

О ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ПОТЕНЦИАЛА АТМОСФЕРЫ ЗНАЧИТЕЛЬНЫХ ВЫСОТ

Лапшин Ю.С.

доктор технических наук, профессор,
Институт общей энергетики
Национальной академии наук Украины

Сделана попытка доказать (методами математического моделирования) техническую возможность и экономическую целесообразность освоения энергетического потенциала атмосферы значительных высот. *Ключевые слова:* кевлар, леер, привязь.

Про можливість використання енергетичного потенціалу атмосфери значних висот. Лапшин Ю.С. Зроблено спробу довести (методами математичного моделювання) технічну можливість та економічну доцільність освоєння енергетичного потенціалу атмосфери значних висот. *Ключові слова:* кевлар, леер, прив'язь.

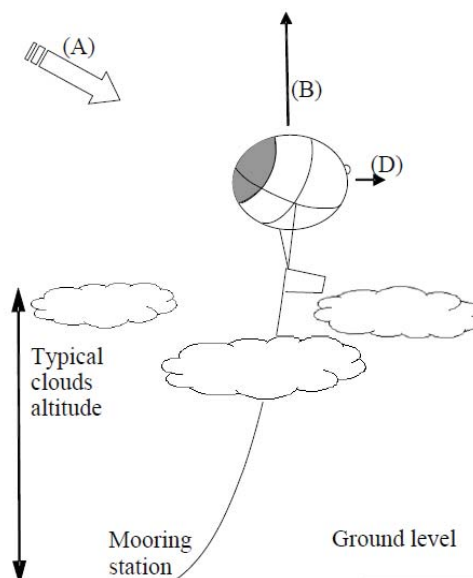
On the possibility of using the energy potential of the atmosphere of considerable heights. Lapshyn Yu. An attempt is made to prove (by methods of mathematical modeling) the technical feasibility and economic feasibility of mastering the energy potential of an atmosphere of considerable heights. *Key words:* kevlar, leer, tether.

Постановка проблемы. Первые шаги в направлении использования энергии атмосферы больших высот были сделаны русским изобретателем А.В. Пастуховым, запатентовавшим в 1921 г. идею размещения ветровой электростанции на воздушном змее. Группа английских изобретателей в 2007 г. оформили патент на предложение об удержании в оптимальном рабочем положении фотоэлементов на высоте 6 000 м над уровнем моря с помощью аэростата [1].

Привлекательность этих идей очевидна. Если в приземных слоях атмосферы среднегодовая скорость ветра (в Украине) 5 м/с, то на высоте 5 км этот показатель – 18 м/с [1]. При этом отношение удельной мощности ветра приземного слоя к удельной мощности ветра на 5-километровой высоте будет 1/27 [2]. Фотоэлементы, размещенные над облаками (см. рис. 1), по сравнению с их наземным вариантом получают в несколько раз больше солнечной энергии, будут интенсивнее охлаждаться воздухом и меньше страдать от запыления [1].

Однако техническая реализация этих предложений осуществима с трудом. Препятствием для изготовления экономически оправданного гелиоэнергетического варианта является сильный ветер, который будет создавать огромное давление на верхнюю часть конструкции. В этом случае привязь (леер, tether – англ.), связывающая верхнюю часть конструкции с наземным якорем (фундаментом), в точке её крепления к верхней части конструкции будет испытывать усилие на разрыв, равное геометрической сумме таких составляющих: силы давления ветра на верхнюю часть конструкции, веса

привязи и вертикальной составляющей силы отрыва привязи от фундамента (в точке присоединения привязи к фундаменту). Расчеты показывают, что только при использовании самых прочных современных материалов появится возможность изготовления работоспособной конструкции. Но в этом случае пока невыполнимо требование экономической целе-



*Рис. 1. Фотоэлементы над облаками
(заимствовано из [1])*

Примечание: А – направление солнечных лучей, В – вектор подъемной силы аэростата, D – направление ветра, Typical clouds altitude – обычная высота облаков, Mooring station – якорь, Ground level – уровень земли

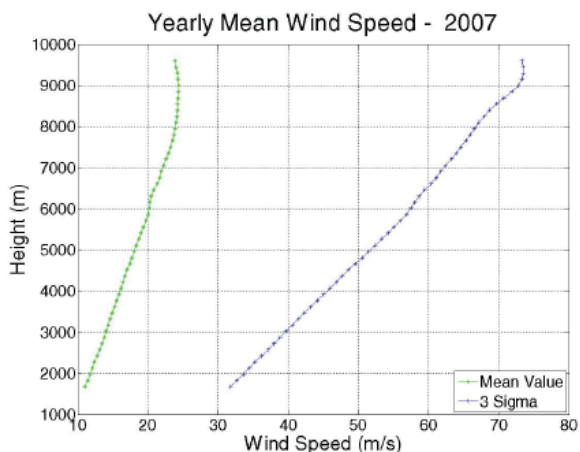


Рис. 2. Изменение скорости ветра с высотой

Примечание: Height – высота, Yearly Mean Wind Speed – среднегодовая скорость ветра, Mean Value – средняя величина

сообразности. В работе «О возможности повышения гелиоэнергетического потенциала Украины» [2] содержится попытка улучшить ситуацию следующим способом. Предложно снабдить аэростат внутренними перегородками, выполненными из гибких материалов, то есть перегородками из легких, но прочных пленок. Каждая из образованных пленками ячеек индивидуально наполняется легким газом из общей емкости. Управляемые компьютером система распределения газа и компрессор могут возвращать газ в эту ёмкость. Таким образом, как объём, так и форма аэростата будут изменяться в соответствии с заложенной в компьютер программой. Основная цель – придать аэростату такую форму, при которой он будет обладать максимальным аэродинамическим качеством. То есть аэростат представлял бы собой гибкое крыло. В этом случае нагрузка на привязь будет наименьшей. Гибкие фотоэлементы, покрытые прозрачной водоотталкивающей

пленкой, следует разместить на верхней поверхности гибкого крыла.

Наибольших практических результатов в освоении энергии ветра значительных высот добилась фирма «Makani Power» [3]. Испытываемая этой фирмой конструкция выполнена в виде самолета, получающего на период приведения конструкции в рабочее положение электропитание от наземного источника (по кабелю, совмещенному с привязью). После подъёма на высоту 140–310 м конструкция отключается от наземного питания и работает в режиме воздушного змея. При этом пропеллеры выполняют функцию ветроколес. Существенно расширяет диапазон работоспособности и повышает мощность устройства использование эффекта рыскания. Однако, по нашему мнению, эта конструкция обладает двумя недостатками:

- чтобы противостоять шквальным порывам ветра, требуется привязь с большим запасом прочности, что утяжеляет конструкцию и делает её непригодной для освоения энергии ветра больших высот;
- использование эффекта рыскания приводит к колебаниям величины генерируемой мощности, что при работе на государственную сеть приведет к необходимости ввода дополнительных регулирующих мощностей.

С другой стороны, желательно освоить энергетический потенциал больших высот, возможности которого отражает график распределения среднегодовых и максимальных скоростей ветра на различных высотах (заимствовано из [1]), представленный на рисунке 2.

В работе «К вопросу о леерной энергетике, использующей ветры больших высот» [4] нами выполнено теоретическое исследование альтернативной конструкции, схема которой дана на рисунке 3.

Охарактеризуем составляющие элементы на этом рисунке. Жесткие крылья – это система, состоящая из планеров, дельтапланов, гибких крыльев или их комбинаций. Назначение этой системы – удержание (с помощью ветра) рамы и леера в рабочем положении. Рама – это рабочая часть ветроэлектростанции с ветроколесами и генераторами, работающими в режиме электродвигателей в период приведения конструкции в рабочее положение, а также в процессе приземления. Аэростаты-крылья – это аэростаты, которые при наличии ветра (как и в случае с фирмой «Makani Power» [3]) переводятся в режим работы гибкого крыла. Леер – это привязь, совмещенная с кабелем и гибким трубопроводом легкого газа в случае, когда газгольдер находится не внутри аэростата, а на земной поверхности.

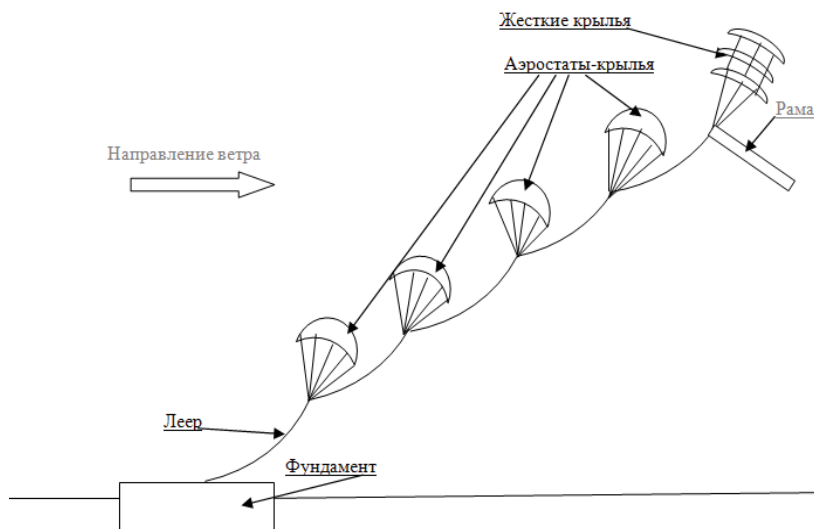


Рис. 3. Леерная ветроэлектростанция с аэростатами

Предмет и методы исследований.

Данная работа содержит предложения по усовершенствованию конструкции, представленной на рисунке 3. Как и наши предшественники, оставим без рассмотрения вопросы борьбы с обледенением и защиты от молний. Также мы не разрабатывали систему автоматического управления работой предлагаемой системы, не осуществляли математическое моделирование работы системы в условиях перегрузок, вызываемых шквальными порывами ветра, а ограничились введением коэффициента 3 в расчетах статической схемы, предполагая, что эти проблемы технически разрешимы. Обращаем внимание на то, что предлагаемая конструкция обладает (в некоторой степени) способностью к саморегулированию. С усилением ветра увеличится угол отклонения рамы от вертикали. При этом уменьшится площадь перехватываемого рамой ветрового потока и возрастет подъёмная составляющая действующей на раму силы ветра. При этом будут несколько сглаживаться пики колебаний мощности. Для обеспечения безопасности работы данной конструкции следует адаптировать к нашим условиям существующую систему защиты наземных ветроэлектростанций от перегрузок.

Основной задачей исследования являлось доказательство преимуществ данной конструкции перед конструкцией фирмы «Makani Power». Эти преимущества определяются такими факторами, как использование более регулярных и мощных ветров больших высот, более стабильный график выработанной энергии. Это приведет к уменьшению отчуждаемых территорий, снижению травматизма летающих животных и эстетического загрязнения. К тому же появляется дополнительная возможность для освоения энергии Солнца при малых финансовых затратах. Имеются и недостатки: необходимость сужения зоны действия авиации, удлинение кабеля (до 8 000 м), которое вызовет существенное утяжеление и удорожание конструкции. Однако, по нашему мнению, преимущества перевешивают недостатки, и предлагаемая конструкция заслуживает дальнейшего детального теоретического изучения с последующим исследованием действующих макетов. Некоторые шаги в этом направлении отражены в работе.

Изложение основного материала. Предлагаемый вариант конструкции представлен на рисунке 4.

Здесь под вертолетной системой понимается устройство, обеспечивающее за счет электропитания от наземного источника подъёмную силу в точке присоединения устройства к жестким крыльям. Остальные обозначения те же, что и на рисунке 2.

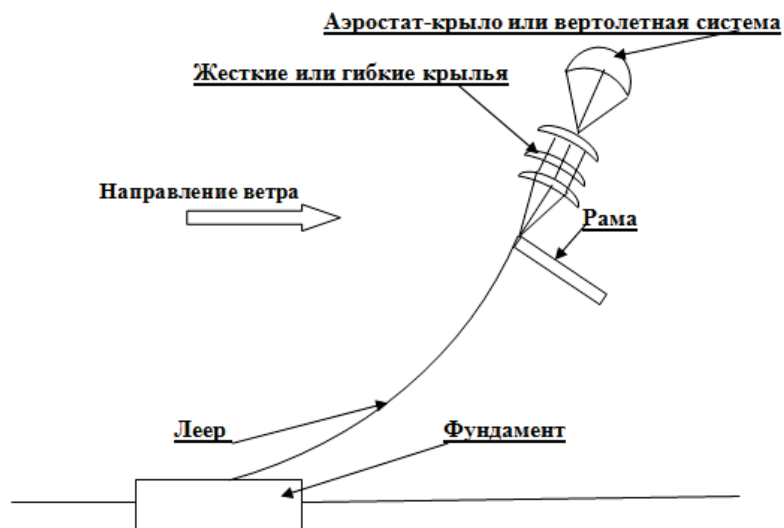


Рис. 4. Леерная ветроэлектростанция

Горизонтальная составляющая силы давления ветра на систему ветроколес (F_b) определяется из уравнения, описывающего изменение количества движения действующей на турбину массы ветра:

$$F_b \times t = mV_1 - mV_2, \tag{1}$$

где F_b – сила давления ветра на систему ветроколес; t – время воздействия ветра (1 с); m – масса воздуха, воздействующая на ветроколес; V_1 – скорость ветра, подходящего к системе ветроколес; V_2 – скорость ветра после ветроколес.

Вывод уравнения осевой линии леера. Условие равной прочности в каждом поперечном сечении леера выражается зависимостью:

$$F = \sigma \times s, \tag{2}$$

где F – разрывающее усилие; σ – допустимое напряжение; s – площадь поперечного сечения леера.

Считаем леер гибкой нитью, уравнение которой $y=f(x)$. Схематично график этой функции представлен на рисунке 5. Граничные условия в начале координат таковы: x, y и y' равны нулю, горизонтальная составляющая F равна суммарной ветровой нагрузке на конструкцию и обозначена символом F_0 . Вертикальная составляющая силы F , которую мы обозначим символом F_y , в начале координат равна нулю.

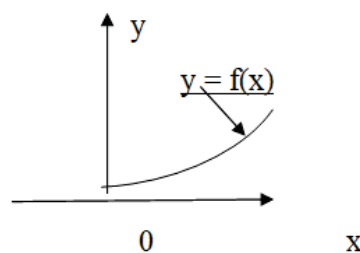


Рис. 5. Схематичный график осевой линии леера

Из условия гибкости нити следует:

$$\frac{F_y}{F_o} = \frac{dy}{dx}, \quad (3)$$

откуда:

$$\frac{dF_y}{dx} = F_o y'. \quad (4)$$

Рассмотрим элементарный участок леера длиной dl :

$$dl = \sqrt{(dx)^2 + (dy)^2} = \sqrt{1 + (y')^2} dx. \quad (5)$$

Из (2) следует:

$$dF = \sigma ds. \quad (6)$$

Считаем, что сила давления ветра на леер мала по сравнению с запасом прочности, который обеспечивает нам наше допущение о превышении силы давления на раму над силой, обуславливающей выработку электроэнергии, (соотношения 2:4). На этом основании боковое давление ветра на леер не учитываем. То есть горизонтальная составляющая силы F неизменна на всем участке и равна F_o . Вертикальная составляющая силы F изменится в пределах элементарного участка на величину, равную весу данного элементарного участка леера. А это приращение веса элементарного участка можно считать равным:

$$dF_y = s\gamma \sqrt{(dx)^2 + (dy)^2} = s\gamma \sqrt{1 + (y')^2} dx, \quad (7)$$

где γ – удельный вес материала леера.

$$F = \sqrt{F_o^2 + F_y^2}, \quad (8)$$

Следовательно, из (6) и (8) имеем:

$$\sigma ds = \frac{F_y \cdot F_y'}{\sqrt{(F_o)^2 + (F_y)^2}} dx. \quad (9)$$

Откуда:

$$\sigma ds = \frac{y' F_y'}{\sqrt{1 + (y')^2}} dx. \quad (10)$$

Из (7) и (10) следует:

$$\sigma ds = \gamma s dy. \quad (11)$$

В результате разделения переменных и интегрирования имеем:

$$\ln s = \frac{\gamma}{\sigma} y + C. \quad (12)$$

При $y=0$, $s=s_o$. Значит, $C=\ln(s_o)$. Таким образом, параметры леера определяет уравнение:

$$\ln\left(\frac{s}{s_o}\right) = \frac{\gamma}{\sigma} y. \quad (13)$$

Данное уравнение можно представить в следующей форме:

$$\frac{s}{s_o} = \exp\left(\frac{\gamma}{\sigma} y\right). \quad (14)$$

Учитывая, что

$$\frac{s}{s_o} = \sqrt{1 + (y')^2}, \quad (15)$$

получаем дифференциальное уравнение осевой линии леера в таком виде:

$$\sqrt{1 + (y')^2} = \exp\left(\frac{\gamma}{\sigma} y\right). \quad (16)$$

Это уравнение с разделяющимися переменными.

$$y' = \sqrt{\exp\left(2\frac{\gamma}{\sigma} y\right) - 1}. \quad (17)$$

Из (17) и (3) получаем:

$$F_y = F_o \sqrt{\exp\left(2\frac{\gamma}{\sigma} y\right) - 1}. \quad (18)$$

А вес участка леера высотой H ($F_{yч}$) определит следующая формула:

$$F_{yч} = F_o \left(\sqrt{\exp\left(2\frac{\gamma}{\sigma} (H + y)\right) - 1} - \sqrt{\exp\left(2\frac{\gamma}{\sigma} y\right) - 1} \right). \quad (19)$$

Определение параметров леера (пример).

Составляем математическую модель установки мощностью 1 ГВт, расположенную на высоте 5 000 м (принимая скорость ветра 18 м/с).

Принятые допущения:

– коэффициент торможения скорости ветра k_t – 0,8. Этим коэффициентом оцениваем потери энергии, обусловленные турбулентностью потока воздуха и трением воздуха о конструкцию;

– сила давления на ветроколесо определяется из уравнения изменения количества движения воздуха и изменения энергии ветра, ушедшей на выработку электроэнергии;

– КПД электрогенератора – 0,95;

– коэффициент использования энергии ветра – 0,3.

Поскольку 1 ГВт – это 1×10^6 кВт, то энергия ветра (при наших допущениях), затраченная в секунду на выработку электроэнергии, будет: $1 \times 10^6 / (0,8 \times 0,95) = 1,34 \times 10^6$ кВт/с. Удельная кинетическая энергия ветра (кинетическая энергия одного кубического метра воздуха в секунду) E_b на высоте 5 000 м определяется в предположении, что удельный вес воздуха – 0,75 кгс/м³. То есть $E_b = 0,75 \times 18^2 / (2 \times 9,81) = 12,65$ кгс/м = 124 Вт/с. Следовательно, площадь живого сечения ветра, используемого для выработки электроэнергии, будет: $134 \times 10^6 / (18 \times 12,65 \times 0,3) = 1,96 \times 10^6$ м². Силу воздействия ветра на ветроколесо и раму определяем из (1) в предположении, что уменьшение скорости ветра за ветроэнергетической установкой определяется количеством энергии, отнятой у ветра. То есть средняя скорость отходящего ветра определится из энергетического баланса: $1,96 \times 10^6 \times 18 \times 126,5 - 134 \times 10^6 = 1,96 \times 10^6 \times 0,75 \times V_1^3 / (2 \times 9,81)$, где V_1 – средняя скорость ветра за установкой. То есть $V_1 = 16,093$ м/с. $F_b = 2 \times 10^6 \times 0,75 \times 18 / 9,81 (18 - 16,093) = 5249$ т.

Второй вариант решения этой задачи. Принимаем, что площадь живого сечения ветра, используемого для выработки электроэнергии, будет: $134 \times 10^6 / (12,65 \times 18) = 0,588 \times 10^6$ м². $F_b = 0,588 \times 10^6 \times 0,75 \times 18^2 / 9,81$. $F_b = 14500$ т. Последнее решение получено в предположении, что коэффициент использования энергии ветра равен 1. Возможно, что истинное значение F_b находится в диапазоне найденных величин. Мы в запас расчета принимаем $F_b = 14500$ т.

Дополнительные предположения. Аэродинамическое качество крыльев равно 7,5. Собственный вес крыльев составляет 1/10 часть удерживаемого груза (обоснованность этих допущений делаем на основании натуральных экспериментов, выполненных лично; кроме того, известно, что данными характеристикам обладает парашютист [5]). Стоимость материала крыльев и другого оборудования равна стоимости материала привязи (\$ 30 за 1 кг). Допустимое напряжение на разрыв материала леера (кевларовая нить) – 10^5 Н/см². Удельный вес кевларовой нити – 1,5 т/м³. Суммарный вес электротехнического оборудования (рама, электрогенераторы, трансформаторы, кабели, ветроколеса и так далее) равен 7000 т. Тангенс угла наклона вектора, разрывающего привязь, к горизонту (в первом приближении) считаем равным 1. В дальнейшей работе значение этого граничного условия будет уточняться, исходя из требования минимизации капитальных затрат на строительство установки.

На основании принятых допущений составляем уравнения, из которых определим слагаемые силы, разрывающей привязь в её верхней точке (в точке присоединения к привязи рамы и системы крыльев, поддерживающих установку в рабочем состоянии). Вертикальная и горизонтальная составляющая силы равны по модулю. То есть $F_y = F_o$. Величина F_y равна весу привязи. Подъёмная сила крыльев F_k складывается из веса оборудования, веса крыльев, веса привязи и реакции взаимодействия привязи с фундаментом. Величина F_o равна сумме $F_b + F_k / 7,5$. Собственный вес крыльев $P_k = F_k / 10$. Таким образом, справедливы следующие соотношения:

$$F_k = F_k / 10 + 7000 \text{ т} + 14500 \text{ т} + F_k / 7,5 = 28000 \text{ т.}$$

$$F_y = F_o = 14500 + 3740 = 18240 \text{ т.}$$

Усилие, разрывающее привязь в верхней её точке, равно 25800 т. В рассматриваемом нами варианте тангенс угла наклона вектора, разрывающего привязь, к горизонту в верхней точке привязи равен 1. Из (17) получаем, что значение координаты у этой точки равно 23104 м. Следовательно, у точки крепления привязи к фундаменту равен 18104 м. Вес привязи этого участка (F_y) определяет формула (19):

$$F_y = 18240 \left(\sqrt{\exp\left(2 \frac{1,5}{100000} 23104\right) - 1} - \sqrt{\exp\left(2 \frac{1,5}{100000} 18104\right) - 1} \right) = 2748 \text{ т.}$$

Суммарный вес конструкции (без фундамента) равен 7000 + 2800 + 2748 = 12548 т. Стоимость материала – \$ 376 × 10⁶. Удвоение этой суммы даст приблизительную оценку стоимости конструкции с учетом расходов на выполнение работ. То есть по капитальным затратам предлагаемый вариант может оказаться втрое дешевле атомного энергоблока, а также отпадут проблемы с поставкой топлива и захоронением отходов.

Задачи дальнейших исследований и следующие этапы работы:

- разработка системы измерения характеристик поля скоростей набегающего на установку ветра и ввода полученных данных (в оперативном режиме) в систему управления;
- разработка автоматической системы управления работой установки, способной обеспечить безаварийную работу в сложных атмосферных условиях, а также осуществлять операции приведения установки в рабочее состояние и приземления;
- изготовление действующего макета установки, его монтаж и осуществление оценки его эффективности.

Выводы. Использование привязи из кевлара (вместо стального троса) позволило настолько упростить и удешевить конструкцию, что уместно ставить вопрос о её патентовании и апробации на действующих макетах, чтобы Украина или другая страна, а также фирма, которая примет на себя тяготы по её внедрению, не только решила проблемы собственного энергоснабжения, но и увеличила прибыль от экспорта электроэнергии и продажи лицензий на некоторые усовершенствования данной технологии. Особенно эффективной может оказаться установка этой конструкции на горных вершинах. Авторы выражают надежду на то, что технические, финансовые и бюрократические трудности освоения этой технологии будут преодолены в ближайшем будущем.

Литература

1. Aglietti G.S., Redi S., Tatnall A.R., Vart T.M.. High Altitude Electrical Power Generation. Southampton: School of Engineering Sciences University of Southampton Highfield, 2007. 200 p.
2. Гончар Г.П., Лапшин Ю.С., Мадяр О.А. О возможности повышения гелиоэнергетического потенциала Украины. Винахідник і раціоналізатор. 2016. № 3. С. 14–19.
3. URL: <https://x.company/makani/technology/>.
4. Лапшин Ю.С. К вопросу о леерной энергетике, использующей ветры больших высот. Научно-практический журнал «Екологічні науки». 2015. № 8. С. 131–138.
5. Тайран 4. URL: <https://asa-paragliding.ru/shop/paragliders/tayran4/>.