 2010
- [1] Халепский Б.И. [Механика привязного воздухоплавания](#), 1945
- [1] Халепский Б.И. [Механика привязного воздухоплавания](#), 1945
- [5] Байбиков А.С. «[Пример расчета для пилотной установки мощностью 27 кВт](#)»
- [1] Халепский Б.И. [Механика привязного воздухоплавания](#), 1945
- [5] Байбиков А.С. «[Пример расчета для пилотной установки мощностью 27 кВт](#)»