

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОПТИМАЛЬНОЙ КОНФИГУРАЦИИ И РЕЖИМА РАБОТЫ ГЕЛИОПРИЕМНЫХ ПАНЕЛЕЙ, ВРАЩАЮЩИХСЯ ОТНОСИТЕЛЬНО ОДНОЙ КООРДИНАТНОЙ ОСИ

Khomenko I., Khomenko A.

Sevastopol National University of Nuclear Energy and Industry, Sevastopol, Ukraine

PROCEDURE OF DETERMINING OF THE BETTER ORIENTATION AND WORKING CONDITIONS OF SOLAR PLANES WHICH ARE ROTATED AROUND ONE AXE

Следящие гелиоприемные устройства (трекеры) разворачивают солнечную панель таким образом, чтобы нормаль приемной поверхности была коллинеарной вектору солнечного луча на протяжении всего светового дня. Для реализации этой задачи приходится вращать панель относительно двух координатных осей. Вращение обеспечивается механическими устройствами управляемыми фотоэлектронными модулями. В данной работе предлагается методика для определения оптимальной конфигурации и режима работы одноосевых панелей, при которой достигается максимальное получение солнечной энергии в течение светового года. Представляет практический интерес использовать данную методику для нахождения дискретно-линейной функции вращения одноосевого трекера, чей характер не изменяется в течение всего года, и как следствие, не требует фотоэлектронных модулей для управления механическим приводом.

Ключевые слова: гелиоэнергетика, вариационное исчисление, одноосевые трекеры

Введение

Статья является продолжением теоретических исследований проводимых мировыми учеными по исследованию эффективности использования следящих гелиоприемных устройств в различных точках земного шара.

Основной акцент научных исследований был направлен на изучение использования двухосевых следящих устройств, которые обеспечивают прямое падение солнечного излучения на гелиоприемную поверхность.

В настоящее время еще не разработана научная методика для выбора оптимальной ориентации одноосевого трекера в зависимости от его положения и климатических условий.

В данной работе делается первая попытка связать аналитические зависимости в единый метод, позволяющий проводить численное моделирование поставленной задачи.

Актуальность проблемы

Одноосевые гелиоприемные панели более просты и надежны в эксплуатации чем двухосевые, которые разворачивают солнечную панель таким образом, чтобы нормаль приемной поверхности была коллинеарна солнечному лучу на протяжении всего светового дня. Коллинеарность достигается вращением панели относительно двух координатных осей. Вращение обеспечивается механическими устройствами, управляемыми фотоэлектронными модулями. Разработка научной методики по совершенствованию конструкции одноосевых трекеров позволит повысить их энергоэффективность. Наиболее выгодными будут одноосевые конструкции, в которых суточный закон вращения трекера представлен дискретно-линейной функцией, чей характер не изменяется в течение всего года, и как следствие, не требует фотоэлектронных модулей для управления механическим приводом. Это позволит снизить капитальные затраты и расходы на их обслуживание.

Цель и задачи научного исследования

Положение свободно-ориентированной панели может быть задано при помощи разворотов относительно трех координатных осей. Цель данной работы заключается в разработке методики применения вариационного исчисления для расчета оптимальной ориентации одноосевой гелиоприемной панели, а также режима ее вращения, при которых достигается максимальное получение солнечной энергии в течение светового года.

Для достижения цели исследования необходимо решить следующие задачи:

1. Определить общую формулу функционала, выражающего приход солнечной энергии на приемную панель в течение светового года;
2. Описать каждую функцию, входящую в функционал;
3. Разработать блок-схему для проведения вариационного исчисления.

Основная часть

Задача вариационного исчисления состоит в поиске экстремума функционала, заданного на некотором множестве M функций, которые удовлетворяют определенным ограничениям. Предлагается выразить энергию поглощаемую гелиоприемной плоскостью в течение светового года (принимается, что поверхность является абсолютно черным телом) следующим функционалом:

$$E_y = \int_0^t \left(N_k(t) \cdot P(t)^m(t) \cdot \cos \lambda(t) \right) dt \rightarrow \max, \quad (1)$$

где $N_k(t)$ — интегральный поток прямой солнечной радиации (по всем длинам волн) на плоскую поверхность площадью 1 м^2 , расположенную за пределами земной атмосферы [1];

$P(t)$ — коэффициент прозрачности атмосферы, осредненный для интегрального потока (при среднем состоянии ее замутнения равен примерно 0,8; высоко в горах он может достигать 0,9. При большой мутности атмосферы (дымка, туман, мгла и т. п.) значение P уменьшается до 0,6 и меньше);

$m(t)$ — масса атмосферы, (или число масс атмосферы) представляет собой отношение оптической толщины атмосферы, проходимой солнечными лучами при зенитном угле Z , к оптической толщине, проходимой лучами при зенитном угле равно нулю (вертикальное падение лучей).

$\lambda(t)$ — угол между вектором луча и нормалью поверхности (касательный угол);

Множитель P^m представляет собой долю излучения, которой удалось пройти атмосферный слой.

Косинус угла λ определяет часть излученной энергии, которой удалось попасть на элементарную площадку панели (доля прямого излучения).

Если за нулевой нижний предел интегрирования принять момент времени равный 00:00:00 в день афелия (4 июля), когда Земля находится на максимальном расстоянии от Солнца, то для каждого последующего временного интервала можно определить конкретные значения функций множества M .

Рассмотрим детальные представления и алгоритмы расчета каждой из представленных функций.

Изменение во времени $N_k(t)$ вызвано изменением расстояния между Землей и Солнцем в течение года.

Так как орбита Земли есть эллипс в одном из фокусов которого находится Солнце, то по мере перемещения Земли на орбитальном участке лето-зима расстояние уменьшается. Интенсивность излучения возрастает обратно пропорционально квадрату расстояния. $N_k(t)$ является функцией орбитального угла β :

$$N_k(\beta) = I_{cp} \cdot \left(\frac{R_{e-s} \cdot (1 - e \cdot \cos \beta)}{p} \right)^2,$$

где β — значение орбитального угла Земли в конкретный момент времени.

I_{cp} — солнечная постоянная, представляющая собой энергию излучения Солнца, падающего в единицу времени на единицу площади поверхности, перпендикулярной потоку излучения в космическом пространстве на среднем расстоянии Земли от Солнца, равная 1353 Вт/м^2 ;

R_{e-s} — среднее расстояние от Земли до Солнца;

p — фокальный параметр земной орбиты;

e — эксцентриситет земной орбиты.

За одинаковый интервал времени Земля описывает секторы одинаковой площади (второй закон Кеплера). Следовательно, в зимний период времени (когда Земля находится ближе к фокусу Солнца) орбитальная скорость Земли увеличивается, и за одни зимние сутки ее орбитальный угол увеличивается сильнее, чем за летние сутки.

Орбитальный угол представлен функцией от номера дня, начиная с афелия:

$$\beta(t) = f_1(t) = 0.9863 \cdot N - 1.915 \cdot \sin(0.9863 \cdot N) \quad (2)$$

где N — номер дня после афелия.

Следовательно, в рамках исследуемого функционала $N_k(t)$ можно представить как:

$$N_k(t) = f_2(f_1(t)) \quad (3)$$

Единственная величина в функционале, которая не поддается точному расчету — коэффициент прозрачности атмосферы P . Для солнечного дня его значение приблизительно равно 0,8, в пасмурный день 0,6. В настоящее время нет аналитических зависимостей, позволяющих корректно рассчитывать P на основании

информации об отношении количества солнечных дней в конкретном географическом регионе в конкретный месяц, к числу пасмурных дней:

$$\varepsilon = f_3(t) = \frac{d_{sun}}{d_{cloud}} \quad (4)$$

Подобный анализ предстоит сделать в будущем, принимая за основу методику, изложенную в данной работе. На данном этапе надо понимать, что для конкретного климатического региона ε можно представить как функцию от сезона, следовательно, в рамках рассматриваемой методики как функцию от времени:

$$P = f_4(f_3(t)) \quad (5)$$

Переменные m и λ зависят от значения зенитного угла, который в свою очередь является функцией шести параметров (R_s , R_e , d , β , φ , τ) [3] (рис. 1),

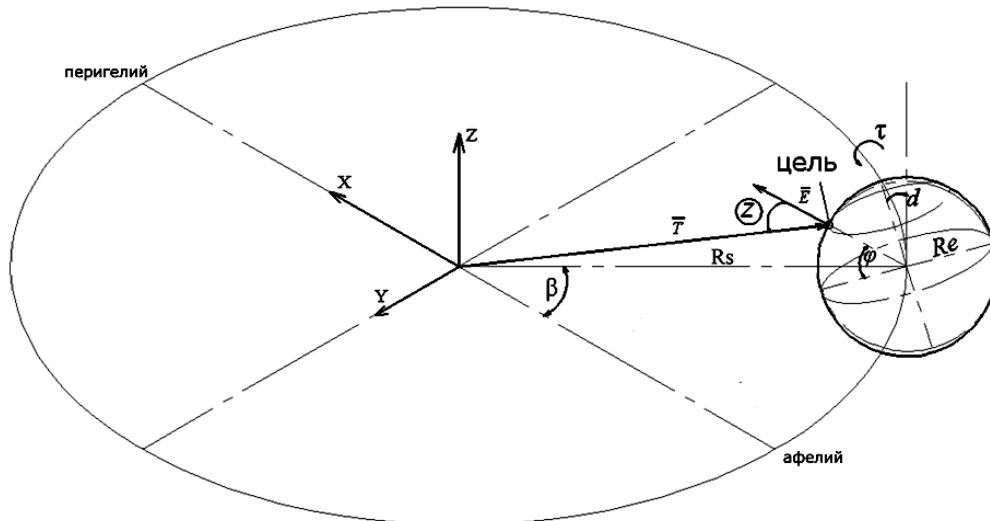


Рис. 1. Параметры для определения зенитного угла Z

- где R_s — радиус орбиты Земли;
 R_e — радиус Земли;
 d — угол наклона земной оси;
 φ — широта, на которой находится гелиоприемная точка;
 β — орбитальный угол Земли (соответствует конкретной дате и времени);
 τ — часовой угол.

Первые три параметра являются константами, широта задается как входной параметр функционала. Орбитальный угол является второй функцией времени $f_2(t)$. Часовой угол может быть представлен элементарной пятой функцией времени:

$$\tau = f_5(t) \quad (6)$$

В работе авторов [4] получена формула, позволяющая рассчитывать косинус зенитного угла с точностью до пятого знака, как функции от трех переменных β , φ , τ :

$$\cos Z = f(\beta, \varphi, \tau) = 0.397777 \cdot S_\varphi C_\beta - C_\varphi \cdot (0.917482 \cdot C_{(\tau+\beta)} \cdot C_\beta + S_{(\tau+\beta)} \cdot S_\beta)$$

$$Z = f_6(f_2(t), \varphi, f_5(t)) \quad (7)$$

Для удобочитаемости, тригонометрические функции \cos и \sin выражены символами C и S соответственно.

В последующих расчетных формулах нам понадобится значение косинуса азимутального угла [4]:

$$\cos A = f(\beta, \varphi, \tau, z) = \frac{S_\varphi \cdot (S_\beta \cdot S_{(\tau+\beta)} + 0.917482 \cdot C_\beta \cdot C_{(\tau+\beta)}) + 0.397777 \cdot C_\beta \cdot C_\varphi}{\sin Z}$$

$$A = f_7(f_2(t), \varphi, f_5(t), f_6(f_2(t), \varphi, f_5(t))) \quad (8)$$

С увеличением значения зенитного угла увеличивается и длина пути солнечного луча в атмосфере и как следствие растут потери энергии (рис. 2), поэтому масса атмосферы m , в свою очередь является функцией от $\cos(z)$.

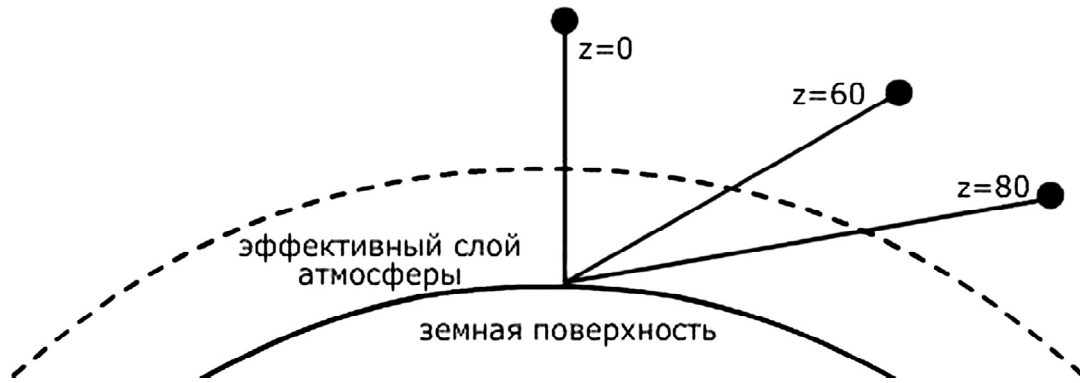


Рис. 2. Длина пути солнечного луча в атмосфере при разных значениях зенитного угла

Одна из точных формул для расчета m получена в работе авторов [5]:

$$m = f(z) = 637.1 \cdot \left(\sqrt{\cos^2 Z + 0.0031417} - \cos Z \right)$$

$$m = f_8(f_6(f_2(t), \varphi, f_5(t))) \quad (9)$$

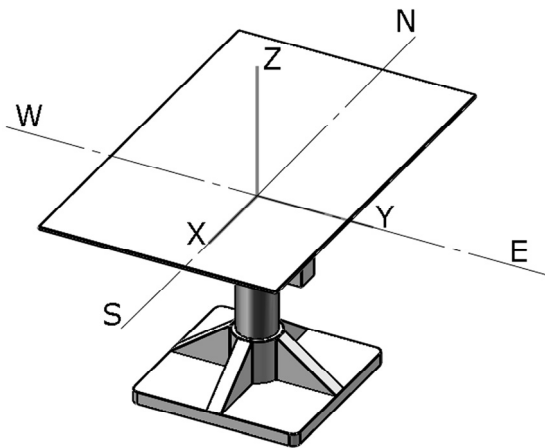


Рис. 3. Система отсчета для определения угла между нормалью к свободно-ориентированной поверхности и солнечным лучом

Наиболее сложная зависимость выражает значение косинуса касательного угла λ , как функцию пяти параметров: двух углов определяющих текущую ориентацию солнечного луча относительно гелиоприемной точки (зенитный и азимутальный угол Z, a), и трех углов Эйлера (χ, θ, Ψ), где χ — угол поворота относительно абсолютной оси OZ , которая совпадает с вектором нормали к поверхности Земли;

θ - угол поворота относительно локальной оси OV , которая в начальном положении устройства совпадает с абсолютной осью OY (направление запад-восток);

Ψ - угол поворота относительно локальной оси OU , которая в начальном положении устройства совпадает с абсолютной осью OX (направление юг-север).

За положительное направление принято вращение против часовой стрелки вокруг соответствующей оси. Исходная ориентация панели показана на рисунке 3.

В работе авторов [6] выведена формула расчета $\cos \lambda$:

$$\cos \lambda = f(z, a, \chi, \theta, \Psi) = S_z \cdot S_\theta \cdot C_\Psi \cdot C(a - \chi) + S_z \cdot S_\Psi \cdot S(\chi - a) + C_z \cdot C_\theta \cdot C_\Psi$$

$$\cos \lambda = f_9(f_6(f_2(t), \varphi, f_5(t)), f_7(f_2(t), \varphi, f_5(t)), f_6(f_2(t), \varphi, f_5(t))), \chi, \theta, \Psi) \quad (10)$$

Выразим искомое отношение (1), используя формулы (2-10):

$$E_y = \int_0^t \left(\frac{f_2(f_1(t)) \cdot f_4(f_3(t)) \cdot f_8(f_6(f_2(t), \varphi, f_5(t)))}{f_9(f_6(f_2(t), \varphi, f_5(t)), f_7(f_2(t), \varphi, f_5(t)), f_6(f_2(t), \varphi, f_5(t))), \chi, \theta, \Psi)} \right) dt \rightarrow \max \quad (11)$$

Определение оптимальной ориентации одноосевого трекера и режима вращения, при которых E_y стремится к максимуму возможно проводить при помощи компьютерного моделирования. На рисунке 4 предлагается блок-схема расчета значения функционала для одного элементарного шага интегрирования.

Расчет проводится для установленных значений широты и долготы гелиоприемной панели. Перед началом расчета функционала подбирается i -я комбинация двух углов Эйлера: θ и Ψ . Во время моделирования меняется значение переменной интегрирования с заданным шагом. На каждом шаге пересчитываются значения всех девяти функций, и одного угла Эйлера угла χ в соответствии с режимом вращения панели.

После достижения верхнего предела интегрирования выводится результат суммарной годовой поглощенной энергии E_y для i -й комбинации углов θ и Ψ .

Число комбинаций θ и Ψ определяет исследователь. Из набора комбинаций исследователь выберет ту, при которой получается максимальное значение E_y .

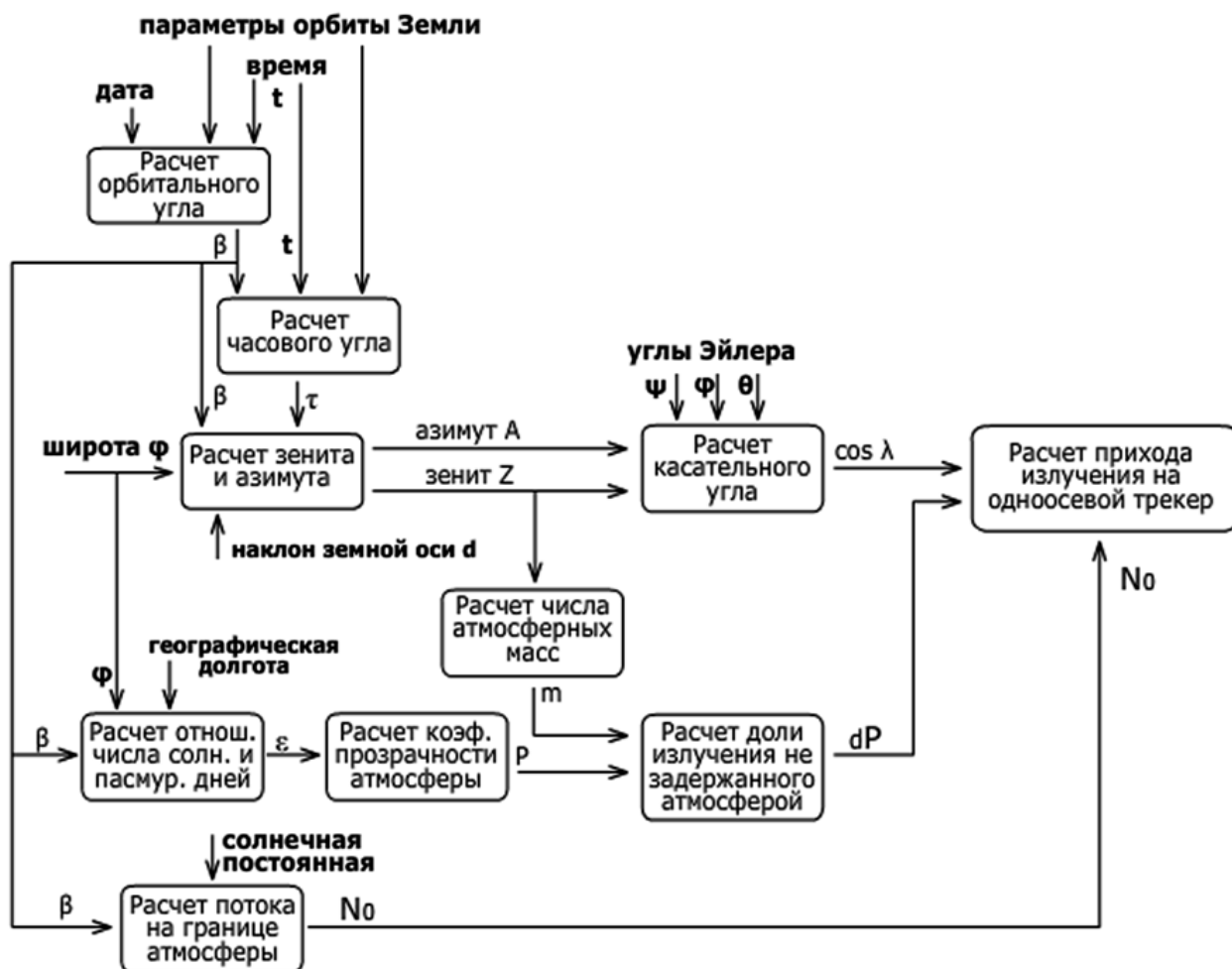


Рис. 4. Порядок расчета солнечной энергии поступившей на одноосевой трекер

Выводы

Наиболее точный выбор оптимальной ориентации панели одноосевых гелиоприемных трекеров, а также режим их вращения, можно сделать только при помощи компьютерного моделирования. Авторы рекомендуют использовать для этой цели методику расчетов и аналитические зависимости, предложенные в данной работе.

Для дальнейшего совершенствования методики необходимо провести теоретические исследования, которые позволят получить аналитическую зависимость коэффициента прозрачности атмосферы как функции от отношения числа солнечных дней к числу пасмурных дней в конкретном временном интервале (неделя, месяц, сезон, год).

Предварительные оценки по методике, изложенной в данной работе показывают, что эффективность приема солнечного излучения одноосевыми трекерами всего лишь на 12% ниже, чем эффективность более дорогих по себестоимости и обслуживанию двухосевых следящих трекеров.

Анотація. Стежачі геліоприйемні пристрої (трекери) розгортають сонячну панель таким чином, щоб нормаль приймальної поверхні була колінеарний вектору сонячного променя протягом усього світлового дня. Для реалізації цього завдання доводиться обертати панель щодо двох координатних осей. Обертання забезпечується механічними пристроями керованими фотоелектронними модулями. У даній роботі пропонується методика для визначення оптимальної конфігурації та режиму роботи одноосісних панелей, при якій досягається максимальне отримання сонячної енергії протягом світлового року. Представляє практичний інтерес використовувати дану методику для знаходження дискретно-лінійної функції обертання одноосьового трекера, чий характер не змінюється протягом усього року, і як наслідок, не вимагає фотоелектронних модулів для управління механічним приводом.

Ключові слова: геліоенергетика, варіаційне числення, одноосьові трекери.

Abstract. Sun tracking devices (trackers) are deploying solar panel so that the receiving surface normal vector was collinear sunlight throughout the daylight hours. To realize this task, the panel has to rotate on two axes. Rotation is provided by mechanical devices controlled by photoelectronic modules. In this paper we propose a method for determining the optimal configuration and operating mode single-axis panels at which the maximum of solar energy during daylight of the year. Is of practical interest to use this method to find discrete linear function of the rotation axis tracker, whose character does not change during the year, and as a consequence, does not require a photoelectric modules to control the mechanical drive.

1. Даффи Д.А. Тепловые процессы с использованием солнечной энергии / Даффи Д.А., Бекман У.А. — М. : Мир, 1981. — 420 с.
2. Бекман У.А. Расчет систем солнечного теплоснабжения / Бекман У.А., Даффи Д.А. — М. : Энергоиздат, 1982. , — 80 с.
3. Жаров В.Е. Сферическая астрономия / Жаров В.Е. — Фрязино : Государственный астрономический институт им. П.К.Штернберга, 2006. — 480 с.
4. Хоменко И.М. Использование координатно-векторного метода для расчета угловых характеристик солнечного излучения / Хоменко И.М., Хоменко А.М. // Збірник наукових праць Академії військово-морських сил імені П.С.Нахімова. — 2011. — №3 (7). — С. 201—210.
5. Хоменко И.М. Новая формула расчета значений атмосферных масс для анализа эффективности работы гелиоприемных устройств / Хоменко И.М., Сафонов В.А., Хоменко А.М. // Збірник наукових праць СНУЯЕтаП. — 2012. — №1 (41). — С. 168—175.
6. Хоменко И.М. Определение аналитической зависимости угла падения прямого солнечного излучения на свободно-ориентированную гелиоприемную панель как функции от зенита, азимута и углов Эйлера / Хоменко И.М., Сафонов В.А., Хоменко А.М. // Ввідновлювана енергетика. — 2012. — №2. — С. 115—124.
7. Полак И.Ф. Курс общей астрономии / Полак И.Ф. М. Государственное издание технико-теоретической литературы, 1951. , — 390 с.

REFERENCES

1. Daffi D.A., Bekman U.A., Teplovye procesy s ispolzovaniem solnechnoy energii (Heating proceses with using of solar energy). Moscow: Mir, 1981, 420 p.
2. Bekman U.A., Daffi D.A. Raschet sistem solnechnogo teplosnabjenija (Calculation of solarl heating systems). Moscow: Energoizdat, 1982, 80 p.
3. Zharov V.E. Sfericheskaja astronomija (Spherical astronomy). Frjazino: Gosudarstvennyi' astornomicheckii' institut im. P.K.Shternberga, 2006, 480 p.
4. Khomenko I.M., Khomenko A.M., Journal of Academy P.S.Nakhimov, 2011, no 3 (7), pp. 201—210.
5. Khomenko I.M., Saphonov V.A., Khomenko A.M., Journal of «SNUJEP», 2012, no 1 (41), pp. 168—175.
6. Khomenko I.M., Khomenko A.M., Journal «Updatable Energy», 2012, no 2, pp. 115—124.
7. Polak I.F. Kurs obshey astronomii (Common astronomy). Moscow: Gosizdat, 1951, 390 p.