

# Оптимизация сети [АэроГЭС](#)

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

## Тезисы

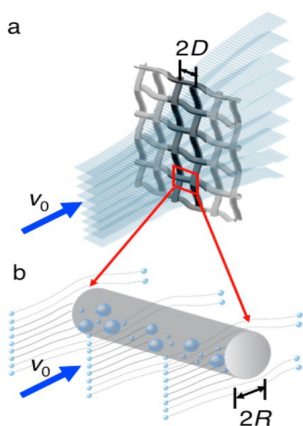
Поверхности для приема влаги АэроГЭС (кайты, паруса, сети) должны выполнять сразу несколько противоречивых функций, причем эти функции могут различаться для различных конструкций АэроГЭС. В данной статье я продолжу рассматривать кайтовую конструкцию, которая обсуждалась в предыдущей статье о сносе АэроГЭС <sup>[1]</sup>, где расчеты конструкции основывались на аэродинамических коэффициентах, полученных экспериментально для обтекания плоской непроницаемой пластины. Так как такая поверхность практически неспособна принимать капельную влагу, то существует задача найти некий оптимальный уровень проницаемости, который обеспечит как приемлемый захват капель, так и все еще достаточно хорошую аэродинамику, для создания работоспособного прототипа АэроГЭС.

## Моделирование сети

Так как у меня нет возможности проводить лабораторные эксперименты, то я должен в первую очередь найти и обосновать возможность теоретического и численного моделирования подобной задачи. Я буду методологически отталкиваться от известных исследований по оптимизации сеток для сбора тумана <sup>[2][3]</sup>, выполненных в Массачусетском Институте Технологии (МИТ), а также от предыдущих полевых исследований по эффективности существующих сеток для сбора тумана <sup>[4][5][6]</sup>.

Таким образом данная работа будет разбита на несколько этапов:

1. подбор оптимальных параметров численного моделирования (размерность, точность) для достаточной корреляции с исследованиями МИТ <sup>[2][3]</sup>.
2. анализ результатов на соответствие полевым испытаниям <sup>[4][5][6]</sup> и объяснение причин возможных несоответствий.
3. получение данных численного моделирования по аэродинамике и эффективности предполагаемых кайтовых поверхностей при варьировании параметров (толщине нити, шаге плетения, угле атаки, точности) и оптимизация по выбранному критерию.
4. пример расчета реальной ткани для кайта с функцией сбора капельной влаги.



Для численного моделирования была использована великолепная CFD программа [XFlow](#). Ветровой туннель, расположение и размер сетки соответствуют лабораторной установке МИТ, описанной и показанной в <sup>[2][3]</sup>. Исходные расчеты проводились для тех же условий: скорости потока  $v = 2 \text{ м/с}$  с каплями тумана радиусом  $r = 3 \text{ мкм}$ . Вся геометрия сетки описывалась с использованием размерных и безразмерных параметров, принятых в работе МИТ и показанных на рисунке. Оттуда же взяты параметры тестируемых сеток.

Пример трехмерного расчета для самой тонкой сетки  $D^* = (R+D)/R \sim 3.5$ ,  $R^* = r/R \sim 0.024$  ( $\eta \sim 12 \%$ ), что соответствует радиусу нити  $R = 127 \text{ мкм}$  и шагу плетения  $S = 2(R+D) = 889 \text{ мкм}$ , можно посмотреть на этом [видео](#), которое воспроизводит движение капель через сетку.

Результаты некоторых численных трехмерных расчетов можно посмотреть в следующей таблице, где приведен полученный CFD моделированием аэродинамический коэффициент ( $C_x$ ) и доля капель, прошедших сетку (P, passed).

$C_x$	P, %	$\eta$ , %	X, %	$\eta / X$	Condition
3.012	85.88	11.14	14.12	0.79	<a href="#">3D0(156)O</a>
3.012	90.16	11.14	9.84	1.13	<a href="#">3D0(156)[]</a>
3.995	88.40	11.14	11.60	0.96	<a href="#">3D2(19)O</a>
3.995	91.24	11.14	8.76	1.27	<a href="#">3D2(19)[]</a>

Так как в XFlow не предусмотрен механизм прилипания частиц, то я условно считал, что капля «прилипла» к сетке, если ее скорость стала меньше 1 мкм/с (при этом в данной модели такая капля «выкидывалась» из потока огромным боковым ускорением). Соответственно, доля «прилипших» капель (X) для трехмерной численной модели равна  $(100 - P)$ , а величина расхождения с расчетной эффективностью ( $\eta$ ) по модели МИТ, показана соотношением ( $\eta/X$ ).

Условия расчетов в таблице показаны кодом, где 3D обозначает трехмерность, последующая цифра (здесь 0 или 2) — двойное предельное разрешение расчетной сетки (здесь, соответственно, 156 или 19 мкм) и тип «излучателя» капель: круг (O) для экспериментальной модели МИТ или квадрат ([]) для расчетной модели МИТ. Данный код имеет сноску на соответствующий рисунок (снимок экрана XFlow для данного расчета).

Из данной таблицы видно, что такое численное моделирование дает результаты, вполне согласующиеся с расчетными и экспериментальными данными исследования МИТ <sup>[2][3]</sup>.

К сожалению, трехмерные расчеты на моем домашнем компьютере могут занимать недели, что делает невозможным проведение целевой оптимизации в приемлемые сроки. Поэтому дальнейшие численные эксперименты я проводил, используя двумерное приближение.

Теперь можно перейти к анализу влияния точности расчета на полученные результаты. В следующей таблице представлены двумерные расчеты для той же сетки МИТ с разными разрешениями расчетной сетки. Следует заметить, что доля «прилипших» капель (исходно в модели одномерная) здесь дополнительно умножается на геометрический коэффициент двухмерности  $2(1-1/(2D^*))$ , так же как и коэффициент SC в исходной работе МИТ <sup>[2]</sup>.

R, $\mu\text{m}$	S, $\mu\text{m}$	$C_x$	P, %	R*	D*	SC	$C_0$	$\eta_a$	St	$\eta_a$	$\eta$ , %	X, %	$\eta/X$	Condition
127	889	1.342	92.80	0.024	3.50	0.49	2.24	0.21	1.85	0.54	11.14	12.34	0.90	<a href="#">HD0(156)</a>
127	889	1.052	93.20	0.024	3.50	0.49	2.24	0.21	1.85	0.54	11.14	11.66	0.96	<a href="#">HD1(78)</a>
127	889	1.012	94.00	0.024	3.50	0.49	2.24	0.21	1.85	0.54	11.14	10.29	1.08	<a href="#">HD2(19)</a>
127	889	0.917	94.20	0.024	3.50	0.49	2.24	0.21	1.85	0.54	11.14	9.94	1.12	<a href="#">HD4(5)</a>

Видно, что разрешение расчетной сетки для данной сетки МИТ не сильно влияет на захват капель, и можно ограничиться минимальной точностью для ускорения расчетов. Проверим также, как влияет точность на расчеты других сеток МИТ.

R, $\mu\text{m}$	S, $\mu\text{m}$	$C_x$	P, %	R*	D*	SC	$C_0$	$\eta_a$	St	$\eta_a$	$\eta$ , %	X, %	$\eta/X$	Condition
127	889	1.342	92.80	0.024	3.50	0.49	2.24	0.21	1.85	0.54	11.14	12.34	0.90	<a href="#">HD0(156)</a>
172	1204	1.083	94.30	0.017	3.50	0.49	2.24	0.21	1.37	0.47	9.58	9.77	0.98	<a href="#">HD0(156)</a>
229	1603	0.879	94.40	0.013	3.50	0.49	2.24	0.21	1.03	0.40	8.14	9.60	0.85	<a href="#">HD0(156)</a>
292	2044	0.855	95.30	0.010	3.50	0.49	2.24	0.21	0.81	0.34	6.98	8.06	0.87	<a href="#">HD0(156)</a>
445	3115	0.581	96.10	0.007	3.50	0.49	2.24	0.21	0.53	0.25	5.18	6.69	0.78	<a href="#">HD0(156)</a>

R, $\mu\text{m}$	S, $\mu\text{m}$	C <sub>x</sub>	P, %	R*	D*	SC	C <sub>0</sub>	$\eta_a$	St	$\eta_a$	$\eta, \%$	X, %	$\eta/X$	Condition
127	889	1.052	93.20	0.024	3.50	0.49	2.24	0.21	1.85	0.54	11.14	11.66	0.96	<a href="#">HD1(78)</a>
172	1204	0.870	95.70	0.017	3.50	0.49	2.24	0.21	1.37	0.47	9.58	7.37	1.30	<a href="#">HD1(78)</a>
229	1603	0.762	98.20	0.013	3.50	0.49	2.24	0.21	1.03	0.40	8.14	3.09	2.64	<a href="#">HD1(78)</a>
292	2044	0.709	97.60	0.010	3.50	0.49	2.24	0.21	0.81	0.34	6.98	4.11	1.70	<a href="#">HD1(78)</a>
445	3115	0.557	99.70	0.007	3.50	0.49	2.24	0.21	0.53	0.25	5.18	0.51	10.08	<a href="#">HD1(78)</a>

R, $\mu\text{m}$	S, $\mu\text{m}$	C <sub>x</sub>	P, %	R*	D*	SC	C <sub>0</sub>	$\eta_a$	St	$\eta_a$	$\eta, \%$	X, %	$\eta/X$	Condition
127	889	1.012	94.00	0.024	3.50	0.49	2.24	0.21	1.85	0.54	11.14	10.29	1.08	<a href="#">HD2(19)</a>
172	1204	0.758	97.10	0.017	3.50	0.49	2.24	0.21	1.37	0.47	9.58	4.97	1.93	<a href="#">HD2(19)</a>
229	1603	0.688	98.30	0.013	3.50	0.49	2.24	0.21	1.03	0.40	8.14	2.91	2.79	<a href="#">HD2(19)</a>
292	2044	0.641	99.10	0.010	3.50	0.49	2.24	0.21	0.81	0.34	6.98	1.54	4.52	<a href="#">HD2(19)</a>
445	3115	0.518	99.70	0.007	3.50	0.49	2.24	0.21	0.53	0.25	5.18	0.51	10.08	<a href="#">HD2(19)</a>

Как ни удивительно, но из таблиц следует, что слишком высокое разрешение расчетной сетки приводит к увеличению ошибки для разряженных сеток МИТ. Наиболее адекватные расчеты для всех сеток МИТ соответствуют минимальному использованному разрешению расчетной сетки, примерно соответствующему геометрии самой тонкой сетки МИТ. Физически это можно интерпретировать как то, что поверхность реальных сеток МИТ имеет неровности того же порядка (что не учитывается при моделировании «идеальных» поверхностей сеток с более высоким разрешением).

Аналогичные расчеты для сеток с Raschel плетением по параметрам МИТ  $D^* \sim 5.1$ ,  $R^* \sim 0.005$  ( $\eta \sim 4.8 \%$ ), используемых в полевых условиях волонтерами [FogQuest](#), представлены в следующей таблице. Учтите, что так как такие сети имеют преимущественно линейную (решетчатую), а не перекрестную (плетеную) геометрию, то доля «прилипших» капель здесь **не умножается** на геометрический коэффициент двухмерности  $2(1-1/(2D^*))$ .

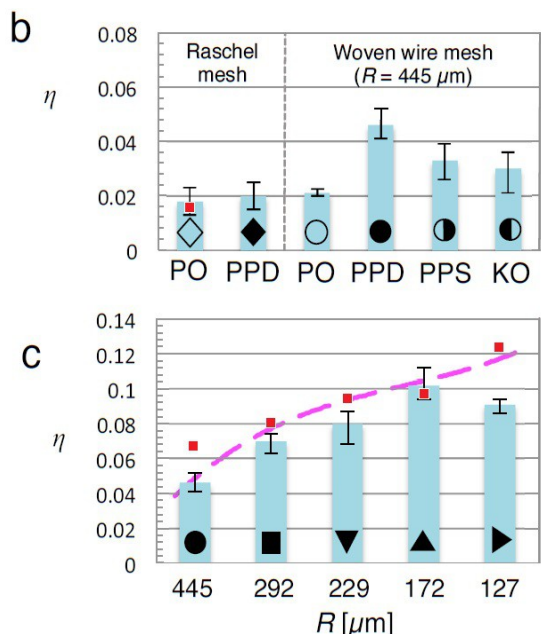
R, $\mu\text{m}$	S, $\mu\text{m}$	C <sub>x</sub>	P, %	R*	D*	SC	C <sub>0</sub>	$\eta_a$	St	$\eta_a$	$\eta, \%$	X, %	$\eta/X$	Condition
600	6120	0.351	98.50	0.005	5.10	0.35	1.09	0.18	0.39	0.20	3.60	1.50	2.40	<a href="#">HD0(156)</a>
600	3060	0.795	97.20	0.005	2.55	0.63	5.37	0.20	0.39	0.20	4.02	2.80	1.44	<a href="#">HD0(156)</a>

Первая строка соответствует одинарной сетке, используемой в экспериментах МИТ, и значение полученной эффективности для нее значительно ближе к экспериментальному значению, чем соответствующий расчет по методике МИТ. Можно предположить, что сильное расхождение с расчетом МИТ может быть вызвано некорректным использованием в параметре SC по методике МИТ квадратной геометрии сетки, тогда как плетение сетки в данном случае вытянутое треугольное, более близкое к одномерной решетке. Вторая строка соответствует двойной сетке, которая как раз и используется реально в полевых условиях и для которой значения лучше соответствуют расчету МИТ, так как перекрещивание двух сеток треугольного плетения уже гораздо ближе к квадратному плетению в ветровой проекции.

Таким образом использование двумерного численного CFD моделирования с величиной расчетной ячейки  $\sim 50\text{-}80$  мкм дает вполне адекватное описание экспериментальных и расчетных данных, представленных в исследованиях МИТ <sup>[2][3]</sup>.

## Анализ полевых испытаний

Рассмотрим сначала соответствие расчетов и экспериментов в исходной работе МИТ <sup>[2][3]</sup>. На данном графике, взят из <sup>[2]</sup>, я разместил и результаты численного CFD моделирования для тех же условий (красный квадрат). На рисунке видно, что CFD моделирование дает близкие значения и подобное поведение графика.



В то же время представляется, что в работе МИТ прогнозируемая расчетная эффективность завышена по сравнению с экспериментальными данными. Так для самой тонкой сетки  $D^* \sim 3.5$ ,  $R^* \sim 0.024$  указана эффективность  $\eta \sim 12\%$ , хотя реально расчет по методике МИТ дает величину  $\sim 11.14\%$ . Для одинарной сетки с Raschel плетением  $D^* \sim 5.1$ ,  $R^* \sim 0.005$  указана эффективность  $\eta \sim 4.8\%$ , хотя реально расчет по их же методике дает только  $\sim 3.6\%$ , а эксперимент на данном графике вообще дает величину  $\sim 1.7\%$ . Еще большее различие представлено на графике S6 в работе <sup>[3]</sup>. Там предсказанная эффективность для сети с  $R = 172$  мкм для нашего расчетного режима 3 равна  $\sim 14\%$ , тогда как расчет по методике МИТ дает  $\sim 9.58\%$  (и  $\sim 10\%$  показывает эксперимент), а для двойной сетки с Raschel плетением предсказанная эффективность  $\sim 6\%$ , тогда как расчет дает  $\sim 4\%$ .

Рассмотрим теперь аналогичные расчеты и CFD моделирование для более важного для АэроГЭС режима **облака** со значениями скорости потока  $v = 8$  м/с с каплями радиусом  $r = 6$  мкм. На уже упомянутом графике S6 в работе <sup>[3]</sup> предсказанная эффективность для сети с  $R = 172$  мкм для этого расчетного режима 6 равна  $\sim 21\%$  (хотя по расчету  $\sim 19.21\%$ ), а двойной сетки с Raschel плетением  $\sim 16\%$ . Мои расчеты представлены в следующей таблице.

R, μm	S, μm	C <sub>x</sub>	P, %	R*	D*	SC	C <sub>0</sub>	η <sub>a</sub>	St	η <sub>a</sub>	η, %	X, %	η/X	Condition
127	889	1.121	74.80	0.047	3.50	0.49	2.24	0.21	29.64	0.95	19.55	43.20	0.45	<a href="#">HD0(156)</a>
172	1204	0.893	77.40	0.035	3.50	0.49	2.24	0.21	21.89	0.93	19.21	38.74	0.50	<a href="#">HD0(156)</a>
229	1603	0.739	79.30	0.026	3.50	0.49	2.24	0.21	16.44	0.91	18.79	35.49	0.53	<a href="#">HD0(156)</a>
292	2044	0.802	82.90	0.021	3.50	0.49	2.24	0.21	12.89	0.89	18.35	29.31	0.63	<a href="#">HD0(156)</a>
445	3115	0.536	80.00	0.013	3.50	0.49	2.24	0.21	8.46	0.84	17.36	34.29	0.51	<a href="#">HD0(156)</a>
600	6120	0.351	90.50	0.010	5.10	0.35	1.09	0.18	6.27	0.80	14.41	9.50	1.52	<a href="#">HD0(156)</a>
600	3060	0.775	78.80	0.010	2.55	0.63	5.37	0.20	6.27	0.80	16.09	21.20	0.76	<a href="#">HD0(156)</a>

Эти же расчеты проводились для других разрешений расчетной сетки, но результат по эффективности оставался близким к представленному. Из таблицы видно, что в основном эффективность для сеток МИТ по нашему моделированию возросла примерно в два раза по сравнению с расчетом по методике МИТ.

Проведем сравнение CFD моделирования и расчета по методике МИТ с данными для двойной сетки с Raschel плетением, представленным в работах <sup>[4][5][6]</sup>, которые должны коррелировать с реальными значениями, полученными в полевых условиях.

В работе [4] мы можем найти только оценки для максимального аэродинамического коэффициента эффективности  $\sim 20-24.5\%$ , что вполне коррелирует как с параметром  $\eta_a$  в расчетах по методике МИТ, так с эффективностью при CFD моделировании двойной сетки с Raschel плетением для последних рассмотренных условий облака или высокогорного тумана.

В работе [5] мы можем найти массу интересных данных по высокогорным туманам, но к сожалению они не сопоставлены с условиями по LWC и скорости ветра. Единственное что важно для идеи АэроГЭС это приведенные максимальные значения 160-300 л/м2/сутки, которые позволяют оценить уровень сборов для расчетов ТЭО [7].

Наиболее важные данные предоставляет работа [6]. Там приведены данные реальных измерений необходимых величин: LWC, скорости ветра, измеренной производительности, размеров капель и их концентрации. Эти данные мы можем использовать в наших расчетах по методике МИТ или в CFD моделировании, чтобы продемонстрировать пригодность такого численного моделирования. Сопоставляя в [6] таблицы 1 и 2, мы можем получить следующую таблицу исходных данных.

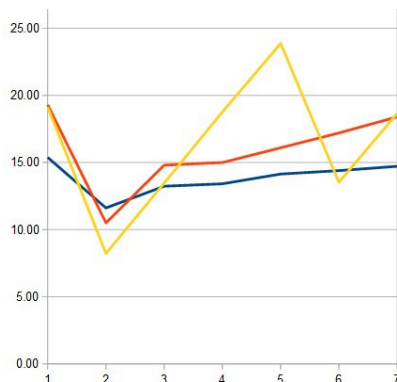
LWC front, g/m <sup>3</sup>	Wind, (V), m/s	Flow rate measured, cm <sup>3</sup> /s (or g/s)	Real effectiveness (E), %	MVD, (D), μm	Concentration, cm <sup>-3</sup>	Recalculated LWC, g/m <sup>3</sup>
0.31	6.50	18.50	19.13	12.0	231	0.21
0.68	1.90	5.10	8.22	14.4	477	0.75
0.72	2.60	12.10	13.47	14.6	435	0.71
0.73	2.60	17.10	18.77	14.9	419	0.73
0.66	3.20	24.20	23.87	14.6	408	0.66
0.73	3.10	14.70	13.53	15.3	384	0.72
0.68	3.40	20.70	18.65	15.2	366	0.67

Результаты такого моделирования по указанным скоростям ветра (V), размерам капель (D) и реальной эффективности (E) для двойной сетки Raschel представлены в следующей таблице:

V, m/s	D, μm	C <sub>x</sub>	P, %	R*	D*	SC	C <sub>0</sub>	η <sub>a</sub>	St	η <sub>a</sub>	η, %	X, %	E, %	Condition
6.50	12.0	0.793	80.70	0.010	2.55	0.63	5.37	0.20	5.10	0.76	15.38	19.30	19.13	HD0(156)
1.90	14.4	0.783	89.50	0.012	2.55	0.63	5.37	0.20	2.15	0.58	11.62	10.50	8.22	HD0(156)
2.60	14.6	0.817	85.20	0.012	2.55	0.63	5.37	0.20	3.02	0.66	13.23	14.80	13.47	HD0(156)
2.60	14.9	0.817	85.00	0.012	2.55	0.63	5.37	0.20	3.14	0.67	13.42	15.00	18.77	HD0(156)
3.20	14.6	0.845	83.90	0.012	2.55	0.63	5.37	0.20	3.72	0.70	14.14	16.10	23.87	HD0(156)
3.10	15.3	0.819	82.80	0.013	2.55	0.63	5.37	0.20	3.95	0.72	14.40	17.20	13.53	HD0(156)
3.40	15.2	0.813	81.60	0.013	2.55	0.63	5.37	0.20	4.28	0.73	14.72	18.40	18.65	HD0(156)

На графике хорошо видно, что измеренные значения реальной эффективности сеток в основном соответствуют как расчетам по методике МИТ, так и CFD моделированию. Для нас это означает, что предложенный метод CFD моделирования может быть вполне применим и для других сеток или тканей при создании АэроГЭС кайтового типа и расчета их аэродинамики и эффективности.

Необходимо сделать несколько дополнительных замечаний по анализу данных в работе [6]. Так, если пересчитать LWC перед



сеткой по указанным интегральным размерам капель и их концентрации, то можно заметить серьезное несовпадение с исходным значением LWC для некоторых измерений. Такие несовпадения показаны цветными маркерами в таблице исходных данных выше.

Другое важное предположение связано с огромной (~ 2.9 раза) и так и не объясненной ошибкой между расчетной эффективностью, полученной по прямым измерениям LWC перед и позади сетки, и реальной эффективностью, полученной по замеру собранной воды. Так как численное моделирование показало вполне достоверные значения для реальной эффективности, то я рискну предположить, что именно замер LWC позади сетки и внес эту огромную системную ошибку. Я не могу точно утверждать, но могу предположить, что прибор FSSP, созданный для подсчета и анализа спектра частиц в равномерном потоке или стоячем воздухе, мог ошибочно сильно уменьшить число частиц за сеткой из-за его специфической конструкции. Всасывание воздуха в прибор для подсчета частиц не рассчитано на огромную турбулентность, которая образуется за сеткой (см. любой пример CFD моделирования для двойной сетки). Эта турбулентность обозначает, что капли воды, прошедшие сетку, двигаются с большими поперечными скоростями и трубка прибора, выставленная по основному потоку, реально получает лишь малую долю частиц из этого скошенного потока, который входя под углом фактически значительно уменьшает свое поперечное сечение, а кроме того капли с большей вероятностью могут выпасть на стенку этой трубки и не попасть в измеряемый поток. Косвенно это подтверждается и тем, что измеренная эффективность (а фактически, ошибка) по данным таблицы 1 тем больше, чем короче было измерение (поток не успевал стабилизироваться), и чем большая скорость была у исходного потока (а следовательно, чем большая турбулентность была у потока за сеткой).

Так что эффективность сеток ~ 50-70 %, кочующая затем из одной публикации в другую, реально не соответствует действительности для данных условий.

## Аэродинамика и эффективность кайта

Рассмотрим теперь нашу основную задачу — моделирование кайтовых поверхностей и их оптимизацию по условиям аэродинамики и эффективности. Очевидно, что я не претендую при этом на решение этой задачи, а лишь демонстрирую методику, которую можно будет использовать для дальнейших исследований. Рассмотрим наиболее характерный для кайтов угол атаки (~ 15°) и будем варьировать безразмерные параметры сетки R\* и D\* при типичных условиях нижней облачности или высокогорного тумана  $v = 8 \text{ м/с}$  и  $r = 6 \text{ мкм}$ . При этом условную эффективность по захвату капель будем оценивать от условного источника с той же ветровой проекцией, что и указанная наклонная сетка.

R*	D*	R, $\mu\text{m}$	S, $\mu\text{m}$	C <sub>x</sub>	C <sub>y</sub>	P, %	X, %	L/D	A, °	X*(L/D)	Condition
0.10	2.500	60.00	300.00	0.312	0.104	49.60	50.40	0.33	18.43	16.80	<a href="#">HD1(78)</a>
0.10	2.000	60.00	240.00	0.294	0.316	57.60	42.40	1.07	47.07	45.57	<a href="#">HD1(78)</a>
0.10	1.875	60.00	225.00	0.278	0.395	62.40	37.60	1.42	54.86	53.42	<a href="#">HD1(78)</a>
0.10	1.750	60.00	210.00	0.261	0.522	71.20	28.80	2.00	63.43	57.60	<a href="#">HD1(78)</a>
0.10	1.625	60.00	195.00	0.270	0.736	79.50	20.50	2.73	69.85	55.88	<a href="#">HD1(78)</a>
0.10	1.500	60.00	180.00	0.334	1.014	81.80	18.20	3.04	71.77	55.25	<a href="#">HD1(78)</a>
0.10	1.250	60.00	150.00	0.261	0.865	90.70	9.30	3.31	73.21	30.82	<a href="#">HD1(78)</a>
0.10	1.000	60.00	120.00	0.208	0.743	99.00	1.00	3.57	74.36	3.57	<a href="#">HD1(78)</a>

Здесь  $(L/D) = C_y/C_x$  – аэродинамическое качество, которое характеризует соотношение подъемной силы и сноса кайта, а также угол его наклона  $(A) = \text{atan}(L/D)$ .

Следует оговорить, что двумерное моделирование принципиально не может адекватно описать аэродинамику такой сетчатой поверхности, т. е. аэродинамические коэффициенты должны проверяться как трехмерным моделированием, так и экспериментально. То же самое касается и захвата капель, так как непонятно, какой геометрический множитель следует здесь использовать. Тем не менее, очевидно, что реальные величины будут пропорциональны (или, по крайней мере, коррелировать) полученным нами при этом моделировании величинам. Потому мы вполне можем использовать их в наших критериях оптимизации.

Критерии оптимизации зависят от тех задач, которые наша АэроГЭС должна решать, и будут, конечно, различны для, например, энергетической установки или для средства спасения для добычи воды на основе кайта. В данном случае, я использовал в качестве примера критерия оптимизации величину  $X^*(L/D)$ , которая должна условно максимизировать добычу воды с максимальной высоты при минимальном сносе. Хорошо видно, что критерий имеет явный максимум для данной геометрии. Меняя геометрию, мы можем продолжить оптимизацию.

R*	D*	R, $\mu\text{m}$	S, $\mu\text{m}$	$C_x$	$C_y$	P, %	X, %	L/D	A, °	$X^*(L/D)$	Condition
0.01	2.500	600.00	3000.00	0.348	0.125	36.10	63.90	0.36	19.76	22.95	<a href="#">HD0(156)</a>
0.01	2.000	600.00	2400.00	0.356	0.157	47.00	53.00	0.44	23.80	23.37	<a href="#">HD0(156)</a>
0.01	1.750	600.00	2100.00	0.376	0.106	50.00	50.00	0.28	15.74	14.10	<a href="#">HD0(156)</a>
0.01	1.500	600.00	1800.00	0.399	0.063	51.90	48.10	0.16	8.97	7.59	<a href="#">HD0(156)</a>
0.01	1.375	600.00	1650.00	0.378	0.247	51.40	48.60	0.65	33.16	31.76	<a href="#">HD0(156)</a>
0.01	1.250	600.00	1500.00	0.300	0.481	70.20	29.80	1.60	58.05	47.78	<a href="#">HD0(156)</a>
0.01	1.125	600.00	1350.00	0.331	1.106	93.20	6.80	3.34	73.34	22.72	<a href="#">HD0(156)</a>
0.01	1.000	600.00	1200.00	0.290	0.995	96.20	3.80	3.43	73.75	13.04	<a href="#">HD0(156)</a>

R*	D*	R, $\mu\text{m}$	S, $\mu\text{m}$	$C_x$	$C_y$	P, %	X, %	L/D	A, °	$X^*(L/D)$	Condition
0.05	2.500	120.00	600.00	0.327	0.097	47.00	53.00	0.30	16.52	15.72	<a href="#">HD0(156)</a>
0.05	2.000	120.00	480.00	0.307	0.270	55.30	44.70	0.88	41.33	39.31	<a href="#">HD0(156)</a>
0.05	1.750	120.00	420.00	0.273	0.481	69.20	30.80	1.76	60.42	54.27	<a href="#">HD0(156)</a>
0.05	1.625	120.00	390.00	0.271	0.704	77.70	22.30	2.60	68.95	57.93	<a href="#">HD0(156)</a>
0.05	1.500	120.00	360.00	0.299	0.883	82.10	17.90	2.95	71.29	52.86	<a href="#">HD0(156)</a>
0.05	1.375	120.00	330.00	0.256	0.757	85.40	14.60	2.96	71.32	43.17	<a href="#">HD0(156)</a>
0.05	1.250	120.00	300.00	0.324	1.118	89.60	10.40	3.45	73.84	35.89	<a href="#">HD0(156)</a>
0.05	1.000	120.00	240.00	0.254	0.859	98.40	1.60	3.38	73.53	5.41	<a href="#">HD0(156)</a>

R*	D*	R, $\mu\text{m}$	S, $\mu\text{m}$	$C_x$	$C_y$	P, %	X, %	L/D	A, °	$X^*(L/D)$	Condition
0.05	2.500	120.00	600.00	0.328	0.071	44.80	55.20	0.22	12.21	11.95	<a href="#">HD1(78)</a>
0.05	2.000	120.00	480.00	0.342	0.074	51.10	48.90	0.22	12.21	10.58	<a href="#">HD1(78)</a>
0.05	1.750	120.00	420.00	0.313	0.223	53.30	46.70	0.71	35.47	33.27	<a href="#">HD1(78)</a>
0.05	1.625	120.00	390.00	0.297	0.328	59.30	40.70	1.10	47.84	44.95	<a href="#">HD1(78)</a>
0.05	1.500	120.00	360.00	0.267	0.463	68.50	31.50	1.73	60.03	54.62	<a href="#">HD1(78)</a>
0.05	1.375	120.00	330.00	0.276	0.827	85.10	14.90	3.00	71.54	44.65	<a href="#">HD1(78)</a>
0.05	1.250	120.00	300.00	0.297	1.008	90.20	9.80	3.39	73.58	33.26	<a href="#">HD1(78)</a>
0.05	1.000	120.00	240.00	0.196	0.649	98.70	1.30	3.31	73.20	4.30	<a href="#">HD1(78)</a>

R*	D*	R, $\mu\text{m}$	S, $\mu\text{m}$	C <sub>x</sub>	C <sub>y</sub>	P, %	X, %	L/D	A, °	X*(L/D)	Condition
0.05	2.500	120.00	600.00	0.314	0.109	41.80	58.20	0.35	19.14	20.20	<a href="#">HD2(19)</a>
0.05	2.000	120.00	480.00	0.352	0.073	45.80	54.20	0.21	11.72	11.24	<a href="#">HD2(19)</a>
0.05	1.750	120.00	420.00	0.340	0.062	49.30	50.70	0.18	10.33	9.25	<a href="#">HD2(19)</a>
0.05	1.625	120.00	390.00	0.327	0.128	51.60	48.40	0.39	21.38	18.95	<a href="#">HD2(19)</a>
0.05	1.500	120.00	360.00	0.322	0.258	53.80	46.20	0.80	38.70	37.02	<a href="#">HD2(19)</a>
0.05	1.375	120.00	330.00	0.297	0.494	65.10	34.90	1.66	58.99	58.05	<a href="#">HD2(19)</a>
0.05	1.250	120.00	300.00	0.277	0.771	81.90	18.10	2.78	70.24	50.38	<a href="#">HD2(19)</a>
0.05	1.000	120.00	240.00	0.218	0.771	98.40	1.60	3.54	74.21	5.66	<a href="#">HD2(19)</a>

Видно, что значения C<sub>y</sub> и X также сильно зависят от точности расчетов. При этом сдвигается и условный оптимум целевой функции.

Интересно, что последняя строчка в каждом таком расчете соответствует практически сплошной поверхности, примерно соответствующей плоской пластине с высоким AR, и можно сравнить эти полученные значения с экспериментальными данными из <sup>[1]</sup>.

Из всего вышеизложенного следует интересный практический вывод, который касается возможной модернизации высокогорных систем сбора тумана. 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%.

## **Расчет реальной ткани для кайта**

На практике мы часто не можем заказать ткань/сетку с заранее просчитанными оптимальными свойствами. Следовательно, мы должны наоборот подобрать уже существующую ткань с необходимыми характеристиками и выполнить для нее необходимые расчеты аэродинамики и эффективности.

Возьмем для примера кайтовую ткань:

### **TX-NY008 Taffeta 20D\*20D 400T 36-42 gsm 58/60" Nylon Rip-stop Waterproof fabric**

Для нас тут важно извлечь информацию о физических параметрах R и S, которые мы использовали раньше в нашем моделировании. Основные [параметры ткани](#) — это структура нити (yarn count = 20D\*20D) и плотность переплетения (thread count = 400TPI).



Первый параметр обозначает, что нить (пряжа) свита из двух волокон, каждое по 20 (Denier), что в пересчете дает диаметр волокна  $(20D/9000/1.15/0.7855)^{1/2} = 49.6$  мкм, где 1.15 г/см<sup>3</sup> – это плотность нейлона. Так как нить двойная, то условно ее радиус  $R \sim 50$  мкм.

Второй параметр обозначает полное число нитей (в обоих направлениях) в квадрате со стороной 1 дюйм (2.54 см). Соответственно шаг плетения  $S = 25400/(400T/2) = 127$  мкм.

В нашем случае надо заказывать ткань без пропитки и водоотталкивающего покрытия.

Итак, создав модель данной ткани, мы можем промоделировать ее аэродинамику и эффективность. Сначала проведем расчет с расчетной сеткой того же порядка (19 мкм).

t, sec	R, μm	S, μm	C <sub>x</sub>	C <sub>y</sub>	P, %	X, %	L/D	A, °	X*(L/D)	Condition
0.010	50.00	127.00	0.277	0.971	90.90	9.10	3.51	74.08	31.90	<a href="#">HD2(19)</a>

Увеличив точность до 5 мкм, мы получим расчет на целую неделю... Ниже представлены результаты расчета в динамике, через каждую msec.

t, sec	R, μm	S, μm	C <sub>x</sub>	C <sub>y</sub>	P, %	X, %	L/D	A, °	X*(L/D)	Condition
0.001	50.00	127.00	0.332	0.861	71.00	29.00	2.59	68.91	75.21	HD4(5)
0.002	50.00	127.00	0.324	0.864	72.00	28.00	2.67	69.44	74.67	HD4(5)
0.003	50.00	127.00	0.296	0.769	74.00	26.00	2.60	68.95	67.55	<a href="#">HD4(5)</a>
0.004	50.00	127.00	0.302	0.782	75.00	25.00	2.59	68.88	64.74	HD4(5)
0.005	50.00	127.00	0.328	0.858	71.00	29.00	2.62	69.08	75.86	HD4(5)
0.006	50.00	127.00	0.333	0.864	73.00	27.00	2.59	68.92	70.05	HD4(5)
0.007	50.00	127.00	0.287	0.708	76.00	24.00	2.47	67.93	59.21	HD4(5)
0.008	50.00	127.00	0.316	0.807	74.00	26.00	2.55	68.62	66.40	HD4(5)
0.009	50.00	127.00	0.326	0.829	74.00	26.00	2.54	68.53	66.12	HD4(5)
0.010	50.00	127.00	0.272	0.672	76.60	23.40	2.47	67.96	57.81	<a href="#">HD4(5)</a>

К сожалению, трехмерный расчет при этом на моем компьютере вообще невозможен, так что реальные величины можно будет получить только экспериментально, чтобы скоррелировать данное двумерное CFD моделирование.

Итак, я показал, что задача в принципе решается методами численного моделирования. Более того, на основе такого подхода можно создать высотные кайты с функцией сбора воды из низких облаков, что (в отличие от существующих систем сбора тумана) может универсально работать практически повсеместно на земле и решить одну из основных проблем третьего мира — нехватку качественной питьевой воды. Даже без энергетической функции АэроГЭС такие кайты можно использовать как аварийные средства спасения, а также для снабжения пресной водой многих необитаемых ныне территорий, например, небольших островов в океане, где нет высоких гор и отсутствуют собственные источники пресной воды.

## Приложение: CFD расчеты двойной сетки с Raschel плетением

V, m/s	Attack, a, °	C <sub>x</sub>	C <sub>y</sub> <sup>*</sup>	P, %	X, %	Condition
5.000	90.000	0.834	0.188	82.600	17.400	<a href="#">HD0(156)</a>
10.000	90.000	0.772	0.006	77.400	22.600	<a href="#">HD0(156)</a>
15.000	90.000	0.699	0.130	73.100	26.900	<a href="#">HD0(156)</a>
20.000	90.000	0.664	-0.007	71.900	28.100	<a href="#">HD0(156)</a>
5.000	15.000	0.364	0.227	53.800	46.200	<a href="#">HD0(156)</a>
10.000	15.000	0.320	0.101	15.400	84.600	<a href="#">HD0(156)</a>
15.000	15.000	0.424	-0.081	23.500	76.500	<a href="#">HD0(156)</a>
20.000	15.000	0.346	0.040	16.200	83.800	<a href="#">HD0(156)</a>
5.000	30.000	0.671	0.021	77.300	22.700	<a href="#">HD0(156)</a>
10.000	30.000	0.600	-0.225	74.700	25.300	<a href="#">HD0(156)</a>
15.000	30.000	0.511	0.197	66.400	33.600	<a href="#">HD0(156)</a>
20.000	30.000	0.531	-0.065	63.600	36.400	<a href="#">HD0(156)</a>
5.000	45.000	0.731	0.264	71.000	29.000	<a href="#">HD0(156)</a>
10.000	45.000	0.698	-0.135	60.100	39.900	<a href="#">HD0(156)</a>
15.000	45.000	0.551	0.139	52.900	47.100	<a href="#">HD0(156)</a>
20.000	45.000	0.609	-0.127	52.600	47.400	<a href="#">HD0(156)</a>
5.000	60.000	0.767	-0.028	88.800	11.200	<a href="#">HD0(156)</a>
10.000	60.000	0.687	-0.168	84.600	15.400	<a href="#">HD0(156)</a>
15.000	60.000	0.687	-0.063	81.000	19.000	<a href="#">HD0(156)</a>
20.000	60.000	0.566	-0.096	78.800	21.200	<a href="#">HD0(156)</a>
5.000	75.000	0.715	-0.046	93.000	7.000	<a href="#">HD0(156)</a>
10.000	75.000	0.694	-0.096	90.100	9.900	<a href="#">HD0(156)</a>
15.000	75.000	0.665	-0.005	90.100	9.900	<a href="#">HD0(156)</a>
20.000	75.000	0.593	-0.016	89.900	10.100	<a href="#">HD0(156)</a>
5.000	90.000	0.784	0.046	82.700	17.300	<a href="#">HD0(156)</a>
10.000	90.000	0.745	-0.187	74.000	26.000	<a href="#">HD0(156)</a>
15.000	90.000	0.682	-0.036	71.100	28.900	<a href="#">HD0(156)</a>
20.000	90.000	0.540	-0.039	71.600	28.400	<a href="#">HD0(156)</a>

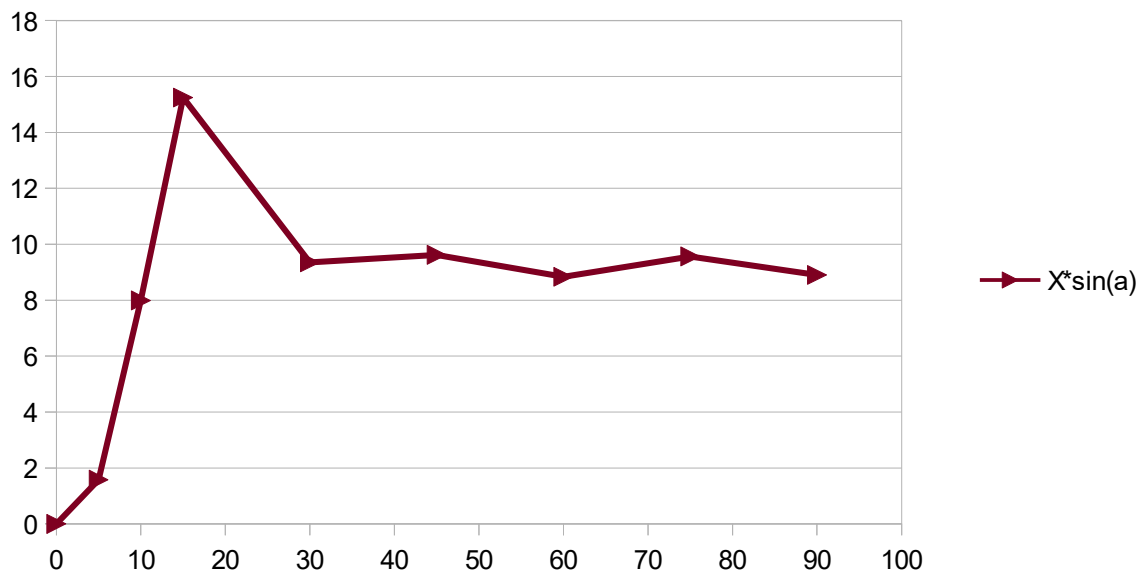
C<sub>y</sub><sup>\*</sup> не является корректным значением, так как графики показывают отсутствие асимптотической устойчивости данного параметра для сетки. Рекомендуется использовать нулевое значение. Расчеты выполнены для микрокапель облака радиусом 6 мкм.

## CFD расчеты одинарной сетки с Raschel плетением ( $V = 8$ м/с)

Attack, $\alpha$ , °	$C_x$	$C_y^*$	P, %	X, %	$X^*\sin(\alpha)$	Condition
0.0	0.164	0.068	0.000	100.000	0.000	<a href="#">HD0(156)</a>
5.0	0.136	0.036	81.900	18.100	1.578	<a href="#">HD0(156)</a>
10.0	0.160	0.070	54.000	46.000	7.988	<a href="#">HD0(156)</a>
15.0	0.186	0.092	41.100	58.900	15.244	<a href="#">HD0(156)</a>
30.0	0.290	-0.042	81.300	18.700	9.350	<a href="#">HD0(156)</a>
45.0	0.317	0.005	86.400	13.600	9.617	<a href="#">HD0(156)</a>
60.0	0.328	0.066	89.800	10.200	8.833	<a href="#">HD0(156)</a>
75.0	0.371	-0.068	90.100	9.900	9.563	<a href="#">HD0(156)</a>
90.0	0.351	-0.040	91.100	8.900	8.900	<a href="#">HD0(156)</a>

$C_y^*$  не является корректным значением, так как графики показывают отсутствие асимптотической устойчивости данного параметра для сетки. Рекомендуется использовать нулевое значение. Расчеты выполнены для микрокапель облака радиусом 6 мкм.

График ниже показывает, что пока отсутствует перекрытие элементов сетки (при достаточно больших углах атаки,  $> 15^\circ$ ) эффективность сетки в ветровой проекции  $X^*\sin(\alpha)$  практически постоянна, так как элементы сетки практически аэродинамически независимы.

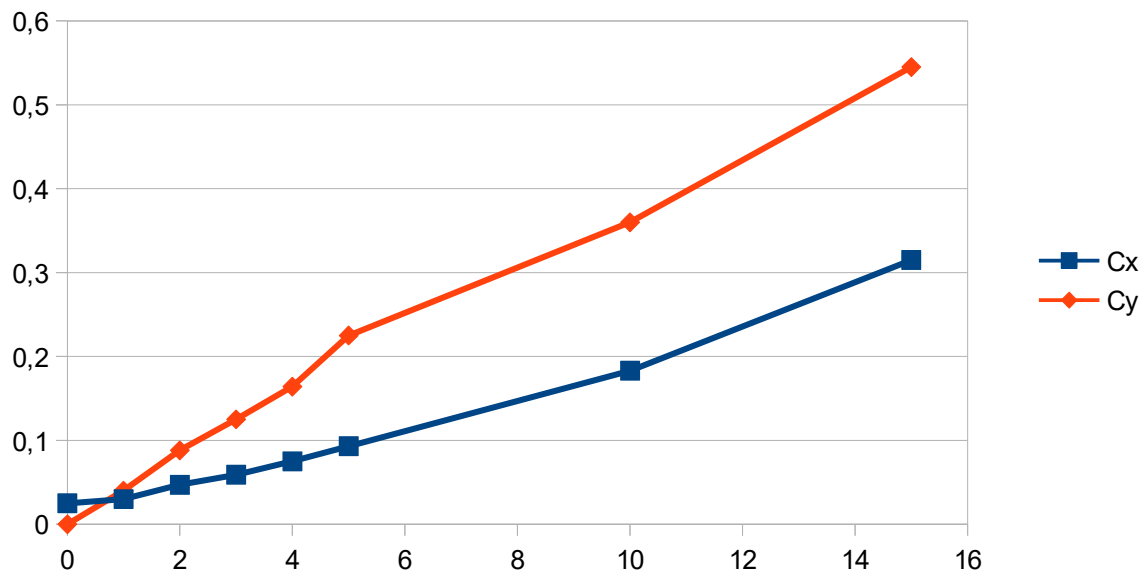


## CFD расчеты проницаемой кайтовой ткани (паруса) при $V = 8$ м/с

$R^* = 0.05$	$D^* = 1.250$	$R = 120.00 \mu\text{m}$	$S = 300.00 \mu\text{m}$
--------------	---------------	--------------------------	--------------------------

Attack, $\alpha$ , °	$C_x$	$C_y$	P, %	X, %	Condition
0.0	0.025	0.000	0.000	100.000	<a href="#">HD2(19)</a>
1.0	0.030	0.040	54.000	46.000	<a href="#">HD2(19)</a>
2.0	0.047	0.088	51.900	48.100	<a href="#">HD2(19)</a>
3.0	0.059	0.125	55.500	44.500	<a href="#">HD2(19)</a>
4.0	0.075	0.164	55.200	44.800	<a href="#">HD2(19)</a>
5.0	0.093	0.225	56.300	43.700	<a href="#">HD2(19)</a>
10.0	0.183	0.360	60.800	39.200	<a href="#">HD2(19)</a>
15.0	0.315	0.545	62.200	37.800	<a href="#">HD2(19)</a>

График ниже показывает, что аэродинамические коэффициенты могут аппроксимироваться зависимостями  $C_x \sim C_x\theta + K_x \cdot \alpha^2$  и  $C_y \sim K_y \cdot \alpha$  при малых углах атаки, а эффективность  $X$  можно приблизительно считать постоянной.



- [1] Казанцев А.Н. [Снос АэроГЭС](#), 2014
- [2] Kyoo-Chul Park, Shreerang S. Chhatre, Siddarth Srinivasan, Robert E. Cohen, Gareth H. McKinley. [Optimal Design of Permeable Fiber Network Structures for Fog Harvesting](#), 2013
- [3] Kyoo-Chul Park, Shreerang S. Chhatre, Siddarth Srinivasan, Robert E. Cohen, Gareth H. McKinley. [Supporting Information. Optimal Design of Permeable Fiber Network Structures for Fog Harvesting](#), 2013
- [4] Rivera, J. D. D. [Aerodynamic Collection Efficiency of Fog Water Collectors](#), 2011
- [5] Schemenauer, R. S.; Cereceda, P. A [Proposed Standard Fog Collector for Use in High-Elevation Regions](#), 1994
- [6] Schemenauer, R. S.; Joe, P. I. [The Collection Efficiency of a Massive Fog Collector](#), 1989
- [7] Казанцев А.Н. [ТЭО для различных примеров АэроГЭС](#), 2014