

УДК 621.548.

## К ВОПРОСУ ОБ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ТЕХНОЛОГИЙ

Лапшин Ю.С.

Государственная экологическая академия  
последипломного образования и управления,  
Ул. Митрополита Василя Липковского, 35, 03035, г. Киев  
deabgd@mail.ru

Академия в соавторстве с СП «Ланко» и Кременчугским национальным университетом имени Михаила Остроградского выполнила теоретические исследования новых ветроэнергетических технологий, предложенных сотрудниками данных организаций. Суть этих технологий - использование энергии ветра больших высот (до 500 м) с помощью парусов или воздушного змея/аэростата. Высокая эффективность этих технологий для случаев, когда среднегодовая скорость ветра приземного слоя (высота – до 10 м) не превышает 5 м/с. Что особенно актуально для большей части территории Украины. В данной работе исследуются возможности замены дорогого гелия, обеспечивающего подъемную силу аэростата, более дешевыми материалами, но требующими (для поддержания подъемной силы) непрерывной энергетической подпитки. Аэростат наполняется газом/паром с высокой температурой. Придание оболочке аэростата высоких теплоизоляционных свойств ведет к увеличению её веса и удорожанию. С другой стороны, уменьшаются затраты на компенсацию тепловых потерь. В данной статье рассматриваются эта задача оптимизации варианты наполнения аэростата азотом, водяными парами, или смесью этих наполнителей с водородом. *Ключевые слова:* леер, гибкое крыло, аэростат, ветровая электростанция.

**До питання ефективності вітроенергетичних технологій.** Лапшин Ю.С. Академія в співавторстві з СП «Ланко» і Кременчуцьким національним університетом імені Михайла Остроградського виконала теоретичні дослідження нових вітроенергетичних технологій, запропонованих співробітниками даних організацій. Суть цих технологій - використання енергії вітру великих висот (до 500 м) за допомогою вітрил або повітряного зм'я / аеростата. Висока ефективність цих технологій для випадків, коли середньорічна швидкість вітру приземного шару (висота - до 10 м) не перевищує 5 м / с. Що особливо актуально для більшої частини території України. У даній роботі досліджуються можливості заміни дорогого гелію, що забезпечує підйомну силу аеростата, більш дешевими матеріалами, але вимагають (для підтримки підйомної сили) безперервної енергетичного підживлення. Аеростат наповнюється газом / паром з високою температурою. Осучаснення оболонці аеростата високих теплоізоляційних властивостей веде до збільшення її ваги і подорожчання. З іншого боку, зменшуються витрати на компенсацію теплових втрат. В даній статті розглядаються ця задача оптимізації варіанти наповнення аеростата азотом, водяними парами, або сумішшю цих наповнювачів з воднем. *Ключові слова:* леер, гнучке крило, аеростат, вітрова электростанція.

**On the question of the effectiveness of wind energy technologies.** Lapshin Y. Academy in collaboration with JV "Lanco" and the Kremenchug National University Michael Ostrogradskiy performed theoretical studies of new wind energy technologies proposed by employees of these organizations. The essence of these technologies - the use of wind energy high altitudes (up to 500 m) with the help of sail or kite / balloon. The high efficiency of these technologies for the cases when the average wind speed of the surface layer (height - 10 m) is less than 5 m / s. That is especially true for most of the territory of Ukraine. In this paper we

investigate the possibility of replacing the expensive helium, providing the lifting force of the balloon, cheaper materials, but require (to maintain lift) continuous energizing. Balloon inflates / steam with high temperature. Giving the envelope is high thermal insulation properties increases its weight and cost increase. On the other hand, decreasing costs to compensate heat losses. This article discusses this problem of optimization options for filling the balloon with nitrogen, water vapor, or a mixture of these fillers with hydrogen. *Keywords:* rope, flexible wing, airships, wind power.

### Актуальность работы

В настоящее время Украина нуждается в срочной разработке и освоении таких средств, которые обеспечат её независимость от российского природного газа. Представляются очевидными следующие направления развития, которые в короткий срок (несколько месяцев) могут привести к цели. Это: энергосбережение, повышение энергоэффективности, освоение и использование собственных биоресурсов и освоение собственных возобновляемых источников энергии. В первую очередь, энергии ветра. По оценкам авторов, ветроэнергетический потенциал Украины достаточен для удовлетворения всех её (Украины) энергетических потребностей. Авторы являются сторонниками леерных ветроэнергетических технологий [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7]. Поскольку эти технологии способны обеспечить освоение ветроэнергетического потенциала 500 метровой высоты на всей территории Украины. Эти технологии не предполагают строительство дорогостоящих фундаментов. Не требуют изготовления и монтажа опорных мачт. Не нуждаются в механизмах, обеспечивающих ориентацию ветровой электростанции на ветер. Их изготовление не требует дорогостоящих материалов и высокой точности исполнения оборудования. В некоторых вариантах леерной технологии имеется сложный в изготов-

лении узел – это пропеллерное ветроколесо. Но благодаря большому спросу на данный товар и массовому производству этой продукции цена на него – доступна. В Украине (до военных действий на востоке) эта продукция выпускалась в Краматорске. Авторы надеются, что это производство в ближайшее время будет восстановлено. В настоящее время технологией изготовления пропеллеров в Украине владеет днепропетровское предприятие ЮЖМАШ. Но в парусном варианте леерной ветроэнергетики этот сложный для кустарного изготовления объект отсутствует. Для получения тепловой энергии, например горячей воды для обогрева помещений, ветроэнергетическая установка может работать на принципе, описанном в [1]. Приводим описание этого принципа работы, данное его автором. «На вал генератора намотан трос, соединенный с парусом. Парус, увлекаемый ветром, разматывает трос и заставляет вращаться вал генератора. Когда выработана вся длина троса, парус переводится в положение минимального аэродинамического сопротивления и подтягивается назад с помощью генератора, работающего в режиме электродвигателя. (рис.1). Эта схема была предложена её автором для получения электроэнергии.



Рис.1. Парашютный ветряк, состоящий из двух парашютов

Основное достоинство леерной энергетики – это её способность использовать энергетический потенциал ветра больших высот. Согласно Розину М.Н., с ростом высоты скорость ветра растет в соответствии с зависимостью  $V_2 = V_1(h_2/h_1)^{0,2}$ , где  $V_2$  и  $h_2$  соответственно скорость ветра и высота верхнего уровня, а  $V_1$  и  $h_1$  –нижнего уровня [1].

### Материал и результаты исследований

Описанный принцип работы ветросиловой установки был изменен авторами настоящей статьи [4]. В нашей модификации он таков: «Когда выбрана вся длина троса, парус переводится в положение минимального аэродинамического сопротивления и подтягивается назад с помощью второго парашюта, раскрытие которого начинается в момент завершения закрытия первого парашюта. В период времени от закрытия первого парашюта до раскрытия второго парашюта выполняется реверсивное переключение, которое обеспечивает сохранение направления вращения ротора электрогенератора при изменении направления враще-

ния внешней части вала на противоположное направление. Во время отсутствия тягового усилия вращение ротора продолжается по инерции (в основном за счет инерции маховика)».

Авторам представляется, что данная конструкция лучше будет работать на получение тепловой энергии, чем в известных конструкциях [6, 7, 8]. В нашем случае, место электрогенератора должен занимать включённый в тепловую сеть гидравлический насос, а основными точками отбора тепловой энергии будут гидравлические сопротивления. Достоинства данной схемы: отсутствие тяжелых элементов на высоте (электрогенератора, ветроколеса, электропроводного кабеля), что существенно для обеспечения требований безопасности в случае возникновения аварийной ситуации, простота приведения установки в рабочее состояние и вывода из него. Недостатки: потребность в дорогом гелии (в период эксплуатации неизбежны его потери), для освоения значительных высот требуется леер большой длины (т.е. леер будет тяжелым), что в свою очередь потребует или увеличения объёма гелиевого шара или придания парашюту формы, обеспечивающей необходимую подъёмную силу, что снизит рабочие характеристики (КПД) установки, значительная площадь отчуждения по причине большого радиуса приземного участка леера. Основным недостатком данной конструкции является именно наличие гелиевого шара. Поскольку его габариты значительны, ибо он должен поддерживать леер и парашют на отрезке холостого хода. А на этом участке сила сопротивления

движению со стороны ветра (на единицу площади поперечного сечения) в 4 раза превышает тяговое удельное усилие, развиваемое раскрытым парусом. В результате КПД установки снижается. В связи с изложенным, авторы рассматривают альтернативные варианты, о которых было сказано в предыдущих работах [2, 3, 4, 5], и намерены исследовать возможности конструкции, в которой рама с ветроколесами и генераторами под-

держивается на высоте аэростатом, регулируемого объёма. Аэростат совмещен с гибким крылом и, при достаточной силе ветра, работает в режиме гибкого крыла. На этот период легкий газ из аэростата перекачивается в баллон. Баллон и компрессор могут находиться на высоте либо на земной поверхности. Во втором случае легкий газ от аэростата к баллону подаётся по гибкому трубопроводу (рис. 2).

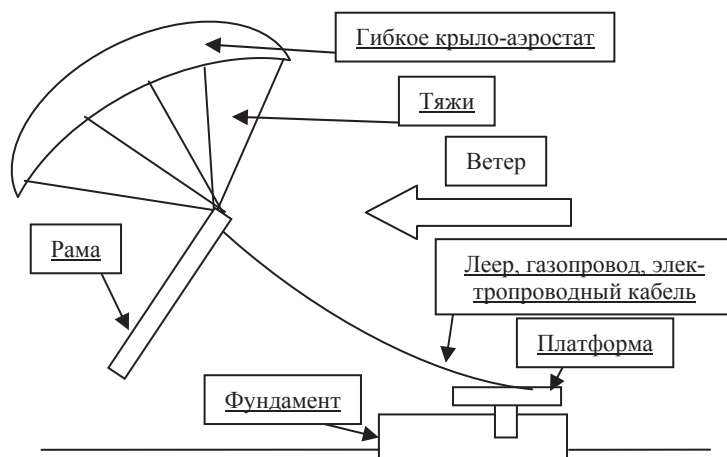


Рис. 2. Подача легкого газа

В данной конструкции наиболее ответственным элементом является гибкое крыло-аэростат. Оптимизации его параметров посвящается данная работа. Изготовление оболочки аэростата не представляет трудностей. Промышленность способна поставлять легкие кордовые материалы в достаточном количестве и по доступным ценам. Наибольшую проблему представляет высокая цена и ограниченность ресурсов гелия. Если данная ветроэнергетическая технология потеснит углеводородную техно-

логию, основанную на использовании углеводородных ископаемых, то цена на гелий возрастет. Ибо, сегодня гелий добывается из отходов газа и нефтедобывающих производств. Целью данной работы является обоснование надежности работы заменяющих гелий газовых смесей. Поскольку стоимость ветроэнергетической установки состоит из стоимости материалов и стандартного оборудования, расходов на изготовление и монтаж. Стоимость капитальных затрат на единицу мощности тем

меньше чем больше мощность этой электростанции. Тоже можно сказать и о эксплуатационных расходах. Для нашей конструкции эти утверждения совершенно очевидны. Рассмотрим аэростат в форме шара радиуса – r (Шар разделен внутренними легкими гибкими перегородками на отсеки). Подъемная сила пропорциональна его объёму –  $V \cdot \rho = 4\pi r^3/3$ . Принимаем, что удельный вес воздушной среды, в которой находится аэростат –  $1,2 \text{ кг/м}^3$ . В дальнейшем покажем, что мы сможем технически обеспечить и поддерживать значение удельного веса наполняющей воздушный шар газовой смеси в диапазоне  $0,3 - 0,5 \text{ кг/м}^3$ . В дальнейших расчетах будем использовать среднее значение –  $0,4 \text{ кг/м}^3$ . Таким образом, получаем, что подъемная сила одного кубического метра газовой смеси составляет  $0,8 \text{ кг/м}^3$ . В дальнейших расчетах будем считать, что  $1 \text{ м}^2$  оболочки аэростата весит  $1,5 \text{ кг}$ . Определим размеры воздушного шара для ветроэлектростанции мощностью  $1 \text{ кВт}$ , для случая максимальной нагрузки. Максимальная нагрузка на аэростат будет при отсутствии ветра. Чем сильнее ветер, тем больше величины подъемных сил, возникающих за счет отклонения рамы от вертикали и аэродинамических условий обтекания ветром аэростата. Вес рамы с ветроколесами и электрогенераторами (P) будем принимать равным весу тысячи электрогенераторов, со следующей характеристикой: производитель – GESAN, максимальная мощность –  $1110,0 \text{ кВт}$ , Дизель привод, расход топлива –  $202 \text{ л/ч}$ , вес  $6700 \text{ кг}$ . Разумеется, из всего перечисленного в нашей конструкции будет использован только аналогичный

электрогенератор. Принимаем, что детали нашей рамы, её подвески и ветроколеса примерно равны по весу деталям Дизель привода, рамы и механизма запуска электрогенератора. Таким образом,  $P = 6700000 \text{ кг}$ . В запас расчетов принимаем, что леер постоянного (не равнопрочного) по длине сечения. А его вес определяется его удельным весом ( $3 \text{ т/м}^3$ ), длиной (принимаем  $1000 \text{ м}$ ) и постоянной по длине леера площадью поперечного сечения. В свою очередь, размер этой площади поперечного сечения леера находится из условия допустимой прочности на разрыв ( $1500 \text{ кг/см}^2$ ) и величины усилий, отрывающих леер от аэростата и рамы. При нулевой скорости ветра сила, отрывающая леер от аэростата равна весу леера. Определяем максимальное усилие, действующее на леер. Полагая КПД ветроколеса равным  $0,4$  и принимая (в запас расчета) сто процентную потерю энергии ветра при прохождении через ветроколесо, получим значение горизонтальной составляющей усилия ветра  $F_{\text{пр}}$ , набегавшего на раму со скоростью  $8 \text{ м/с}$ :

$$F_{\text{пр}} = 1110000 \cdot 102 \cdot 2 / (8 \cdot 0,4) \text{ кг} = 70762500 \text{ кг}$$

Горизонтальная составляющая давления ветра на аэростат, в случае, когда аэростат функционирует как гибкое крыло, зависит от гидродинамического качества этого крыла. Предположим, что это гидродинамическое качество таково, что при нем подъемная сила в три раза превосходит горизонтальную составляющую давления ветра на крыло-аэростат. При наличии ветра рама будет обладать подъемной силой, но мы пренебрегаем этим фактом в запас рас-

чета. Допустим, что основную весовую нагрузку на аэростат создают леер и рама, а суммарный вес прочего оборудования (громоотвод, электропроводный кабель или высоковольтная система передачи выработанной энергии до наземного пользователя, компрессор или шланг, проводящий газ от баллона/газохранилища до аэростата и обратно к внутренним перегородкам аэростата) не превышает 5 % от веса рамы. Таким образом, составляется уравнение:

$$0,8\text{кг/м}^3 * V = F_{\text{л}} + 1,05P + F_0 \quad (1)$$

Где:  $F_{\text{л}}$  – вес леера,  $F_0$  – вес оболочки аэростата.

$$F_{\text{л}} = 3000\text{кг/м}^3 * 1000\text{м} * S_{\text{л}} \quad (2)$$

Где  $S_{\text{л}}$  – площадь поперечного сечения леера в  $\text{м}^2$ . Эта площадь определяется из условия прочности. Усилие, которое разрывает леер –  $P_{\text{л}}$  складывается из двух сил: вертикальной, которая равна весу леера; горизонтальной – давление ветра на аэростат и раму. А именно:

$$P_{\text{л}} = \sqrt{(F_{\text{лг}} + F_{\text{пр}})^2 + (F_{\text{л}})^2} \quad (3)$$

Где:  $F_{\text{лг}} = F_{\text{л}}/3$

Из условия достижения требуемой прочности леера следует:

$$S_{\text{л}} = P_{\text{л}}/15000000\text{кг/м}^2 \quad (4)$$

$$F_{\text{л}} = \sqrt{((F_{\text{л}}/3 + F_{\text{пр}})^2 + (F_{\text{л}})^2)}/5\text{кг} \quad (5)$$

Откуда:

$$25 F_{\text{л}}^2 = (F_{\text{л}}/3 + F_{\text{пр}})^2 + (F_{\text{л}})^2 \quad (6)$$

В результате  $F_{\text{л}} = 15498,9$  тн. Следовательно,  $S_{\text{л}} = 5,166\text{м}^2$ . Вес леера -  $5,166 * 3 * 1000 = 15498,9$  тонн. Диаметр круга (поперечного сечения) – 2,56 м. Из (1) определяем радиус шара (аэростата):

$$3,2\pi r^3/3 = 15498900 + 6700000 + 6\pi r^2. \text{ Откуда } r = 190,5\text{м}$$

$V = 28958332 \text{ м}^3$ . Площадь поверхности шара будет равна:

$4\pi r^2 = 456000 \text{ м}^2$ . Вес оболочки аэростата – 684000 кг.

### Описание принципа изготовления, монтажа и работы конструкции

Строится фундамент, на котором монтируется поворотная (допускающая круговое вращение) платформа, которая выдерживает внешнее горизонтальное усилие – сто тысяч тонн. На платформе и фундаменте имеются кольцевые электропроводные шины, обеспечивающие передачу выработанной электроэнергии от платформы к наземному трансформатору. Платформа жёстко (прочно) соединена с одним концом леера. Ко второму концу леера крепятся рама и тяги, связывающие леер с оплеткой аэростата. От рамы до шин платформы проходит электропроводный кабель. На платформе размещены такие компрессор и газохранилище. От газохранилища и компрессора проходит газопровод к аэростату. Внутри аэростата находится управляемая компьютером газораспределительная система, которая обеспечивает требуемое наполнение газом каждого из отсеков. Разделение внутренней части аэростата на отсеки решает две задачи – управление формой аэростата и сохранение его работоспособности при попадании в него метеорита или снаряда (легко осуществляемая диверсия).

### Газ, наполнитель

Важно отметить, что использование водорода исключается – он пожаро- и взрывоопасен. В нужных для применения количествах гелий – недоступен. Один из путей решения



вопроса - использование смеси водорода – азот (формиргаз), которая в диапазоне (по объёму) 25% - 75% водорода – считается не взрывоопасной. Верхний предел этой смеси получается в результате нагревания аммиака при температуре несколько выше 900°C. Цена – доступна. Удельный вес смеси удовлетворяет нашим требованиям. Но задачу не решает – смесь горит в воздухе. Пожаробезопасность можно значительно повысить, уменьшив процентное содержание водорода в смеси. Но это приведет к увеличению удельного веса и соответственно грузоподъемности. Проблему можно решить следующим путем: смесь нагреть до требуемой температуры, эту температуру поддерживать, разместив внутри каждого отсека лампы накалывания. При этом (с целью увеличения срока службы ламп) подавать на них напряжение на 20 -30 процентов ниже номинального. Т.е. оборудование для осуществления этой технологии не требует больших затрат. Но поддержание этой температуры вызовет большие энергетические потери. Для их уменьшения потребуются теплоизоляция всей оболочки аэростата. Эта задача не очень сложная. Промышленность выпускает легкие и высококачественные теплоизоляционные материалы. Выполним расчет тепловых потерь при теплоизоляции из хлопковой ваты, коэффициент теплопроводности которой  $62 \cdot 10^{-6}$  кал/см\*сек\*град [11 с., Таблица - 15/25]. При толщине теплоизоляционного слоя 10см тепловые потери составят 0,0149 Вт/(м<sup>2</sup>\*град). Если аэростат наполнить воздухом, то в силу газовых законов ( $1,2 = 0,4(1 + T/273)$ ) при разнице температур

внутри аэростата и за бортом 546град достигается требуемая грузоподъемность. При этом мощность тепловых потерь установки будет –  $546 \cdot 0,0149 \cdot 456000 = 3709742,4$ Вт. Что составляет 0,37 % от мощности электростанции. Данная величина тепловых потерь завышена. В этих расчетах не учтены тепловые сопротивления, возникающие при теплообмене стенки с окружающей средой, например, наличие ламинарного пристеночного слоя. Кроме того, теплоизоляция может быть усовершенствована выполнением её в виде многослойных экранов. Препятствием может оказаться высокая температура, которая может ограничить применение дешевых, но не теплоустойчивых материалов. Предлагаем для рассмотрения простой путь снижения внутренней температуры наполнителя: осуществим наполнение аэростата не воздухом, а водяным паром. В этом случае для достижения требуемой грузоподъемности потребуются температура, определяемая из соотношения  $0,777277 = 0,4(1 + T/273)$ , т.е. 257,49°C. Поясним, что в последней формуле вместо значения удельного веса воздуха – 1,2 кг/м<sup>3</sup> принят его (удельного веса) эквивалент для водяного пара – 0,777277 кг/м<sup>3</sup>. Что следует из разницы осредненного молекулярного веса воздуха молекулярного веса воды. Соответственно при этом потери энергии при принятой нами теплоизоляции составят –  $257,49 \cdot 0,0149 \cdot 456000 = 1749490$ вт, что составляет 0,175% от вырабатываемой мощности. Использование водяного пара в качестве легкого газа для наполнения аэростата (без водорода) снимает с повестки

дня рассмотрение вопросов пожарной безопасности.

### Задачи дальнейших исследований

Приняв (с целью упрощения расчетов) предпосылки: допущение о стопроцентной потере энергии ветра при прохождении ветра через ветроколесо, отказ от выполнения леера равнопрочного сечения и отказ от учета подъёмной силы рамы, которая (сила) возникает в результате отклонения рамы (под действием ветра) от вертикали, дали завышенную оценку веса леера. Запас прочности леера очень велик. Следует выполнить исследования и определить величину этого резерва надёжности.

Определение на действующем макете (модельное исследование) технических характеристик установок данного типа.

Разработка системы автоматического управления установкой посредством компьютерной программы: решение вопросов автоматического приведения в рабочее состояние и выведение из него (приземление), управление формой аэростата, в зависимости от скорости и характера (порывистости) ветра.

Выбор типа громоотвода и его конструкции (громоотвод может быть совмещен с леером, но может быть более гибким и напрямую поддерживать контакт с заземленной

шиной, расположенной на поверхности Земли).

Определение оптимального места расположения оси вращения рамы относительно подвески, для получения лучших условий стабилизации частоты вырабатываемого электрического тока.

Изучение возможности получения от гидрометеорологической службы информации о продвижении атмосферных фронтов и ожидаемых ураганах, с целью своевременного приземления установки на опасный период.

### Выводы

Предложенная конструкция ветроэнергетической установки может составить конкуренцию ныне распространенным башенным ветровым электростанциям.

Экономические показатели предложенного варианта ветроэнергетической установки улучшаются с увеличением её мощности.

Рассмотренный (теоретически) вариант показывает возможность замены одной ветровой электростанцией одного атомного реактора.

Преимущества предложенного варианта по сравнению с электростанциями, работающими на дизельном топливе в экономии 202 м<sup>3</sup>/час дизтоплива и предотвращении вредных выбросов в атмосферу.

### Литература

1. Розин Н.М. «Парашютный ветряк» Доклад на Международной конференции «Возобновляемая и малая Р энергетика». Москва. 10.06.09.
2. Лапшин Ю.С., Степаненко В.Н., Клещов В.В., Юрченко / В.М.; . Авторское свидетельство СССР № 1000583. Ветроэлектростанция. / заяв. 18.11.1981, опублик. 28.02.1983, Бюл. №8.



3. . Авторское свидетельство СССР № 1164458. Устройство для отклонения ветрового потока. / Лапшин Ю.С., Тромщинская Т.Г.; заявл. 28.05.1982, опубл. 30.06.1985, Бюл. № 24
4. . Лапшин Ю.С. Ардашов С.А. Безбашенная ветроэнергетическая установка. Вестник КрНУ им. М. Остроградского. Выпуск 3, Кременчег.2013.
5. . Лапшин Ю.С. об увеличении производительности гидроэлектростанций за счет перекачки воды из нижнего бьефа в верхний бьеф водохранилищ ветросиловыми установками Вестник КрНУ им. М. Остроградского. Выпуск 5, Кременчег.2013
6. Лапшин Ю.С., Лихачев О.К., ГолубцоваН.Ю.. Милецкая С,А. Ветроэнергетическая установка.;
7. Авторское свидетельство СССР № 1021805. Роспатент RU (11) 2045683 (13) C1 (51) 6 F03D11/00 заявл 07.07.1992, опубл. 10.10.1995
8. Устройство для отклонения ветрового потока. / Лапшин Ю.С.; заяв. 12.09.1980, опубл. 07.06.1983, Бюл. № 21
9. Седых Н.А. Ветер и возобновляемая энергетика. Ж.Винахідник і раціоналізатор, № 1 – 2012р.С.7 – 10.
10. Свен Уделл. Солнечная и другие альтернативные источники энергии. Москва, Знание. 1980. 88 с.
11. Дж. Твайделл, А.Уейр. Возобновляемые источники энергии. Перевод с английского. Москва. Энергоатомиздат 1990.392 с.
12. И.К. Кикоин Таблицы физических величин. Атомиздат.М.1976.