

УДК 621.311.24.001

ЭКОЛОГИЧЕСКИ ЧИСТЫЙ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЙ ИСТОЧНИК ЭНЕРГИИ

В. И. КОРОЛЕВ, Н. В. САЛТАНОВ, Н. С. ЕФРЕМОВА

Институт гидромеханики НАН Украины, Киев

Получено 25.01.2002

Рассмотрена возможность и целесообразность использования энергии струйных течений тропопазы в ветроэнергетике. Предлагается один из возможных вариантов висотной ветроэнергетической станции (ВЭС), располагаемой на привязном аэростате на высоте 8,5–9,5 км. Рассмотрены проблемы, связанные с созданием такой станции. Для обоснования реальности предлагаемой системы приведены необходимые оценки и расчеты основных параметров ВЭС мощностью 3000 кВт.

Розглянуто можливість і доцільність використання енергії струменевих течій тропопазу у вітроенергетиці. Пропонується один із можливих варіантів висотної вітроенергетичної станції (ВЕС), яка встановлена на прив'язному аеростаті на висоті 8,5–9,5 км. Розглянуто проблеми, які пов'язані зі створенням такої станції. Для обґрунтування реальності системи, яка пропонується, наведені необхідні оцінки і розрахунки основних параметрів ВЕС потужністю 3000 кВт.

In present work the possibility and expedience of using tropopause jet flow energy in wind – energetics are considered. One of the possible alternatives of altitude wind – energetical station (AWS), which is disposed on the aerostat (8,5–9,5 km above the ground), is offered. Problems bound up with such station creation are considered. Necessary estimations and calculations of AWS (output 3000 kWt) basic parameters are shown for demonstration of the offered system reality.

ВВЕДЕНИЕ

Все возрастающие потребности человечества в энергоресурсах заставляют, помимо использования традиционных источников – наземных запасов угля, нефти, газа, энергии АЭС – разрабатывать запасы минеральных энергоносителей – нефти и газа на шельфе океанов и морей, не останавливаясь перед техническими трудностями и затратами.

Создана индустрия по добыче и транспортировке на материк нефти и газа – многотонные плавучие буровые установки, подводные нефтехранилища и трубопроводы, специальное технологическое оборудование: сваебойные молоты, копры, подводные монтажные машины и т. д., стационарные стальные и железобетонные платформы. Так, в Северном море установлено 5 платформ типа "Кондип" – железобетонных башен высотой более 300 м. На постройку такого сооружения израсходовано 87000 м³ высокопрочного цемента, 12000 т арматуры, 2600 т стальных канатов [1]. Работы ведутся в сложных условиях, при воздействии ветра, волнения, создающих большие статические и динамические нагрузки, что чревато авариями, разливом нефти и загрязнением окружающей среды. Интенсивная добыча энергоносителей может привести к их истощению уже в обозримом будущем.

В то же время имеется по-существу неисся-

каемый экологически чистый источник энергии – кинетическая энергия ветра, воздушных течений. Этот вид энергии использовался людьми на протяжении всей истории человечества, но в промышленных масштабах ветроэнергетика стала развиваться быстрыми темпами с середины 70-х годов XX столетия. Построено большое количество ветроэнергетических станций (ВЭС) различных размеров и мощности, которые вносят существенный вклад в энергетiku стран Европы и Америки. В некоторых странах Европы планируется закрыть АЭС, а энергию атома заменить энергией ветра.

Энергетический потенциал ветра в заданной точке пространства определяется следующим образом. Суммарная энергия ветра в течение некоторого периода времени определяется выражением

$$A = \frac{\rho}{2} \sum_{v=0}^{v_{max}} v_i^3 \tau_i S, \quad (1)$$

где τ_i – продолжительность действия ветра со скоростью v_i ; S – площадь сечения воздушного потока, ρ – плотность воздуха.

Имеющиеся данные о скорости ветра в приземном слое на обширных территориях Европы и Америки свидетельствуют о том, что ее среднее значение, определяющее величину A в формуле (1), редко превышает 8 – 10 м/с [2 – 4].

Так как энергия воздушного потока пропорциональна площади, ометаемой лопастями ротора

турбины, то для получения большой единичной мощности ветроэнергетической установки (ВЭУ) строятся грандиозные сооружения. (ВЭУ "Гравиян" в Германии мощностью 3000 кВт имеет диаметр ветроколеса 100 м, высоту башни 100 м, масса ВЭУ без учета башни – 200 т).

Низкая плотность энергии на единицу поперечной площади потока, а также низкий коэффициент использования установленной мощности, обусловленный малой длительностью ветра в рабочем диапазоне скоростей (25 – 30 % годового времени [5]) – главные недостатки наземных ветроэнергетических станций. Кроме того, ветер в приземном слое отличается большой изменчивостью как в течение длительных периодов времени, так и короткопериодных (порывы и шквалы).

Это заставляет обеспечивать прочность конструкций ВЭС не только в рабочем диапазоне скоростей ветра, но и при сравнительно редких ураганных ветрах (даже при выводе лопастей ветроколеса в нерабочее положение). Это значительно усложняет и удорожает ВЭС.

Порывы и шквалы являются серьезной помехой для работы электрогенераторов. Вызываемые ими динамические перегрузки отрицательно влияют на прочность ветротурбин и трансмиссий. Имеется множество изобретений и технических предложений, направленных на снижение динамических нагрузок, уменьшение бросков скорости вращения ветротурбины и параметров вырабатываемого генератором тока – частоты и напряжения. Как правило, все эти предложения, не решая вопрос кардинально, существенно усложняют конструкцию ветротурбины и ВЭС в целом, приводят к увеличению веса и снижению надежности [6].

Эффективность работы ветротурбины снижается экранирующим воздействием башни – снижением к.п.д ветряка. Работа ВЭС может вызывать вибрацию, шум, инфразвуковые колебания, а вблизи населенных пунктов и аэропортов может создавать помехи для радио и телесигналов [5].

1. ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВЭС – ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭНЕРГИИ СТРУЙНЫХ ТЕЧЕНИЙ ТРОПОПАУЗЫ

Перечисленные обстоятельства заставляют искать возможность использования энергии струйных течений тропосферы – слоя атмосферы между тропосферой и стратосферой на высоте 9 – 10 км.

Энергетический потенциал этих течений может быть охарактеризован следующими фактами [6]:

”по грубым оценкам ученых, в Европейской части бывшего СССР можно получить в течение года 3000 млрд. кВт. ч. электроэнергии”. Это эквивалентно выработке ее 324 блоками-миллионниками АЭС, работающими непрерывно в течение года. При этом энергетический потенциал приземного слоя (до высоты 50 м) составляет менее одного процента от общего [7].

Основной вклад дают струйные течения на высоте 9 – 11 км, в которых скорость потока относительно постоянна и составляет 20 – 120 м/с. Эти течения представляют собой потоки воздуха шириной в несколько сотен километров, толщиной 1,5 – 2,5 км и длиной в десятки тысяч километров [8, 9].

Струйные течения – зоны максимальных запасов кинетической энергии, внутри которых имеются очаги с повышенными значениями энергии. Нередко запасы кинетической энергии атмосферы на площади радиусом 1000 км в зоне очага составляют $3 \cdot 10^{26}$ эрг, что эквивалентно энергии нескольких сотен тысяч атомных бомб (с тротиловым эквивалентом по 20000 т [10]).

Эффективность использования энергии струйного течения может быть оценена следующим образом: приняв в качестве расчетной скорость ветра в струе $v = 30$ м/с с учетом ее повторяемости и плотности воздуха на высоте 9 км, в соответствии с зависимостью (1) можно получить величину A , почти на два порядка большую, чем вблизи поверхности Земли. Это в свою очередь позволяет значительно снизить размеры и массу ветротурбины, обеспечивающей то же количество энергии, которое вырабатывается крупнейшими наземными ВЭС. Высотные ВЭС можно подвешивать на привязных аэростатах на соответствующей высоте. Так как основное условие создания высотных ВЭС – существование струйных течений, ниже приводятся основные сведения о них, имеющиеся в литературе.

2. СТРУЙНЫЕ ТЕЧЕНИЯ: ОПРЕДЕЛЕНИЕ, ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И СВОЙСТВА СТРУЙНЫХ ТЕЧЕНИЙ

Струйное течение [7] – узкая зона сильных ветров большой протяженности, наблюдающаяся в верхней тропосфере в зоне тропосферы, структурно связанное с планетарной высотной фронтальной зоной (ПВФЗ) [8]. Струйное течение располагается обычно на высоте 9–11 км, имеет поперечные размеры 300–400 км, толщину 2–4 км и вытягивается в длину на десятки тысяч киломе-

тров, иногда опоясывая весь земной шар. Струйное течение (СТ) в общем направлено с запада на восток, но может сильно изгибаться, напоминая реку, причем отдельные участки могут быть направлены меридионально и даже ультраполярно. Скорости ветра в середине струйного течения, как правило, составляют 60–80 м/с. Достигая максимума на оси струи, скорость ветра в поперечном сечении ослабевает в радиальном направлении, что создает сильный горизонтальный (до 10 м/с на 100 км) и вертикальный (до 10 м/с на 1 км) ее градиенты.

Скорости ветра вдоль струйного течения неодинаковы: зоны очень больших скоростей перемежаются с интервалами скоростей меньшего порядка. Области больших скоростей, обнаруживаемые по концентрическим эллиптическим изотаксам (линиям равных скоростей), перемещаются вдоль оси СТ с различной быстротой, но в общем значительно медленнее, чем скорости самого СТ.

Интервалы между областями большой и малой силы ветра в СТ характеризуются замедленными или ускоренными движениями струи и, как следствие этого, поперечными течениями.

При подъеме вверх через СТ скорость ветра вначале нарастает, а выше оси снижается. Наибольший сдвиг (нарастание скорости) – под СТ.

Имеется несколько типов высотных СТ. Субтропическое СТ располагается между 25° и 30° с. ш. на высоте 12–12,5 км. Средние скорости 35–40 м/с, максимальные 80–100 м/с, а над Японией достигают еще больших значений.

Стратосферное западное СТ располагается на широте Полярного круга на высоте 20–25 км и имеет среднюю скорость 40 м/с.

Летнее стратосферное восточное СТ обычно находится примерно около 20° с. ш. на высоте 25 км. Средние скорости ветра 25–50 м/с.

Среднеширотное тропопаузное течение располагается на высоте 8,5–10,5 км в полосе 35° – 60° с. ш. Средние скорости ветра 100 м/с и более.

СТ разделяют на океанические и континентальные. Континентальные СТ имеют скорости примерно вдвое большие, чем океанические.

Максимальные скорости СТ географически обусловлены. Над Западной Европой они составляют около 100 м/с, над США – до 150 м/с, над Дальним Востоком и Японией – до 150–180 м/с.

Ось СТ располагается на 300–600 км позади холодного фронта на земной поверхности и на 600–1000 км впереди теплого.

Совместное влияние термических факторов и орографии приводит к тому, что у восточных берегов материков зона повышенной повторяемости

располагается в более низких широтах, чем у западных побережий.

Если над Японией и восточными районами США центральная часть полосы повышенной повторяемости находятся примерно на 40° с. ш., то у западных берегов материков – на широте 55° – 60°. Над морской поверхностью струйные течения совпадают с направлением теплых океанических течений – Гольфстримом, Северо-Атлантическим течением, Куросио – на границах которых формируются зоны наибольших контрастов температур в тропосфере.

В средних и высоких широтах максимальные скорости СТ располагаются в слое 8–10 км [11, 12].

В результате сезонного различия в распределении притока тепла СТ зимой располагаются в широтной зоне между 25° и 40° с. ш., а летом на 10° – 15° севернее.

Наибольшая повторяемость СТ в январе отмечена над Японскими островами, затем следуют юго-восточные районы Северной Америки и частично Британские острова. Такое распределение повторяемости СТ зимой носит постоянный характер и не зависит от аномальных процессов, даже если они являются повсеместными над всем северным полушарием. Это объясняется сезонными условиями притока тепла и трансформацией масс воздуха над материками и океанами в общем западно-восточном переносе. Наибольшая повторяемость СТ лежит на стыке холодных материков и теплых океанов.

На распределение повторяемости СТ существенно влияет и орография. Высочайшая горная система Гималаи вместе с Тибетским плато (шириной более 1,5 тыс. км), являясь препятствием воздушным потокам тропосферы зимой, делит их на две ветви, которые затем смыкаются. В результате над востоком Азии струи, как правило, оказываются мощными по размерам и с большой скоростью ветра. Вблизи восточных берегов Азии на уровне 9 км повторяемость скорости ветра более 40 м/с составляет более 70–75%.

За исключением экваториальной зоны СТ на высоте 9–10 км наблюдаются практически повсеместно. Интенсивность СТ над Европой и Западной Сибирью в зимние месяцы достаточно постоянна и мало зависит от аномалий атмосферной циркуляции.

Карты повторяемости в Северном полушарии, приведенные в [9], показывают, что наиболее интенсивные и устойчивые течения располагаются в поясе между 35° и 65° с.ш. Очаги наибольшей повторяемости по долготе находятся в двух зонах – 45° – 135° в.д. и 40° – 125° з.д.

Течения со скоростью 28 м/с и выше имеют в этих районах в зависимости от времени года повторяемость 48–58%, а течения со скоростью 55 м/с и выше в полосе 40° – 60° с.ш. имеют повторяемость 20–30%. Наиболее интенсивные и частые ветры дуют в районе Японских островов в полосе 35° – 45° с. ш. (повторяемость 30–40%). Т. е. в этих точках из 100 дней 30–40 дней находится ось струйного течения. Так как ширина СТ значительно превосходит ширину участка, для которого определяется повторяемость оси течения, фактическая повторяемость скорости ветра в данной точке будет несколько большей, чем указано в приведенных картах.

3. ОСНОВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ АЭРОСТАТНОЙ ТРОПОПАУЗНОЙ ВЭС

К основным элементам относятся:

- несущий аэростат – жесткий или полужесткий обтекаемый аппарат, использующий не только аэростатическую, но и аэродинамическую подъемную силу;
- собственно ВЭУ – ветротурбина аксиальная или ортогональная с ускорителем (мультипликатором и электрогенератором);
- кабель-трос, обеспечивающий передачу вырабатываемой электроэнергии на землю и удерживающий систему в заданной точке пространства;
- наземное оборудование – якорь, лебедка и вьюшка для сматывания кабель-троса при опускании системы на землю.

4. НЕСУЩИЙ АЭРОСТАТ

Назначение несущего элемента – удерживать на высоте 9–10 км ВЭУ вне зависимости от наличия ветра на этой высоте. Струйное течение может периодически уходить в сторону, поэтому аэростатическая сила носителя должна обеспечивать удержание ВЭС и быть равной с некоторым запасом сумме весов аэростата, ВЭУ и некоторой части кабель-троса. Вообще аэростат в рабочем режиме (при наличии ветра) должен, кроме силы на удержание системы, иметь избыточную подъемную силу, величина которой определяется допустимым углом наклона равнодействующей избыточной подъемной силы и сопротивления системы. Это необходимо для удержания всей системы в положении, близком к вертикальному, с целью обеспечения минимальной длины и веса кабель-троса.

Форма и конструкция аэростата могут предусматривать возможность получения избыточной аэродинамической подъемной силы. Вопрос о том, за счет чего – аэростатических или аэродинамических сил – должен решаться с учетом эффективности того или другого метода, минимизирующего отношение $\Delta P_{\Gamma}/\Delta P_{\text{в}}$, где $\Delta P_{\text{в}}$ и ΔP_{Γ} – приращение вертикальной и горизонтальной силы. Можно несколько увеличить размеры аэростата хорошего аэродинамического качества, либо вместо этого добавочную силу обеспечить за счет аэродинамической подъемной силы путем соответствующей удиферентровки аэростата так, чтобы появились положительные углы атаки (использовать подъемную силу корпуса – ”фюзеляжа”). Можно, в конце концов, применить такую форму аэростата, при которой аэродинамическая подъемная сила составляет существенную часть общей (аппараты ”миксты”, описанные в [13, 14]).

Для изготовления аэростата могут быть использованы тонкие прочные пленки – дакрон толщиной $\delta = 30$ – 60 микрон, масса одного квадратного метра составляет 25–55 г, нейлоновая ткань с массой квадратного метра 60 г [15] и другие современные материалы. Это позволяет создать относительно легкий аэростат большой подъемной силы с делением внутреннего объема на отсеки, использовать поперечные и продольные мембраны, обеспечивающие жесткость и необходимую форму аэростата. Основные требования, которым должен удовлетворять аэростат-носитель:

- удержание системы в безветренную погоду обеспечивается полностью за счет аэростатики;
- необходимо обеспечить возможность управления подъемной силой в потоке [14] таким образом, чтобы соблюдался принцип саморегулирования. Так, если расчетная скорость потока $v = 30$ м/с, то при значительном ее превышении возрастающая подъемная сила не должна препятствовать увеличению отклонения системы от вертикали, выводу аэростата на периферию струйного течения с меньшей скоростью потока, а именно равной расчетной скорости. Таким образом реализуется принцип саморегулирования системы, обеспечивающий ее безопасность при значительном превышении скорости потока.

5. ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ УСТАНОВКА

Для оправдания затрат на создание высотной аэростатной ВЭС необходимо, чтобы ее мощность была достаточно большой, например 3000 кВт, что соответствует наиболее крупным наземным

ветроустановкам. Зависимость веса ВЭС от ее мощности для наземных установок имеет квадратичный характер [5]. Естественно, агрегаты для высотной станции будут иметь весовые характеристики, отличные от наземных. Однако, при прочих равных условиях, их зависимость от мощности будет иметь, по-видимому, подобный характер. Поэтому целесообразно разделить мощность на два агрегата, что помимо снижения общего веса позволяет более рационально разнести сосредоточенную нагрузку по жесткой части носителя, увеличить ометаемую ротором площадь и увеличить быстроходность $\mu = \frac{\omega R}{v}$, здесь ω – угловая скорость вращения ротора радиуса R ; v – скорость ветра.

Увеличение быстроходности способствует относительному уменьшению крутящих моментов и продольных сил – воздушного сопротивления ротора, а также размеров трансмиссии (мультипликатора, увеличивающего обороты вала электрогенератора). В качестве ветротурбин целесообразно применение ортогональных двухъярусных четырехлопастных роторов. По имеющимся данным [16, 17] такие роторы обеспечивают высокий коэффициент использования ветра $\eta = N_{\text{рот}}/N_{\text{вет}} = N_{\text{рот}}((\rho v^3/2)S)^{-1}$. Здесь $N_{\text{рот}}$ – мощность на валу ротора ветротурбины; $N_{\text{вет}}$ – мощность воздушного потока площадью S ; ρ – плотность воздуха на высоте расположения ротора; $S = 2RL$ – ометаемая им площадь. С учетом плотности воздуха на высоте 9,5 км ($\rho = 0,0455 \text{ кг/м}^3$) при скорости потока $v = 30 \text{ м/с}$ его мощность на 1м^2 нормальной к потоку площади составит 6 кВт/м^2 . При $Re = 1,5 \cdot 10^6$, соответствующему этим условиям, достижим коэффициент использования ветра $\eta = 0,5$, т. е. при ометаемой ротором площади $S = 1000 \text{ м}^2$ можно получить на валах генераторов мощность 3000 кВт . Роторы монтируются на общей жесткой раме, которая подвешивается к жесткой ферме аэростата на кардановых шарнирах и фиксируется растяжками. Генераторы располагаются внутри обшивки аэростата в специальных выгородках и опираются на пространственную ферменную конструкцию, которая расположена в нижней части аэростата и простирается по ширине примерно на 0,9 диаметра аэростата, а в продольном направлении – на 50–75% его длины. Таким образом, сосредоточенная нагрузка – роторы с генераторами и мультипликаторами суммарным весом до 100 т – распределяется на достаточно большую площадь оболочки. За пределами жесткой фермы необходима форму оболочки могут обеспечивать пневматические

жесткости – трубы из легких пленок, таких же, как и наружная обшивка, заполняемая газом при повышенном давлении. Форма и размеры этих жесткостей могут быть подобраны таким образом, чтобы полностью разнести нагрузку на всю нижнюю поверхность аэростата, обеспечивая как необходимую его общую жесткость, так и форму, наиболее выгодную с точки зрения сопротивления. Крутящий момент на генераторы передается через ускорительную передачу и кардановые шарниры. Основные требования к ветроэнергетической установке:

- максимальная площадь потока, ометаемая ротором при минимальной его массе;
- получение максимальной мощности (коэффициента использования ветра η);
- минимальная продольная сила (воздушное сопротивление ротора);
- общая компоновка системы должна обеспечивать ее устойчивость и минимальные усилия в конструкциях носителя и подвески.

Особого внимания требует разработка электрической части ВЭС, поскольку кабель-трос, передающий электроэнергию на землю, должен иметь приемлемые весогабаритные характеристики. Это можно получить, используя кабель высокого напряжения (порядка 10 кВ). Поэтому напряжение, поступающее на кабель, должно соответствовать этой величине.

6. КАБЕЛЬ-ТРОС

Ввиду большого веса кабель-троса в систему включается промежуточный аэростат – шар или обтекаемое тело. Этот аэростат находится вне струйного течения, на него не действуют большие горизонтальные нагрузки. Находясь значительно ниже основного носителя, он может при меньшем объеме создать подъемную силу для удержания основной части кабель-троса с высоты 8 км до земли. Для обеспечения необходимой прочности обычный кабель армируется стальной проволокой. Верхняя часть кабель-троса между аэростатом и шаром имеет постоянное сечение силовой части, а нижняя – от шара до земли – делается с переменными параметрами несущей части (постоянными на длине 1 км), которые выбираются из условия постоянства напряжений в силовой части троса по длине. При этом наружный диаметр кабель-троса по всей длине может быть одинаков; отдельные куски его длиной по 1 км соединяются малогабаритными муфтами. Так как на высоте шара возможны сильные ветры, он снабжается

коническим обтекателем, заполняемым обычным воздухом. Это снижает сопротивление шара и поперечные колебания, связанные со срывом вихрей.

Предварительные расчеты показали, что оптимальная система тросов должна отвечать следующим условиям:

1. В точке крепления троса к аэростату-носителю ВЭУ отношение избыточной подъемной силы аэростата с учетом подвешенного кабель-троса к силе бокового сопротивления должно быть не менее 4,5–5,0.

2. Избыточная сила должна быть такой, что с учетом веса верхнего троса натяжение его у шара должно иметь запас порядка 40–50% силы в точке крепления к аэростату.

3. Подъемная сила шара должна обеспечивать удержание нижней части кабель-троса с запасом 10–15 т у земли. При этом наибольшие усилия во всех сечениях верхнего и нижнего тросов будут минимальными, напряжения в верхнем тросе при перемещении вниз (к шару) будут уменьшаться, в нижнем они должны быть примерно постоянны по всей длине.

7. НАЗЕМНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ – ЯКОРЬ, ЛЕБЕДКА, ВЬЮШКА

Якорь служит для удержания системы на месте. Основным элементом якоря является винтовая свая, завинчивающаяся в грунт. Держащая сила якоря определяется, исходя из возможных максимальных усилий в кабель-тросе на уровне земли. Лебедка необходима для управления высотой аэростата при его подъеме и спуске на землю для профилактического обслуживания и ремонта – лебедка может быть выполнена в виде двух гусениц, охватывающих кабель сверху и снизу. Выходящий из лебедки кабель-трос наматывается на вьюшку. К якорю подводится высоковольтная линия передачи электроэнергии в общую сеть.

8. ПРИМЕРНАЯ СХЕМА И ПАРАМЕТРЫ ОДНОГО ИЗ ВОЗМОЖНЫХ ВАРИАНТОВ СХЕМЫ (ПРЕДЭСКИЗНОГО ПРОЕКТА) АЭРОСТАТНОЙ ВЭС МОЩНОСТЬЮ 3000 кВт

Все вышесказанное содержит общие соображения о возможности создания высотной аэростатной ВЭС – совершенно нового вида техники, не имеющего аналогов в мировой практике. Естественно, для обоснования возможности создания

такого объекта необходимо хотя бы в общих чертах разработать конструктивную схему, произвести необходимые расчеты, обосновывающие параметры ее элементов и подтверждающие реальность основных положений проекта. Одним из принципиальных моментов компоновки является размещение ВЭУ и передача энергии потребителю. В данном случае рассматривается вариант с размещением ВЭУ на высоте и передачей энергии на землю в виде электрического тока.

В расчетах и оценках (табл. 1) использовались характеристики воздуха, соответствующие стандартной атмосфере (ГОСТ 4401–73).

Наиболее важные характеристики $\rho = f(H)$ и $\gamma = f(H)$ аппроксимированы следующими выражениями, использованными в расчетах:

$$\rho_H = 0,125 - H(0,0125 - 0,00042H), \text{ кгс}^2/\text{м}^4, \quad (2)$$

$$\gamma_H = 1,225 - H(0,1225 - 0,0042H), \text{ кг}/\text{м}^3, \quad (3)$$

где γ_H – удельный вес воздуха. Эти формулы справедливы в диапазоне высот $H = 0 - 10$ км.

9. АЭРОСТАТ-НОСИТЕЛЬ. ФОРМА И РАЗМЕРЫ

Размеры аэростата определяются из условия обеспечения необходимой силы для удержания ветроэнергетической установки, части кабель-троса, а также запаса избыточной подъемной силы, предотвращающей снос системы по течению. С этой целью были рассчитаны следующие параметры для серии подобных аэростатов – объем, площадь поверхности наружной обшивки, площадь миделевого сечения, пятикратный вес обшивки-пленки (с учетом необходимости устройства автономных баллонетов, продольных и поперечных мембран, обеспечивающих необходимую форму корпуса, усиления обшивки в местах приложения сосредоточенных нагрузок). В табл. 2 приведены ординаты (радиусы поперечных сечений), определяющие форму аэростата.

В качестве оболочки используется тонкостенная дакроновая пленка массой 28–55 г/м². Для серии геометрически подобных объектов рассчитаны величины подъемной силы $\gamma_0 V$, где γ_0 – подъемная сила 1 куб. метра объема на высоте $H = 9,5$ км с учетом веса водорода, равная разности удельного веса воздуха и водорода; V – полный объем аэростата. На рис. 1 кривая 1 определяет зависимость полной подъемной силы аэростата от диаметра миделевого сечения D . Кривая 2 представляет подъемную силу за вычетом веса оболочки,

Таблица 1. Характеристики стандартной атмосферы

Высота H , м	0	2000	4000	6000	8000	9000	10000	12000
Температура, $^{\circ}C$	15	2	- 10,98	-23,96	- 36,94	-43,42	- 49,9	- 55,5
Барометрическое давление, кг/м ²	10332,3	8106,5	6287	4795	3635	3140	2701	1977,3
Плотность ρ_n , кгс ² /м ⁴	0,1249	0,1026	0,0836	0,0673	0,0536	0,0476	0,0422	0,0318
Удельный вес γ , кгс/м ³	1,225	1,0065	0,8193	0,6601	0,5258	0,4670	0,4135	0,312
$\nu = \mu/\rho \cdot 10^{-5}$	1,161	1,715	2,03	2,42	2,9	3,196	3,52	4,50

Таблица 2. Относительные размеры радиусов аэростата

N сечения	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
r_i/r_{max}	0	0,684	0,910	1,00	0,962	0,844	0,661	0,479	0,260	0

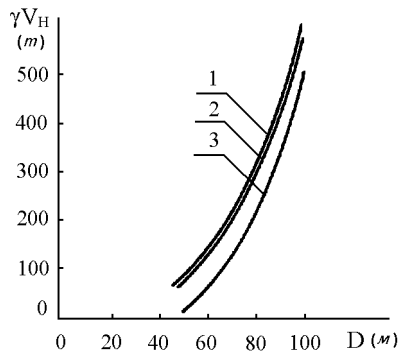


Рис. 1. Зависимость подъемной и избыточной подъемной силы аэростата от его диаметра

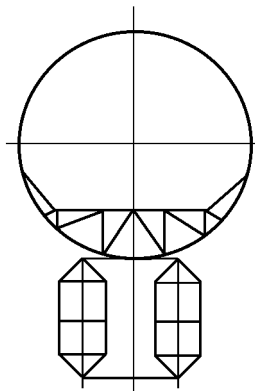


Рис. 2. Схема компоновки ветроэнергетической установки

который является функцией размеров, в частности, диаметра аэростата, а кривая 3 – избыточную подъемную силу, удерживающую систему в положении, близком к вертикальному. Для обеспечения возможности подвески роторов ветроустановки, размещения ускоряющих трансмиссий и электрогенераторов в нижней части аэростата предусматривается пространственная жесткая фермен-

ная конструкция, назначение которой – удерживать сосредоточенный груз (ветроэнергетическую установку), равномерно распределять от него нагрузку на большую поверхность оболочки и обеспечивать необходимую форму нижней части аэростата. Эта конструкция может быть набрана из тонкостенных дюралевых труб. Ее размеры составляют примерно 70% длины и ширины аэростата. Приближенные расчеты показали, что ее масса при $D = 100$ м составит 15,3 т, а при $D = 70$ м – 12,2 т. Форма аэростата – обтекаемое тело вращения с наиболее выгодным отношением длины к диаметру $L/D = 3,5$, при котором коэффициент сопротивления $C_x = 0,048$ (при $Re = (5 \div 6) \cdot 10^5$). Практически C_x для больших объектов типа дирижаблей будет несколько выше, $C_x = 0,065 - 0,07$ [13].

Приняв эти значения C_x , при $v = 30$ м/с, продольных размерах аэростата $L = 87,5 - 350$ м и поперечных $D = 25 - 100$ м (поперечное сечение в виде круга), получим продольную силу сопротивления R_x .

Ветроэнергетическая установка может быть реализована в виде двух двухъярусных роторов с вертикальной осью вращения (рис. 2). Роторы четырехлопастные, по две лопасти в каждом ярусе. Диаметр ротора $d_p = 20$ м, высота $l_p = 30$ м. Роторы монтируются на общей жесткой раме, составленной из горизонтальных траверс и вертикальных валов. Рама с роторами фиксируется в рабочем положении с помощью жестких продольных и поперечных оттяжек, замыкаемых на жесткий каркас аэростата. Площадь, ометаемая одним ротором, $S_p = 600$ м² при скорости ветра $v = 30$ м/с обеспечивает мощность потока $N_p = (1/2)\rho V^3 S = 3680$ кВт. По данным [16, 17] роторы подобной конструкции обеспечивают при $Re = 8,5 \cdot 10^5$ коэффициент использования ветра $\eta = 0,4 - 0,43$. При реальных значениях

$Re > 4 \cdot 10^6$ этот коэффициент может быть еще выше. Таким образом, принятые размеры роторов при $v = 30$ м/с могут создать суммарную мощность не менее 3160 кВт.

Приближенная оценка массы этих элементов ВЭУ сделана на основе имеющихся данных для наземных ВЭС, несколько средуцированных (на 25–30%) с учетом прогресса техники и применения (там, где возможно) более легких материалов и конструкций.

В итоге суммарный вес ВЭУ принят равным 66,7 т. Расчеты, выполненные по схеме работы [18], показали, что при оптимальных условиях работы продольная сила, действующая на роторы, составляет 5,8–6 кг на 1 кВт мощности. Рис. 3 дает представление о зависимости суммарной силы сопротивления носителя и роторов P_x от диаметра аэростата.

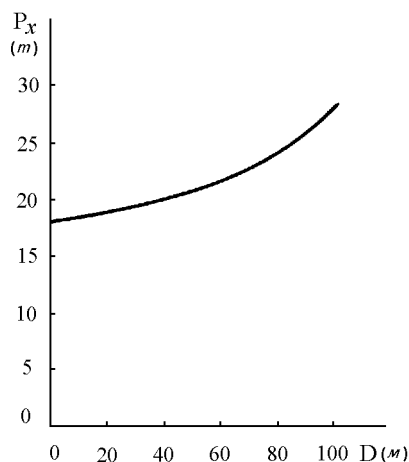


Рис. 3. Суммарное сопротивление аэростата и роторов при скорости потока $v = 30$ м/с.

На рис. 4 представлено отношение избыточной подъемной силы к суммарному сопротивлению аэростата и ВЭУ. Приведенный график показывает, что приемлемое отношение, обеспечивающее оптимальный угол наклона верхнего троса ($\operatorname{tg} \alpha \cong 5$), достижимо при $D \cong 70$ м, что является определяющим при назначении размеров аэростата.

Ввиду отсутствия кабель-тросов с приемлемыми для данного случая параметрами, последний может быть выполнен в виде комбинации обычного электрического кабеля, армированного стальной проволокой. В качестве кабеля может быть использован трехжильный кабель ААГ на 10 кВт [19], сечением 150×3 мм², диаметром $d = 41,6$ мм и погонным весом $q_k = 2,835$ кг/м. Допустимая нагрузка по току в воздухе $J = 270$ А [20], что с учетом низкой температуры воздуха на большей

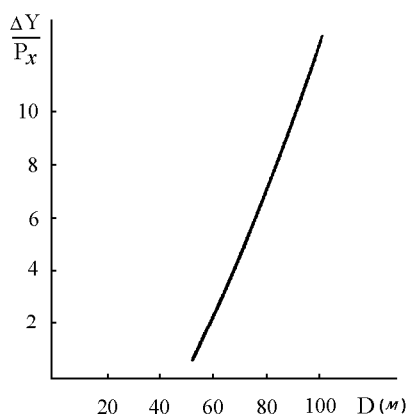


Рис. 4. Зависимость отношения избыточной подъемной силы к сопротивлению от диаметра аэростата

части кабель-троса (с высоты 4 км $t = -11^\circ\text{C}$ и ниже) обеспечивает передачу мощности $N = 3000$ кВт. Для создания прочности кабель армируется высокопрочной стальной проволокой диаметром 1 мм по ГОСТ 5047-49 с пределом прочности при растяжении $\sigma_{вр} = 250$ кг/мм² [21]. В расчетах принимаем $\sigma_{доп} = 200$ кг/мм², при этом прочность собственно кабеля (алюминиевых жил) не учитывается (принимается в запас).

Суммарное сечение стальных проволок переменное по высоте (и постоянно в пределах одного километра). При этом суммарная сила в k -й точке (считая снизу) будет

$$P_{кт} = q_k K + 0,5K(K+1)\gamma_c F + P_{ш}, \quad (4)$$

где q_k – погонный вес собственно кабеля, т/км; $\gamma_c = 0,785$ т/км – вес стальной призмы сечением 1 см² и длиной 1 км; F – площадь несущей части первого участка; $P_{ш}$ – сила на верхнем конце нижней части кабель-троса, необходимая для удержания шара. В каждой точке кабель-троса должно соблюдаться условие

$$\frac{P_{кт}}{FK} \leq \sigma_{доп}, \quad (5)$$

где K – номер километрового участка кабеля. При этом считается, что площадь несущей части изменяется по закону $F_\Sigma = FK$, считая снизу. Используя выражения (4) и (5), можно получить следующее условие:

$$FK = \frac{P_{ш} + q_k K}{\sigma_{доп} - 0,5(K+1)\gamma_c}, \quad (6)$$

которое справедливо для одного, фиксированного значения $P_{ш}$.

По формуле (6) были рассчитаны площади сечений несущей части кабель-троса, начиная с его

верхнего конца (от шара). Полученные характеристики кабель-троса аппроксимированы следующими формулами:

наружный диаметр кабель-троса

$$\epsilon = 0,052 - 0,0006K^\circ, \quad \text{м} \quad (7)$$

(счет сверху, K° – номера участков длиной 1 км); сечение несущей (стальной) части

$$F(K^\circ) = 6 - 0,3K^\circ, \quad \text{см}^2; \quad (8)$$

погонный вес (вес 1 км)

$$b_k^\circ = 7,5 - 0,25K^\circ, \quad \text{т/км}. \quad (9)$$

Воздушный шар располагается на заранее неизвестной высоте. Она определяется в ходе расчета и приближенно равна высоте нижнего конца верхнего участка кабель-троса. Подъемная сила шара определяется как разность $\gamma_{\text{ш}}V_{\text{ш}} - Q_{\text{ш}}$, где $\gamma_{\text{ш}}$ – подъемная сила 1 м³ объема шара на высоте его расположения, $V_{\text{ш}} = 0,523D_{\text{ш}}^3$ – его объем, а $Q_{\text{ш}} = \pi D_{\text{ш}}^2 q_0$ – масса оболочки шара. С учетом массы строп, клапанов, обтекателя, масса одного квадратного метра оболочки q_0 принимается равной 0,165 кг.

Окончательно подъемная сила шара определяется по формуле

$$\begin{aligned} \gamma_{\text{ш}}V_{\text{ш}} - Q_{\text{ш}} = & 0,487D_{\text{ш}}^3[1,225 - \\ & - H_{\text{ш}}(0,1225 - 0,0042H_{\text{ш}})] - 0,517D_{\text{ш}}^2. \end{aligned} \quad (10)$$

Предполагая наличие обтекателя, для коэффициента сопротивления шара $C_{x\text{ш}} = 0,082$ горизонтальная сила при действии ветра на шар определяется выражением

$$R_{\text{ш}} = 0,3925C_{x\text{ш}}\rho_{\text{ш}}v_{\text{ш}}^2D_{\text{ш}}^2. \quad (11)$$

Исследование равновесной конфигурации системы, подобной рассматриваемой, описано в статье [22]. В нашем случае используется следующая схема расчета. Задано:

γ_{H_0} – удельный вес воздуха на высоте аэростата за вычетом удельного веса водорода;

V_a – объем аэростата-носителя;

T – вес аэростата и ветроэнергетической установки;

$l_1, l_2, l_T, \alpha_1, h_p, R_p, R_a$ – задаются (рис. 5).

Уравнения статики, определяющие положение равновесия:

$$P_1 \cos \alpha_1 + P_2 \cos \alpha_2 = R_a + R_p,$$

$$P_1 \sin \alpha_1 + P_2 \sin \alpha_2 = \gamma_0 V_a - T,$$

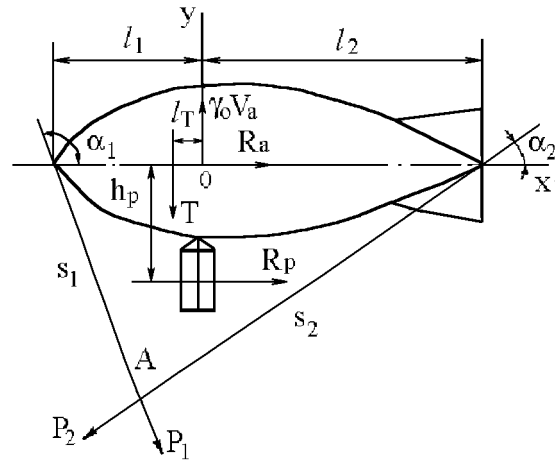


Рис. 5. Схема аэростата и системы удерживающих оттяжек

$$P_1 l_1 \sin \alpha_1 - P_2 l_2 \sin \alpha_2 = T l_T - R_p h_p, \quad (12)$$

$$S_2 \cos \alpha_2 - S_1 \cos \alpha_1 = l_1 + l_2,$$

$$S_1 \sin \alpha_1 = S_2 \sin \alpha_2.$$

Удерживающие аэростат оттяжки (см. рис. 5) считаются прямыми линиями, их вес не учитывается.

Из уравнений (12) определяются:

$$\sin \alpha_2 = \frac{S_1 \sin \alpha_1}{\sqrt{(l_1 + l_2 + S_1 \cos \alpha_1)^2 + S_1^2 \sin^2 \alpha_1}},$$

$$S_2 = \sqrt{(l_1 + l_2 + S_1 \cos \alpha_1)^2 + S_1^2 \sin^2 \alpha_1},$$

$$P_1 = \frac{T l_T + l_2 (\gamma_0 V_a - T) - R_p h_p}{(l_1 + l_2) \sin \alpha_1},$$

$$P_2 = \frac{(\gamma_0 V_a - T) l_1 - T l_T + R_p h_p}{(l_1 + l_2) \sin \alpha_2}. \quad (13)$$

Полученные зависимости справедливы при соблюдении следующих условий:

$$P_1 > 0; \quad P_2 > 0. \quad (14)$$

При несоблюдении этого схема (размещение грузовок длины оттяжек) должна быть изменена так, чтобы условие (14) соблюдалось. В точке А силы P_1 и P_2 могут быть представлены в виде вертикальной и горизонтальной составляющих P_v и P_r – компонентов натяжения кабель-троса в его верхнем конце:

$$P_v = P_1 \sin \alpha_1 + P_2 \sin \alpha_2,$$

$$P_r = P_1 \cos \alpha_1 + P_2 \cos \alpha_2. \quad (15)$$

Для расчета положения равновесия системы, конфигурации и усилий в ее элементах используется метод конечных элементов в следующем виде: оба участка кабеля заменяются системой жестких шарнирносоединенных звеньев. Количество звеньев верхнего участка составляет 10 – 12, количество звеньев нижнего участка определяется в процессе расчета. Задаются лишь параметры: длина звена, ее вес и коэффициенты воздушного сопротивления. Задача ставится таким образом. Задаются:

- высота аэростата-носителя H_a ;
- параметры верхней части кабель-троса между аэростатом и промежуточным шаром (длина l , вес звена b , коэффициент сопротивления C_x);
- количество звеньев;
- компоненты натяжения кабель-троса в верхнем его конце (в точке А, рис. 5);
- величина скорости ветра в центре i -го звена $v_i = f_1(H_i)$;
- размеры, вес, характеристики сопротивления и подъемной силы промежуточного шара (согласно выражений (10), (11));
- длина l_0 , диаметр e_{0i} , вес b_{0i} , коэффициент сопротивления звеньев нижнего участка кабель-троса. Диаметр и погонный вес верхнего участка – постоянные по всей длине, нижнего участка – переменные.

Метод состоит в последовательном вычислении углов наклона и усилий на нижнем конце каждого звена по рекуррентным формулам по подпрограмме, разработанной В.Н. Семененко [23].

Угол наклона k -го звена определяется путем решения трансцендентного уравнения на каждом звене:

$$P_i l x_i^2 + 2N_{(i-1)i} x_i + (l b_i - 2T_{(i-1)i}) \sqrt{1 - x_i^2} = 0. \quad (16)$$

Здесь $N_{(i-1)i}$ и $T_{(i-1)i}$ – компоненты силы в i -ом шарнире;

$$P_i = \Delta_i \frac{\rho_i v_i^2}{l}; \quad x_i = \sin \alpha_i; \quad \Delta = \frac{1}{2} C_x e l b.$$

Полученные значения $\sin \alpha_k$ и $\cos \alpha_k$ вводятся в рекуррентные уравнения для определения компонентов усилий на нижнем конце k -го звена (рис. 6):

$$N_{(k-1)k} + \Delta \rho_{ок} v_k^2 \sin^3 \alpha_k = N_{k(k+1)},$$

$$T_{(k-1)k} - \Delta \rho_{ок} v_k^2 \sin^2 \alpha_k \cos \alpha_k - l b_k = T_{k(k+1)}, \quad (17)$$

$$[N_{(k-1)k} + N_{k(k+1)}] \sin \alpha_k = [T_{(k-1)k} + T_{k(k+1)}] \cos \alpha_k,$$

$$H_k = H - l \left[\sum_{i=1}^{i=k-1} \sin \alpha_i + \frac{1}{2} \sin \alpha_k \right], \quad (18)$$

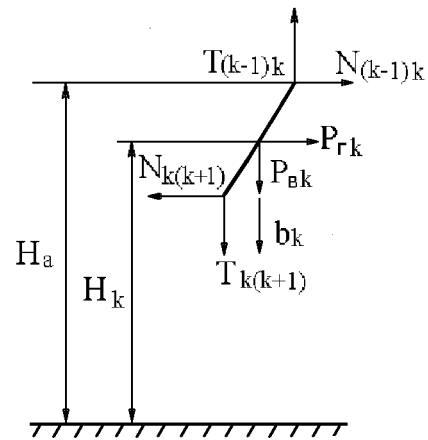


Рис. 6. Схема расчета усилий и формы кабель-троса методом конечных элементов

$\rho_{0i} = f_2(H_i)$ задается формулой (2),

$$P_{rk} = \Delta \rho_k v_k^2 \sin^3 \alpha_k. \quad (19)$$

Расчет верхней части кабель-троса ведется до последнего заданного звена (10 – 12), нижний конец которого определяет высоту точки Б – точки крепления кабель-троса к промежуточному шару. Далее в расчет вводятся дополнительные силы (рис. 7) $\gamma_{ш} V_{ш}$, $R_{ш}$, $Q_{ш}$, которые суммируются с силами на нижнем конце последнего звена. Расчет нижней части кабель-троса проводится аналогично вышеописанному для верхнего участка. Принципиальная разница состоит в том, что число звеньев неизвестно, счет ведется до тех пор, пока не станет отрицательной величина Z_m^0 :

$$Z_m^0 = H_a - l \sum_1^{12} \sin \alpha_i - l_0 \sum_1^m \sin \alpha_{01}. \quad (20)$$

Здесь l_0 – длина звена нижнего участка кабеля. В этом случае корректируется длина m -го звена таким образом, чтобы величина Z_m^0 равнялась нулю (рис. 8). Определяется $l_{m\phi}^0 = l_0 - (|Z_m^0|) / (\sin \alpha_m^0)$, при этом $Z_{m\phi}^0 = H$,

$$Y_{m\phi}^0 = l \sum_1^{12} \cos \alpha_i + l^0 \sum_1^m \cos \alpha_i^0 - \frac{|Z_m^0|}{\text{tg} \alpha_m^0}. \quad (21)$$

Натяжение во всех шарнирах определяется по формуле

$$C_i = \sqrt{T_{i(i+1)}^2 + N_{i(i+1)}^2}.$$

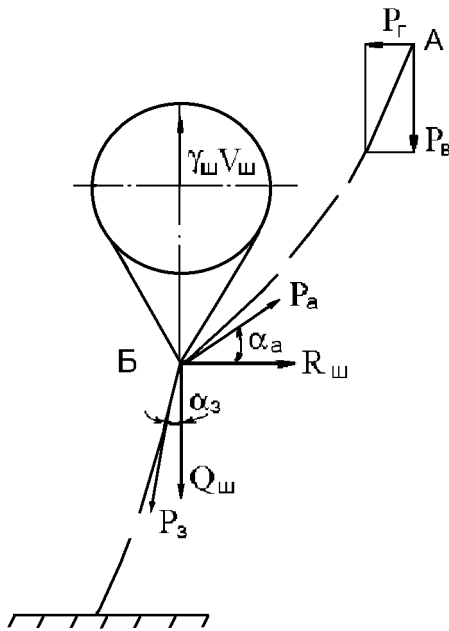


Рис. 7. Силы, действующие на аэростат, поддерживающий кабель

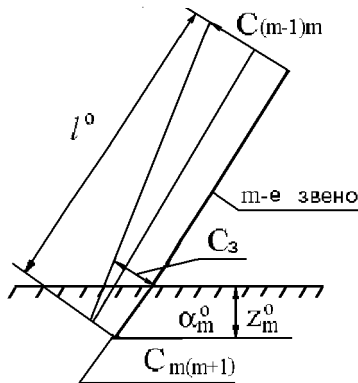


Рис. 8. Схема корректировки длины нижнего звена кабель-троса

В точках А и Б

$$C_A = \sqrt{P_B^2 + P_T^2}, \quad C_B = \sqrt{T_{12(13)}^2 + N_{12(13)}^2}.$$

В шарнирах нижнего троса

$$C_i^0 = \sqrt{T_{i(i+1)}^{02} + N_{i(i+1)}^{02}}. \quad (22)$$

На земле (считая, что в пределах звена натяжение изменяется линейно, см. рис. 8)

$$C_3 = \frac{[C_{(m-1)m} - C_{m(m+1)}]|Z_m^0|}{l_0 \sin^2 \alpha_m} + C_{m(m+1)}. \quad (23)$$

В результате расчета определяются: координаты Y_i, Z_i всех шарнирных точек, в которых соединяются звенья; суммарное смещение аэростата и шара по горизонтали; компоненты усилий; натяжение; растягивающие напряжения в шарнирных точках.

Пример расчета. На рис. 9 в качестве примера приведены результаты расчета конфигурации, усилий и напряжений в элементах системы при следующих условиях. Высота расположения аэростата (ВЭУ) – $H_a = 9,5$ км; скорость ветра при $H = 9 - 11$ км составляла $v = 30$ м/с; избыточная подъемная сила аэростата $T_{01} = 75$ т; полное сопротивление аэростата и роторов ВЭУ $N_{01} = 25$ т; подъемная сила шара $T_{01}^0 = 23$ т; воздушное сопротивление шара

$$R_{ш} = 8,24 \rho_{ш} V_{ш}^2, \quad v_{ш} = (30/9,5) H_{ш}, \quad (\text{м/с});$$

$$\rho_{ш} = 0,125 - H_{ш}(0,0125 - 0,00042 H_{ш}), \quad (\text{кгс}^2/\text{м}^4).$$

Кабель-трос: верхняя часть – диаметр $e_k = 0,052$ м, сечение несущей части $F_k = 6$ см²; нижняя часть $e_k^0 = 0,052 - 0,0006 K^0$; $F_k^0 = 6 - 0,3 K^0$ (см²). Счет сверху вниз K^0 – номер участка длиной 1 км; $b_k^0 = 7,5 - 0,25 K^0$ (т/км).

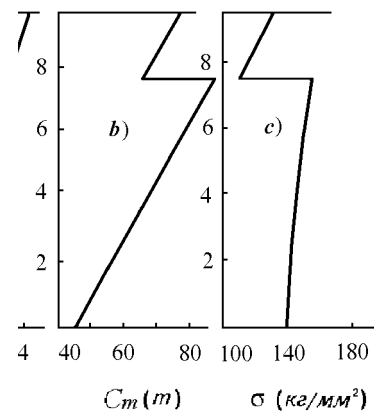


Рис. 9. Результаты расчетов: а) – конфигурация системы, б) – натяжение C_m , в) – напряжение σ (кг/мм²) в материале кабель-троса

Полная длина кабель-троса $S_k = 10,5$ км, а $S_k/H_a = 1,1$. Расчеты равновесия системы показали что, при значении $P_{ш} = 23$ т, принятом в расчет из условия оптимизации длины нижнего кабель-троса, напряжения в нем примерно постоянны и не превышают $\sigma_{доп}$ (см. рис. 9).

Серия подобных расчетов показала, что система работоспособна в широком диапазоне внешних условий. При значительном превышении скорости

потока по сравнению с расчетной верхняя часть отклоняется по потоку до тех пор, пока аэростат не войдет в зону пониженной скорости ветра, равной расчетной.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рассмотренном варианте проекта ВЭС расчеты и оценки производились на основе реальных характеристик материалов и оборудования, существующих уже 20–30 лет. С учетом прогресса в смежных отраслях техники – аэродинамике аэростатов, производстве легких прочных материалов, производстве компактных электрогенераторов и трансмиссий, силовых кабелей – весовые характеристики системы могут быть значительно улучшены. В то же время, развитие нового направления ветроэнергетики будет стимулировать исследования и прогресс в этой области, что также будет способствовать повышению технического совершенства и основных технико-экономических показателей.

В настоящей статье рассмотрены наиболее важные, узловые вопросы, связанные с созданием высотных ВЭС, определяющие реальность их создания. Множество важных, но не решающих вопросов: устойчивость и динамика системы, вибрация связей, усталостная прочность, внутренняя конструкция аэростата – баллонеты, клапаны, воздушные коммуникации, управление оттяжками для получения необходимой дифферентовки, технология подъема, спуска, периодическая компенсация утечек рабочего газа, оптимизация параметров системы (использование одного комплекта передвижного наземного оборудования лебедка-вьюшка, средств ремонта и обслуживания для нескольких ВЭС, расположенных на определенной территории), грозовая защита, обеспечение взрывобезопасности рабочего газа, безопасности воздушных сообщений и другие – могут быть при необходимости подробно рассмотрены. Успешное решение их может быть достигнуто на основе современных технических возможностей.

1. Лобанов В. А. Справочник по технике освоения шельфа. – Л.: Судостроение, 1983. – 288 с.
2. Энергия ветра. Оценка технического и экономического потенциала / Ред. Я. И. Шефтер. – М.: Мир, 1982. – 256 с.
3. Шефтер Я. И. Использование энергии ветра. – М.: Энергия, 1975. – 177 с.
4. Андрианов В. Н., Быстрицкий Д. Н., Вашкевич К. П., Секторов В. Р. Ветроэнергетические станции. – М., Л.: Гос. Энергетич. изд-во, 1960. – 320 с.
5. Зубарев В. В., Минин В. А., Степанов И. Р. Использование энергии ветра в районах Севера. – Л.: Наука, 1989. – 167 с.
6. Вашкевич К. П. Некоторые особенности аэродинамики сетевых ветроэнергетических установок с неуправляемыми ветроколесами // Тр. ЦАГИ. – 1999. – N 2634. – С. 226–235.
7. Итоги науки и техники. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии. Т. 2., гл. 5 // М. – Ветроэнергетика. – 1987. – С. 99–110.
8. Джорджио В. А. Струйное течение // Метеорология и гидрология. – N 6. – 1956. – С. 49–60.
9. Воробьев В. И. Струйные течения в высоких и средних широтах. – Л.: Гидрометеорологическое издательство, 1960. – 234 с.
10. Борисенков Е. П. Диагноз и прогноз положения и интенсивности струйных течений // Метеорология и гидрология. – N 8. – 1957. – С. 210–237.
11. Погосян Х. П. Сезонные особенности распределения струйных течений в северном полушарии // Метеорология и гидрология. – 1957. – N 9. – С. 3–14.
12. Погосян Х. П. О некоторых особенностях струйных течений в атмосфере // Изв. АН СССР. – Сер. Геофизическая. – 1958. – N 4. – С. 515–526.
13. Броуде Б. Г. Воздухоплавательные летательные аппараты. – М.: Машиностроение, 1976. – 140 с.
14. Болтянский А. П., Щерба В. Е. Управление динамикой полета и маневрированием аэростатических летательных аппаратов // Тез. докл. межд. науч.-техн. конф-ции "Динамика систем, механизмов и машин". – 1995. – Омск, 1995. – Кн. 2. – С. 113.
15. Арие М. Я. Дирижабли. – К.: Наук. думка, 1986. – 264 с.
16. Бакушин П. Г., Вашкевич К. П., Самсонов В. В. Экспериментальное исследование аэродинамических характеристик ортогональных крыльчатых ветроколес // Сб. научн. тр. Гидропроекта, Вып. 129. – Ветроэнергетические станции. – 1988. – С. 98–105.
17. Горелов Д. Н., Кузьменко Ю. Н. Экспериментальная оценка предельной мощности ветроколеса с вертикальной осью вращения // Теплофизика и аэромеханика. – 2001. – N 2. – С. 329–334.
18. Лятхер В. М., Милитеев А. Н., Милитеев Д. Н. Аэродинамические нагрузки на элементы ветроагрегатов с вертикальной осью вращения // Изв. АН СССР. – Энергетика и транспорт, N 4. – 1986. – С. 138–146.
19. Белюсов Н. И., Саакян А. Е., Яковлева А. И. Электрические кабели, провода и шнуры. Справочник, 4 издание. – М.: Энергия, 1979. – 416 с.
20. Электротехнический справочник. Т 1 / Под ред. П. Г. Грудинина и др., 5 издание. – М.: Энергия, 1974. – 775 с.
21. Справочник машиностроителя. Т. 4. – М.: Машгиз, 1956. – 851 с.
22. Грумондз В. Т., Орданович А. Е., Матус В. Д. Исследование равновесной конфигурации и установившегося движения гибридной аэротросовой системы в градиентном ветровом потоке // Изв. ВУЗ'ов, Авиационная техника. – 1997. – N 4. – С. 31–35.
23. Королев В. И., Семенов В. Н. Метод расчета положения равновесия тела, удерживаемого нитью в потоке с произвольной эпюрой скорости // Гидромеханика. – 1975. – Вып. 32. – С. 83–86.