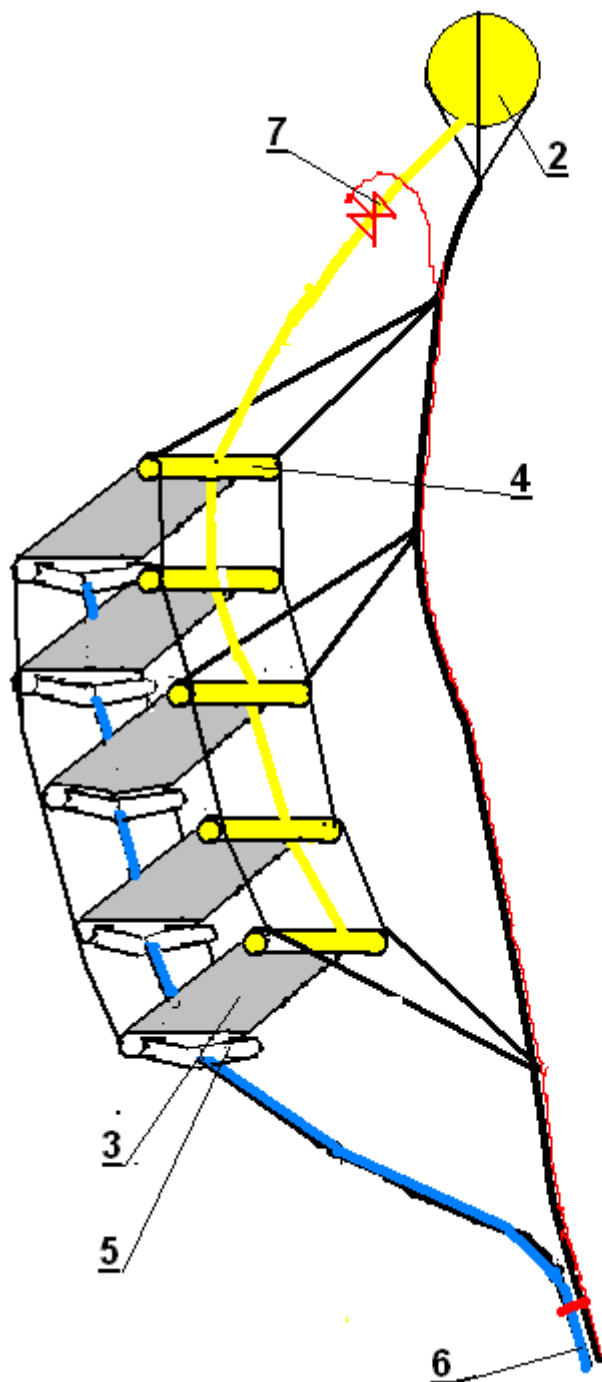


Приложение: Пример расчета для пилотной установки мощностью 27 кВт



Конструкция и энергетические расчеты

На уровень облака аэростатом 2 поднимаются одна или несколько улавливающих сеток 3, общей площадью A около 15000 м² (наиболее целесообразно 5 сеток размером 100 м * 30 м). Сетки разворачиваются на земле или лучше на высоте путем заполнения газом цилиндрических баллонов 4, прикрепленных к верхним краям сеток. Эти баллоны связаны с аэростатом 2 шлангами с пережимающим клапаном 7. Подъемная сила этих баллонов также способствует поддержанию верхнего края сеток. Переохлажденная влага облака концентрируется и оседает на поверхностях сеток. Под действием сил тяжести и ветра вода стекает в прикрепленный к нижнему краю сетки сборник — желоб 5. Желоб имеет выгнутую вниз форму для стекания к середине его попадающей воды. Собранная вода со всех сеток сливается через

отверстия в серединах желобов и соединяющие безнапорные гибкие трубки в опускную трубу 6. По опубликованным данным для систем сбора тумана такой способ сбора влаги сетчатыми полотнами обеспечивает от 2 до 300 л воды с м2 в сутки. Используем для расчетов довольно консервативную оценку $q = 10$ л/м2/сутки. Таким образом, со всей площади сеток можно получить следующий средний расход собранной воды

$$Q = q \cdot A = 10 \cdot 15000 = 150000 \text{ л/сутки} = 6.25 \text{ м}^3/\text{час} \quad (1)$$

При средней высоте облаков $H = 3000$ м этот расход обладает потенциальной мощностью

$$N = \rho \cdot g \cdot Q \cdot H / 1000 / 3600 = 51 \text{ кВт} \quad (2)$$

где ρ - плотность воды, g - ускорение свободного падения.

Для доставки этого количества воды на поверхность земли используется опускная труба с внутренним диаметром $d = 40$ мм. Потери напора в такой трубе длиной $l = 3000$ м составляют

$$\Delta h = \lambda \cdot l / d \cdot Q^2 / (0.785 \cdot d^2)^2 / g / 2 = 0.015 \cdot 3000 / 0.04 \cdot 6.25^2 / (3600 \cdot 0.785 \cdot 0.05^2)^2 / 9.8 / 2 = 110 \text{ м} \quad (3)$$

где λ - коэффициент гидравлического трения.

Потери могут быть существенно снижены, если на внутреннюю поверхность трубы нанести супергидрофобное покрытие, отталкивающее молекулы воды.

Достигающая поверхности земли вода с напором около 3000 м из опускной трубы может использоваться в активной ковшовой турбине. Статический напор в её сопле преобразуется в скорость

$$V = \varphi \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot (H - \Delta h)} = 0.98 \cdot \sqrt{2 \cdot 9.8 \cdot (3000 - 110)} = 233 \text{ м/с}, \quad (4)$$

где φ – коэффициент скорости соплового аппарата (= 0.98).

Соответственно диаметр d сопла при таком расходе и скорости

$$d = \sqrt{4 / \pi \cdot Q / V} = \sqrt{4 / \pi \cdot 6.25 / 3600 / 233} = 0.003 \text{ м} = 3 \text{ мм} \quad (5)$$

Необходимая окружная скорость на периферии рабочего колеса

$$U = \psi \cdot V = 0.45 \cdot 233 = 105 \text{ м/с}, \quad (6)$$

где ψ – скоростной коэффициент ($\psi_{\text{opt}} = 0.44 - 0.47$)

Наружный диаметр рабочего колеса при частоте вращения $n = 12000$ об/мин

$$D = 60 \cdot U / (\pi \cdot n) = 60 \cdot 105 / (\pi \cdot 12000) = 0.167 \text{ м} = 167 \text{ мм} \quad (7)$$

Коэффициент η_s быстроходности этой одноступенчатой турбины будет равен 4,5 (существенно меньше оптимальных 13-18). Поэтому к.п.д. η_t такой турбины с малоразмерным соплом меньше 0.6, и требуется понижающий редуктор для связи с электрогенератором стандартной частоты или высокочастотный генератор с преобразователем в стандартную частоту. Вследствие низкого (равного атмосферному) внутреннего давления корпус турбины может быть выполнен тонкостенным и легким. Таким образом, электрическая мощность установки

$$N_p = \eta_t \cdot \eta_g \cdot N \cdot (H - \Delta h) / H = 0.6 \cdot 0.92 \cdot 51 \cdot 2890 / 3000 = 27 \text{ кВт}, \quad (8)$$

где η_g – к.п.д. генератора с редуктором.

Существенно более высокий к.п.д. (до 0.85) при $n = 3000$ об/мин и напоре на входе 2890 м может быть получен при использовании винтовой машины типа бурового винтового гидродвигателя или вследствие обратимости стандартного винтового насоса, работающего в турбинном режиме. Например, с минимальными

переделками в турбинном режиме можно использовать винтовой насос А13В 4/160 ОАО «Ливгидромаш» с номинальными параметрами $Q = 5.8 \text{ м}^3/\text{ч}$, $H = 1600 \text{ м}$, $n = 2900 \text{ об/мин}$, $N_{\text{дв}} = 37 \text{ кВт}$, массой до 450 кг. Однако вследствие высокого внутреннего давления корпус и весь агрегат существенно тяжелее, чем при использовании турбинного привода.

Оценка материалоемкости и сил, действующих на основные летные части

Для оценки необходимой подъемной силы аэростата можно определить массу основных частей установки. При массе 1 м² сетки в 10 г общий вес сеток

$$M_c = 0.01 * A = 0.01 * 15000 = 150 \text{ кг (9)}$$

Масса оболочки граничных баллонов из аэроткани толщиной $\delta = 0.09 \text{ мм}$, один м² которой имеет массу около 80 г, диаметром $d_c = 0.25 \text{ м}$ с суммарной длиной $l_c = 150 \text{ м}$ можно определить

$$M_{bg} = 0.08 * \pi * l_c * d_c = 0.08 * \pi * 0.25 * 150 = 9.5 \text{ кг (10)}$$

Опускная гибкая труба состоит из нескольких частей. Верхний участок (~длиной $l_t = 300 \text{ м}$) опускной трубы может быть выполнен из аэроткани. С учетом площади наружной поверхности (с двухкратным запасом для возможности усиления нижней части) это участок весит

$$M_t = 0.08 * 2\pi * d * l_t = 2\pi * 0.04 * 300 * 0.08 = 6.5 \text{ кг (11)}$$

Труба из сверхвысокомолекулярного полиэтилена ($\sigma_b = 2,4 \text{ ГПа}$) с диаметром $d = 40 \text{ мм}$ толщиной стенки $\delta = 0.5 \text{ мм}$ с запасом выдерживает давление, соответствующее напору H

$$H_b = 2\delta * \sigma_b / (g * d) = 2 * 0.0005 * 2.4 * 10^9 / (1000 * 9.8 * 0.04) \approx 6000 \text{ м (12)}$$

Поэтому нижняя часть опускной трубы может быть выполнена из этого материала ($\rho_b = 970 \text{ кг/м}^3$) и её вес

$$M_b = \pi * d * \delta * \rho_b * (H - l_t) = \pi * 0.04 * 0.0005 * 970 * 2700 = 165 \text{ кг (13)}$$

Труба должна быть прикреплена к привязному тросу, идущему к подъемному аэростату, который воспринимает большую часть веса и аэродинамических нагрузок, действующих на трубу.

В качестве привязного троса может быть использовать производимый многими компаниями трос из сверхвысокомолекулярного полиэтилена диаметром $d_c = 14 \text{ мм}$, максимальной нагрузкой 173 кН и погонной массой 0.089 кг/м. Вес такого троса длиной 3000 может быть рассчитан

$$M_{ca} = 0.089 * H = 0.089 * 3000 = 267 \text{ кг (14)}$$

Обвязку крепления сеток и подъемного аэростата можно сделать тросом существенно меньшего диаметра 5-8 мм. Вес её (при максимальной общей длине 500 м) и шланга наддува с пережимным клапаном M_{cr} можно оценить в 15 кг.

Таким образом, вес конструкции, который нужно поднять баллонами

$$M_k = M_c + M_t + M_b + M_{ca} + M_{cr} = 150 + 6.5 + 165 + 267 + 15 \approx 600 \text{ кг (15)}$$

Для подъема конструкции может быть использован аэростат, наполненный ингибированным водородом (водород с 15% гелия для смещения взрывоопасного соотношения с воздухом) с удельной подъемной силой $f = 11.06 \text{ н/м}^3$ и теоретической грузоподъемностью $F = 700 \text{ кг}$ (6860 Н). Соответствующий объём этого аэростата 620 м³, радиус 5.3 м и вес оболочки из аэроткани $M_o = 30 \text{ кг}$. Следовательно, без учета

обвязки подъёмная сила равна $M_a = 670$ кг (6570 Н).

После подъема на заданную высоту и наполнения легким газом поддерживающих баллоном сеток подъёмная сила несколько увеличивается. После начала сбора влаги и наполнения трубы к весу конструкции прибавляется часть веса воды в опускной трубе, которую можно определить как

$$M_w = 0.785 * d^2 * H * 1000 = 0.785 * 0.04^2 * 3000 * 1000 = 3770 \text{ кг (16)}$$

При строго вертикальном положении трубы (в идеальном случае при отсутствии ветра) этот вес воды воспринимается наземной частью установки. Однако при наклоне трубы под действием ветра, который, с другой стороны, повышает подъёмную силу (см. ниже) часть его, пропорциональная косинусу наклона к горизонту, должна восприниматься подъёмным устройством.

Существенную дополнительную подъёмную силу и аэродинамическое сопротивление создает ветер, почти всегда дующий на высоте. Рассматривая сетки как плоские сплошные пластины, отклоняющиеся от горизонтального направления на 15 градусов (близкого к оптимальному значению), при стандартных атмосферных условиях на средних широтах на высоте 3000 м скорость ветра $v_a = 7.1$ м/с и плотности $\rho_a = 0.943$ кг/м³ можно определить аэродинамическое сопротивление F_x и подъёмную силу F_y

$$F_x = c_x * 0.5 * \rho_a * v_a^2 * A = 0.2 * 0.5 * 0.943 * 7.1^2 * 15000 = 71305 \text{ Н (7276 кг) (17)}$$

$$F_y = c_y * 0.5 * \rho_a * v_a^2 * A = 0.77 * 0.5 * 0.943 * 7.1^2 * 15000 = 274520 \text{ Н (28012 кг) (18)}$$

где $c_x (=0.2)$ и $c_y (=0.77)$ – коэффициенты аэродинамического сопротивления и подъёмной силы пластины при этом угле наклона по измерениям Геттингенского института. (Для сведения: при наклоне 80 град. $F_x = 406400$ Н, $F_y = 8913$ Н, при наклоне 45 град. $F_x = F_y = 250000$ Н). Следует отметить, что сетчатая, а не сплошная поверхность уменьшает аэродинамическое сопротивление и подъёмную силу в несколько раз в зависимости от отношения площадей между нитями и общей площадью. С другой стороны, цилиндрические баллоны, исполняющие функцию скруглённой входной кромки, пластины увеличивают подъёмную силу и снижают чувствительность пластины к углу атаки при неоптимальном направлении натекания. Кроме того, выгиб сетки под действием ветра несколько повышает подъёмную силу. Таким образом, подъёмная сила сеток в рабочем положении вполне может удерживать вес воды в опускной трубе и конструкции.

Ветер также воздействует на опускную трубу (привязной трос меньшего диаметра, чем труба, прикреплен и находится в аэродинамической тени трубы). Используя средние параметры стандартных атмосферных условий по длине трубы при вертикальном положении её можно оценить аэродинамическое сопротивление трубы

$$F_{xca} = c_x * 0.5 * \rho_a * v_a^2 * d * H = 1.2 * 0.5 * 1.07 * 4.2^2 * 0.04 * 3000 \approx 1400 \text{ Н (138 кг) (19)}$$

(С учетом изменения параметров по высоте более точное значение 1560 Н)

При наклонном положении трубы аэродинамическое сопротивление уменьшается.

Подъёмную силу можно регулировать наклоном сеток в зависимости от скорости ветра. При быстром спуске в критических ситуациях сбрасывается газ из цилиндрических баллонов, сетки складываются, и летная часть конструкции привязным тросом притягивается лебёдкой к земле.

Оценка материалоемкости наземных частей и всей установки

Для оценки материалоемкости основных частей наземной части установки

рассчитаем необходимую мощность лебёдки для спуска троса и опускной трубы. Принимая минимальное время T спуска летной части равным одному часу с высоты 3000 м и необходимую и среднюю силу притягивания, равной грузоподъемности аэростата с полуторным запасом для компенсации порывов ветра, получим необходимую мощность

$$N_h = 1.5 * F * g * H / 3600 / 1000 = 1.5 * 700 * 9.8 * 3000 / 3600 / 1000 = 8.5 \text{ кВт} \quad (20)$$

Электролебедка такой мощности с тяговым усилием 10000 Н, используемая, например, в буровых установках имеет массу M_h около 300 кг.

Следует отметить, что необходима модернизация барабана для намотки троса вместе опускной трубой и кабелем и соответствующими соединениями. Безусловно, вес лебедки может быть уменьшен по крайней мере вдвое.

Стандартный синхронный электрогенератор мощностью около 30 кВт с частотой вращения 3000 об/мин имеет массу около 200 кг. С учетом гидротурбины с редуктором или винтового двигателя общую массу M_e агрегата можно оценить соответственно в 300 или 450 кг.

Таким образом, общая материалоемкость установки будет

$$M = M_h + M_e + M_k + M_o = 960 \text{ или } 1110 \text{ кг} \quad (21)$$

Общую удельную материалоемкость установки на единицу мощности можно определить как

$$m_y = (M_h + M_e + M_k + M_o) / N_p = 35 \dots 41 \text{ кг/кВт} \quad (22)$$

Для сравнения типовой стационарный дизельный электрогенератор на ту же мощность с расходом топлива 10 л/час без массы бака имеет массу около 1100 кг.

Возможности использования установки для аккумуляирования энергии

Такая установка может снабжать целый поселок с 100 жителями электроэнергией и чистой водой при плюсовой температуре в теплых районах, а на умеренных широтах в теплое время года.

Для аккумуляирования энергии в период перепроизводства электричества можно использовать аналогичную установку с балонетным аэростатом переменного объема, дополнительным водородопроводом, идущим от поверхности земли к аэростату, электролизером, летным сборником (в верхнем бьефе) и с системой балансирования подъёмной силы и загрузки. Избыточная электроэнергия при этом используется в электролизере для разложения воды. Образующийся водород поступает по водородопроводу в поднятый аэростат переменного объема.

Одновременно сетки накапливают сконденсированную воду в летном сборнике в соответствии с поступающим водородом, что снижает нагрузку на основной трос. Энергия хранится в виде запаса экологичного топлива - водорода с удельной теплотой сгорания 120.9 МДж/кг и потенциальной энергии воды 0.02 МДж/кг, которые можно использовать при пиковых нагрузках. По условиям взрывобезопасности водородные аэростаты переменного объема можно расположить на достаточном расстоянии от аэростатов основной установки, а может быть и непосредственно использовать для транспортировки водорода и воды в районы потребления.