ВОЗОБНОВЛЯЕМАЯ ЭНЕРГЕТИКА RENEWABLE ENERGY

СОЛНЕЧНАЯ ЭНЕРГЕТИКА

SOLAR ENERGY

СОЛНЕЧНЫЕ КОЛЛЕКТОРЫ

SOLAR COLLECTORS

Статья поступила в редакцию 11.02.15. Ред. рег. № 2183 The article has entered in publishing office 11.02.15. Ed. reg. No. 2183

УДК 662.997:662.93

# ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ПЫЛИ И ЗАТЕНЕНИЯ НА ОПТИЧЕСКИЕ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЛОСКОГО СОЛНЕЧНОГО КОЛЛЕКТОРА С ДВУХСТЕКОЛЬНЫМ ПРОЗРАЧНЫМ ПОКРЫТИЕМ

***О.М.Саламов***

Институт радиационных проблем НАН Азербайджана
Азербайджан, AZ 1143, г. Баку, ул. Б. Вахабзаде, 9
тел: (99412) 539-32-24, доп. 125; факс: (99412) 539-83-19; e-mail: oktay_dae@mail.ru

*doi: 10.15518/isjaee.2015.04.001*

Заключение совета рецензентов: 18.02.15 Заключение совета экспертов: 25.02.15 Принято к публикации: 02.03.15

В работе приводятся результаты расчета ряда оптических и энергетических параметров плоского солнечного коллектора (ПСК) с двухстекольным прозрачным покрытием. Расчеты проведены с учетом ряда конструктивных и оптических параметров ПСК для наихудших погодных условий, наблюдаемых 15 января 2014 г. При расчете в первую очередь были найдены углы преломления солнечных лучей с учетом суточного хода изменения угла падения солнечных лучей на поверхности ПСК. Далее были определены отражательная способность границы раздела, пропускательная способность прозрачного покрытия ПСК с учетом только отражения и только поглощения и полная пропускательная способность. Определены отражательная, пропускательная и поглощательная способности, а также часовые и среднесуточные значения КПД ПСК с учетом и без учета влияния пыли и затенения прозрачного покрытия. Установлено, что в условиях Апшеронского полуострова, при нормальном обслуживании, практически суммарное влияние коэффициентов пыли и затенения на оптические и теплоэнергетические параметры ПСК не превосходит 5÷6%, а полезно используемая часть энергии солнечных лучей меняется в пределе 57÷143 Вт/м$^2$.

Ключевые слова: плоский солнечный коллектор, прозрачное покрытие, отражательная способность, пропускательная способность, поглощающая пластина, интенсивность солнечной радиации, теплопотеря, коэффициент полезного действия.

# DETERMINATION OF THE DUST AND SHADING EFFECT ON THE OPTICAL AND ENERGY CHARACTERISTICS OF THE FLAT-PLATE SOLAR COLLECTOR WITH TWO GLASS TRANSPARENT COVERS

***O.M. Salamov***

Institute of Radiation Problems of ANAS
B. Vahabzadeh Str., 9, Baku, Azerbaijan, AZ1143
ph.: (99412) 539 32 24 (125); fax: (99412) 539 83 19; e-mail: oktay_dae@mail.ru

Referred 18 February 2015 Received in revised form 25 February 2015 Accepted 2 March 2015

The paper presents the results of the calculation of optical and energy parameters of the flat-plate solar collector (FSC) with two glass transparent covers. The author of this paper carried out the calculations taking into account a number of structural and optical parameters of the FSC for the worst weather conditions observed in the 15 January 2014. Firstly, the angles of refraction of sunlight were found considering the diurnal variation of the angle of incidence of sunlight on the surface of the FSC. Secondly, it were defined the reflectance of interfaces, transmittance of a transparent coating of FSC taking into account only the reflectance, and only the absorbability, and, lastly, total transmittance. The paper identifies the reflectance, transmittance and absorbability, as well as hourly and daily averages of FSC efficiency with and without the influence of dust and shading on transparent cover. It was found that the cumulative effect of virtually dust and shading coefficients on the optical and thermal power settings FSC does not exceed 5 ÷ 6% and radiation efficiency varies in the range of 57 ÷ 143 W / m$^2$ under the conditions of the Absheron Peninsula, in normal service.

Key words: flat-plate solar collector, transparent cover, reflectivity, transmittance, absorbing plate, the intensity of solar radiation, heat loss, efficiency.

*Саламов Октай Мустафа оглы*
*Salamov Oktay Mustafa*

**Сведения об авторе:** доктор философии по физ.-мат. н., почетный доктор и профессор Международной экоэнергетической академии по развитию альтернативной энергетики, ведущий научный сотрудник Института радиационных проблем Национальной Академии наук Азербайджана, доцент Азербайджанского технического университета.

**Образование:** электротехнический факультет Азербайджанского технического университета (1973 г.).

**Область научных интересов:** солнечная и ветровая энергетика; математическое моделирование альтернативных энергоустановок различного назначения; водородная энергетика и теплоэнергетика, в частности, горячее водоснабжение и теплоснабжение с применением комбинированных солнечно-ветровых энергоустановок; разработка следящих систем для автоматического наведения концентрирующих зеркал на солнце, антикоррозионных систем для катодной защиты металлических сооружений от электрохимической и электрической коррозии, а также оптимизирующих, дозирующих и защитных устройств различной модификации.

**Публикации:** 170, в том числе 44 авторских свидетельства СССР на изобретения, а также патенты РФ и Азербайджанской Республики.

**Information about the author:** PhD (Physics and Mathematics), Associate Professor in Physics of Semiconductors and Dielectrics, and Honorary Professor-Doctor of Sciences of International Ecoenergy Academy in Alternative Energy Development, Leading Researcher of the Radiation Problems Institute, Azerbaijan National Academy of Sciences, Associate Professor of Azerbaijan Technical University.

**Education:** Electrical Engineering Faculty of Azerbaijan Technical University (1973).

**Research interests:** solar and wind power-engineering, mathematical simulation of alternative power plants of different use; hydrogen power-engineering and thermal power-engineering, in particular, heat and hot water supply applying combined solar-wind power plants; development of tracking systems for an automatic guidance of concentrating solar mirrors, anticorrosion systems for cathode protection of metallic constructions from electrochemical and electrical corrosion, as well as optimizing, dozing and protection equipments with different modifications.

**Publication:** 170, including 44 certificates of USSR authorship and patents in RF and Azerbaijan Republic.

## Введение

Ранее в работе [1] нами были приведены данные по исследованию хода изменения коэффициентов влияния пыли ($F_П$) и затенения ($F_З$) защитных стеклянных трубок, внутри которых расположены фотоэлектрические преобразователи солнечной батареи (СБ). Было установлено, что зимой и летом (при отсутствии ветра) в климатических условиях г. Баку при длительной непрерывной эксплуатации СБ значение коэффициента влияния пыли незначительно отклоняется от единицы ($F_П$ = 0,95÷0,97), а при ветровых погодных условиях в летнем и осенне-весеннем сезонах в течение 1–2 месяцев непрерывной работы фотоэлектрических преобразователей $F_П$ снижается вплоть до 0,8, и дальнейшее загрязнение стеклянного покрытия модулей СБ незначительно влияет на его значения. Для устранения указанного недостатка в летние и весенне-осенние периоды необходимо раз в месяц промывать прозрачные защитные трубки модулей СБ.

Коэффициент затенения $F_З$ влияет на параметры СБ в основном при больших углах наклона солнечных лучей, т. е. в утренние и вечерние часы. И поскольку в указанные часы интенсивность солнечной радиации (ИСР) бывает в несколько раз меньше её максимального значения, то влияние коэффициента $F_З$ на суточную эффективность СБ будет невысокой (в самом худшем случае до 10 %).

Кроме того, если коэффициент $F_П$ является оптическим параметром и значение его изменяется в зависимости от климатических условий, то коэффициент $F_З$ зависит как от конструктивного выполнения СБ, так и от наличия следящего устройства.

Аналогичные исследования проведены нами для ПСК с двухстекольным прозрачным покрытием. Выявлено, что в условиях Апшеронского полуострова, в частности в г. Баку, при продолжительных сухих погодных условиях, за счет отрицательного влияния пыли, пропускательная способность ПСК с углом наклона до $55^0$ относительно горизонтальной плоскости и двухслойным стеклянным покрытием снижается на ~5÷10 %. При этом степень загрязнения стекла значительно зависит и от ветрового режима. В г. Баку среднегодовая скорость ветра составляет 6÷8 м/сек, а мгновенные скорости ветра меняются в широких пределах (от 0 до 30 м/сек и выше), особенно в весенний и осенний периоды [2]. Поэтому возникает необходимость определить, как загрязнение прозрачного покрытия (стекла) пылью влияет на оптические характеристики ПСК. Однако, согласно литературным данным [3–5], в практических условиях и при проведении математических расчетов за численные значения коэффициента влияния пыли принимается $F_П = 2÷3$ %.

Вместе с тем на оптические характеристики ПСК также существенно влияет степень частичного затенения прозрачного покрытия посредством соседнего ПСК, особенно в утренние и вечерние часы. В практических условиях рекомендуется считывать уменьшения суммарных теплоэнергетических и оптических характеристик прозрачного покрытия и поглощающей пластины в среднем на ~5÷6 %.

Далее мы приводим расчеты ряда оптических характеристик ПСК с двухстекольным прозрачным покрытием.

### Расчет отражательной, полной пропускательной и поглощательной способностей ПСК с двухстекольным прозрачным покрытием

При проведении расчета были учтены следующие оптические и конструктивные параметры экспериментального ПСК: коэффициент ослабления солнечного излучения $K$ (для используемого нами стекла составляет 0,17 см$^{-1}$); $L$ – длина пути излучения через среду (для нашего случая $L = 0{,}25$ см).

Расчеты проводились для 15 января 2012 г. (при наихудших погодных условиях).

Для определения полной пропускательной способности на наклонную поверхность ПСК, при различных значениях угла падения $\theta_{НП}$ солнечных лучей, в первую очередь по нижеследующему уравнению были определены численные значения $\theta_{НП}$ для различных часов светлого времени суток указанного дня:

$$\cos\theta_{НП} = \cos(\phi-\beta)\cos\delta\cos\omega + \sin(\phi-\beta)\sin\delta, \quad (1)$$

где $\phi$ – угол северной широты местности (для г. Баку $\phi$ =40024′, а для общей территории Азербайджана $\phi$ меняется в пределах от $39^0$ до $42^0$); $\beta$ – угол наклона поверхности ПСК к горизонту (в данном случае нами принят $\beta$ =55024′); $\delta$ – угол склонения солнца, т. е. угловое положение солнца в солнечный полдень относительно плоскости экватора, который имеет положительный знак для северного полушария (в данном случае для г. Баку 15-го января $\delta = -210$); $\omega$ – часовой угол солнца, равный нулю в солнечный полдень (каждый час соответствует $15^0$ долготы, причем значения часового угла до полудня считаются положительными, а после полудня – отрицательными; в данном случае для периода с $8^{00}$ ч до 17 00 ч $\omega$ меняется в пределах от $+67{,}5^0$ до $-67{,}5^0$).

С учетом указанных значений $\phi$, $\beta$, $\delta$ и $\omega$ из уравнения (1) были выведены численные значения угла падения солнечного излучения $\theta_{НП}$. Далее с использованием нижеследующих уравнений были определены численные значения углов преломления солнечных лучей $\theta_{ПР}$:

$$\theta_{ПР} = \arg\sin\left(\frac{\sin\theta_{НП}}{n_2/n_1}\right); \quad (2)$$

отражательной способности границы раздела $\rho(\theta_{НП})$:

$$\rho(\theta_{НП}) = \frac{1}{2}(\nu-\xi); \quad (3)$$

пропускательной способности с учетом только отражения $\tau_ч^{отр}$:

$$\tau_ч^{отр} = \frac{1}{2}\left[\frac{1-\nu}{1+(2N-1)\nu} + \frac{1-\xi}{1+(2N-1)\xi}\right]; \quad (4)$$

пропускательной способности с учетом только поглощения $\tau_ч^{погл}$:

$$\tau_ч^{погл} = e^{-NKL/\cos\theta_{прел}}; \quad (5)$$

и полной пропускательной способности $\tau_ч^{полн}$:

$$\tau_ч^{полн} = \tau_ч^{отр}\tau_ч^{погл}, \quad (6)$$

где $n_1$ и $n_2$ – показатели преломления солнечного излучения на разделе первой и второй среды соответственно (для обычного оконного стекла в видимой части области солнечного спектра средний показатель преломления составляет $n_2/n_1$ = 1,526); $N$ –

число прозрачных покрытий, т. е. стекол (в данном случае $N = 2$); $\nu$ и $\xi$ – отражательные способности двух компонентов на разделе среды соответственно.

Для определения численных значений $\nu$ и $\xi$ были использованы следующие тригонометрические выражения:

$$\nu = \frac{\sin^2\left(\theta_{ПР} - \theta_{НП}\right)}{\sin^2\left(\theta_{ПР} + \theta_{НП}\right)}; \quad \xi = \frac{\mathrm{tg}^2\left(\theta_{ПР} - \theta_{НП}\right)}{\mathrm{tg}^2\left(\theta_{ПР} + \theta_{НП}\right)}. \quad (7)$$

При последовательном применении уравнений (1–7) были определены численные значения $\theta_{НП}$, $\theta_{ПР}$, $\rho\left(\theta_{НП}\right)$, $\tau_ч^{отр}$, $\tau_ч^{погл}$, $\nu$ и $\xi$ для часовых углов солнца +67,5$^0$; +52,5$^0$; +37,5$^0$; +22,5$^0$; +7,5$^0$; –7,5$^0$; –22,5$^0$; –37,5$^0$; –52,5$^0$; –67,5$^0$, которые соответствуют 8$^{00}$, 9$^{00}$, 10$^{00}$, 11$^{00}$, 12$^{00}$, 13$^{00}$, 14$^{00}$, 15$^{00}$, 16$^{00}$ и 17$^{00}$ часам светлого времени суток. Результаты расчета приведены в таблице 1.

Таблица 1

Результаты расчета оптических параметров ПСК с двухстекольным прозрачным покрытием

Table 1

The optical parameters of the FSC with two glass transparent covers

| Время дня, час | 8$^{00}$ | 9$^{00}$ | 10$^{00}$ | 11$^{00}$ | 12$^{00}$ | 13$^{00}$ | 14$^{00}$ | 15$^{00}$ | 16$^{00}$ | 17$^{00}$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $\omega$, угл. град | +67,5 | +52,5 | +37,5 | +22,5 | +7,5 | –7,5 | –22,5 | –37,5 | –52,5 | –67,5 |
| $\theta_{НП}$, град. | 60 | 50 | 36 | 22 | 15 | 15 | 22 | 36 | 50 | 60 |
| $\theta_{ПР}$, град. | 34,57 | 30,13 | 22,65 | 14,22 | 9,77 | 9,77 | 14,22 | 22,65 | 30,13 | 34,57 |
| $\nu$, доля ед. | 0,304 | 0,649 | 0,761 | 0,819 | 0,834 | 0,834 | 0,819 | 0,761 | 0,649 | 0,304 |
| $\xi$, доля ед. | 0,996 | 0,984 | 0,921 | 0,859 | 0,859 | 0,859 | 0,859 | 0,921 | 0,984 | 0,996 |
| $\rho\left(\theta_{НП}\right)$, доля ед. | 0,094 | 0,062 | 0,047 | 0,046 | 0,043 | 0,043 | 0,046 | 0,047 | 0,062 | 0,094 |
| $\tau_ч^{отр}$, доля ед. | 0,65 | 0,82 | 0,83 | 0,84 | 0,85 | 0,85 | 0,84 | 0,83 | 0,82 | 0,65 |
| $\tau_{ч1}^{погл}$, доля ед. | 0,95 | 0,952 | 0,955 | 0,957 | 0,958 | 0,958 | 0,957 | 0,955 | 0,952 | 0,95 |
| $\tau_{ч2}^{погл}$, доля ед. | 0,902 | 0,906 | 0,912 | 0,916 | 0,917 | 0,917 | 0,916 | 0,912 | 0,906 | 0,902 |
| $(\tau\alpha)$, доля ед. | 0,563 | 0,714 | 0,737 | 0,739 | 0,749 | 0,749 | 0,739 | 0,737 | 0,714 | 0,563 |
| $(\tau\alpha)_e$, доля ед. | 0,631 | 0,779 | 0,798 | 0,798 | 0,808 | 0,808 | 0,798 | 0,798 | 0,779 | 0,631 |

Для того чтобы определить количество поглощенной энергии солнечного излучения поглощающей пластиной (после неоднократного отражения этих лучей) между нижним стеклом и теплопоглощающей пластиной, вначале определены значения $(\tau\alpha)$ для всех углов падения солнечного излучения $\theta_{НП}$ с применением следующего выражения:

$$(\tau\alpha) = \frac{\tau_ч^{полн}\alpha}{1-(1-\alpha)P_d}, \quad (8)$$

где $\alpha$ – направленная поглощающая способность теплопоглощающей пластины ПСК, изменяющаяся в пределах 0,9÷0,96 (независимо от ориентации нами принято $\alpha = 0{,}95$); $P_d$ – диффузная отражательная способность (для двухстекольного прозрачного покрытия $P_d = 0{,}24$).

В качестве примера ниже приведём расчет величины $(\tau\alpha)$ для 10$^{00}$ часов 15-го января, при котором $\theta_{НП} = 36^0$; $\theta_{ПР} = 22{,}65^0$; $\tau_ч^{полн} = 0{,}766$,

$$(\tau\alpha)_{10} = \frac{0{,}766 \cdot 0{,}95}{1-(1-0{,}95)\cdot 0{,}24} = \frac{0{,}728}{0{,}988} = 0{,}737.$$

Аналогичным образом были определены численные значения $(\tau\alpha)$ и для других часов. Результаты проведенных расчетов также сведены в таблицу 1.

В таблице 1 параметры $\tau_{ч1}^{погл}$ и $\tau_{ч2}^{погл}$ являются пропускательными способностями верхнего и нижнего прозрачных слоев двухстекольного ПСК с учетом только поглощения.

Далее, применив нижеследующее уравнение, определили численные значения эффективной приведенной поглощательной способности $(\tau\alpha)_e$ для прозрачного покрытия с двумя однотипными слоями:

$$(\tau\alpha)_e = (\tau\alpha) + a_1\left(1-\tau_{ч1}^{погл}\right) + a_2\left(1-\tau_{ч1}^{погл}\right), \quad (9)$$

где $a_1$ и $a_2$ – отношение полного коэффициента потерь к коэффициентам потерь первого и второго слоев прозрачного покрытия соответственно (в данном случае согласно [3] $a_1 = 0{,}15$; $a_2 = 0{,}62$).

Численные значения $\tau_{ч1}^{погл}$ и $\tau_{ч2}^{погл}$ были определены из уравнения (5). При этом для верхнего стекла принято $N = 1$, а для нижнего стекла – $N = 2$.

В качестве примера ниже приводим расчет численного значения $(\tau\alpha)_e$ для $10^{00}$ часов утра 15 января. Для проведения расчета из таблицы 1 выбрали: $(\tau\alpha) = 0{,}737$; $\tau_{ч1}^{погл} = 0{,}955$; $\tau_{ч2}^{погл} = 0{,}912$. С учетом этих значений получили:

$$(\tau\alpha)_e = 0{,}737 + 0{,}15(1–0{,}955) + 0{,}62(1–0{,}912) = 0{,}798.$$

Аналогичным образом были определены численные значения $(\tau\alpha)_e$ и для других часов. Результаты расчетов также приведены в таблице 1.

### Расчет часовых и суточных значений КПД ПСК с учетом пыли и затенения

Для того чтобы определить часовые и суточные значения КПД ПСК 1 м$^2$ площади, необходимо найти часовые значения ИСР на 1 м$^2$ наклонной плоскости. При этом следует одновременно учитывать коэффициент влияния пыли $(1-d)$ и коэффициент затенения $(1-s)$ на уменьшение солнечного излучения, поглощаемого теплопоглощающей пластиной. Как было указано выше, для г. Баку со среднегодовой скоростью ветра выше 7 м/сек за 1–2 месяца непрерывной работы ПСК влияние загрязнения на его характеристики может достичь 5÷6 %. Поэтому, с учетом регулярной промывки верхнего слоя прозрачного покрытия, в проводимых расчетах за среднегодовые значения приняты $d = 0{,}03$ и $s = 0{,}03$. Тогда получим $(1-d) = 0{,}97$ и $(1-s) = 0{,}97$.

Часовые значения ИСР на наклонной плоскости относительно горизонта определяются из следующей эмпирической формулы:

$$I_ч^{НП} = I_ч^{ГП} R, \qquad (10)$$

где $I_ч^{ГП}$ – часовое значение ИСР (в данном случае учитывается только прямая радиация) на 1 м$^2$ горизонтальной поверхности, Вт/м$^2$; $R$ – поправочный коэффициент, служащий для определения часовых значений ИСР на наклонной поверхности $I_ч^{НП}$.

Часовые значения ИСР на 1 м$^2$ горизонтальной поверхности $I_ч^{ГП}$ и среднечасовые значения температуры окружающей среды $t_{окр}$, определяемые по многолетним данным Управления гидрометеослужбы Министерства экологии и природных ресурсов АР [6], приведены в Таблице 2.

Таблица 2

Часовые значения ИСР на 1 м$^2$ горизонтальной плоскости и температура окружающей среды, наблюдаемые в г. Баку 15 января

Table 2

SRI hourly values per 1 m$^2$ horizontal plane and the ambient air temperature observed in Baku on 15th January

| Время дня, час | $8^{00}$ | $9^{00}$ | $10^{00}$ | $11^{00}$ | $12^{00}$ | $13^{00}$ | $14^{00}$ | $15^{00}$ | $16^{00}$ | $17^{00}$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $I_ч^{ГП}$, Вт/м$^2$ | 25 | 150 | 260 | 345 | 375 | 365 | 285 | 195 | 90 | 10 |
| $t_{окр}$, град. | –1 | +1 | +3 | +5 | +8 | +9 | +6 | +4 | +2 | +1 |

В работе [7] нами были определены среднемесячные значения коэффициента $R$ для г. Баку с учетом прямой, рассеянной и отраженной (альбедо) солнечной радиации. В настоящей работе учтена только прямая солнечная радиация, и для определения часовых значений $R$ использовано следующее уравнение:

$$R = \frac{\cos\theta_{НП}}{\cos\theta_{ГП}}, \qquad (11)$$

где $\cos\theta_{НП}$ является косинусом угла падения солнечных лучей на наклонную, а $\cos\theta_{ГП}$ – на горизонтальную поверхности.

Численные значения $\cos\theta_{НП}$ были определены по формуле (1), а для определения часовых значений $\cos\theta_{ГП}$ использовано следующее выражение:

$$\cos\theta_{ГП} = \sin\phi\sin\delta + \cos\phi\cos\delta\cos\omega. \qquad (12)$$

Далее, применив уравнения (10), (11) и (12) в обратной последовательности, были рассчитаны часовые значения ИСР на 1 м$^2$ наклонной поверхности $I_ч^{НП}$. А для определения часовых значений ИСР на наклонную поверхность с учетом пыли и затенения было использовано следующее уравнение:

$$\left(I_ч^{НП}\right)_e = I_ч^{НП}(\tau\alpha)_e(1-d)\cdot(1-s). \qquad (13)$$

С учетом выбранных значений коэффициентов влияния пыли $(1-d)=0{,}97$ и затенения $(1-s)=0{,}97$ уравнение (13) принимает вид:

$$\left(I_{\text{ч}}^{\text{НП}}\right)_e = 0{,}941\, I_{\text{ч}}^{\text{НП}}\,(\tau\alpha)_e, \qquad (14)$$

В качестве примера ниже приведен расчет численного значения $\left(I_{\text{ч}}^{\text{НП}}\right)_e$ для $10^{00}$ часов утра 15 января. Для проведения расчета из таблицы 2 выбраны $I_{\text{ч}}^{\text{НП}} = I_{\text{ч}}^{\text{ГП}} R$ = 260·2,44 = 634 Вт/м$^2$; $(\tau\alpha)_e$ = 0,798 и в результате расчета получено: $\left(I_{\text{ч}}^{\text{НП}}\right)_e$ = = 0,941·634·0,798 = 476 Вт/м$^2$.

Аналогичным образом были определены численные значения $\left(I_{\text{ч}}^{\text{НП}}\right)_e$ и для других часов светлого времени суток.

Для определения часовых и суточных значений КПД ПСК, с учетом влияния пыли и затенения, нами использованы следующие эмпирические выражения:

$$\eta_{\text{ч}}^{e} = \frac{q_{\text{ч}}^{U}}{I_{\text{ч}}^{\text{НП}}} \times 100\,\%; \quad \eta_{\text{сут}}^{e} = \frac{\sum q_{\text{ч}}^{U}}{\sum I_{\text{ч}}^{\text{НП}}} \times 100, \qquad (15)$$

где $q_{\text{ч}}^{U}$ – часовые значения полезно используемой части энергии солнечного излучения, определяемые по формуле

$$q_{\text{ч}}^{U} = F_R\left[\left(I_{\text{ч}}^{\text{НП}}\right)_e - U_{\text{ч}}^{L}\left(t_{\text{вх}} - t_{\text{возд}}\right)\right], \qquad (16)$$

где $F_R$ – коэффициент отвода тепла из коллектора (в нашем случае для ПСК с двухстекольным прозрачным покрытием $F_R = 0{,}9$); $U_{\text{ч}}^{L}$ – тепловые потери на каждый 1 м$^2$ поверхности ПСК (в данном случае для экспериментального ПСК с двухстекольным прозрачным покрытием тепловые потери на каждый 1 м$^2$ площади коллектора составляет $U_{\text{ч}}^{L} = 6{,}0$); $t_{\text{вх}}$ – температура теплоносителя у входа в ПСК (при расчетах принимается постоянной, в данном случае $t_{\text{вх}}$ = 60 $^0$С); $t_{\text{окр}}$ – температура окружающей среды, которая является изменяющимся параметром в течение суток. Численные значения $t_{\text{окр}}$ для г. Баку на данные часы 15 января приведены в Таблице 2.

Результаты расчетов, проводимых по уравнениям (10–14), приведены в Таблице 3.

Таблица 3

Результаты расчета часовых и суточных значений КПД ПСК с учетом влияния пыли и затенения

Table 3

The hourly and daily values of the FSC efficiency with the influence of dust and shading

| Время дня, час | $8^{00}$ | $9^{00}$ | $10^{00}$ | $11^{00}$ | $12^{00}$ | $13^{00}$ | $14^{00}$ | $15^{00}$ | $16^{00}$ | $17^{00}$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $\omega$, 0/час | +67,5 | +52,5 | +37,5 | 22,5 | +7,5 | –7,5 | –22,5 | –37,5 | –52,5 | –67,5 |
| $t_{\text{окр}}$, град. | –1 | +1 | +3 | +5 | +8 | +9 | +6 | +4 | +2 | +1 |
| $I_{\text{ч}}^{\text{ГП}}$, Вт/м$^2$ | 25 | 150 | 260 | 345 | 375 | 365 | 285 | 195 | 90 | 10 |
| $\cos\theta_{\text{ч}}^{\text{ГП}}$, доля ед. | 0,04 | 0,20 | 0,33 | 0,42 | 0,47 | 0,47 | 0,42 | 0,33 | 0,20 | 0,04 |
| $\cos\theta_{\text{ч}}^{\text{НП}}$, доля ед. | 0,44 | 0,64 | 0,81 | 0,93 | 0,99 | 0,99 | 0,93 | 0,81 | 0,64 | 0,44 |
| $R$, доля ед. | - | 3,20 | 2,44 | 2,18 | 2,09 | 2,09 | 2,18 | 2,44 | 3,2 | - |
| $I_{\text{ч}}^{\text{НП}}$, Вт/м$^2$ | - | 480 | 634 | 752 | 784 | 763 | 621 | 476 | 288 | - |
| $(\tau\alpha)$, доля ед. | 0,563 | 0,714 | 0,737 | 0,739 | 0,749 | 0,749 | 0,739 | 0,737 | 0,714 | 0,563 |
| $(\tau\alpha)_e$, доля ед. | 0,631 | 0,779 | 0,798 | 0,798 | 0,808 | 0,808 | 0,798 | 0,798 | 0,779 | 0,631 |
| $\left(I_{\text{ч}}^{\text{НП}}\right)_e$, Вт/м$^2$ | - | 352 | 476 | 565 | 596 | 580 | 466 | 357 | 211 | - |
| $U_{\text{ч}}^{L} - \left(t_{\text{вх}} - t_{\text{возд}}\right)$, Вт/м$^2$ | 366 | 354 | 342 | 330 | 312 | 306 | 324 | 336 | 348 | 354 |
| $q_{\text{ч}}^{U}$, Вт/м$^2$ | - | - | 121 | 212 | 256 | 247 | 128 | 19 | - | - |
| $\eta_{\text{ч}}^{e}$, % | 0 | 0 | 19,1 | 28,1 | 32,7 | 32,4 | 20,1 | 4,0 | 0 | 0 |
| $\sum q_{\text{ч}}^{U}$, Вт/м$^2$ | 983 | | | | | | | | | |
| $\sum I_{\text{ч}}^{\text{НП}}$, Вт/м$^2$ | 4798 | | | | | | | | | |
| $\eta_{\text{сут}}^{e}$, % | 20,5 | | | | | | | | | |

В качестве примера ниже приведен расчет численных значений общей тепловой потери $U_{ч}^{L}\left(t_{вх}-t_{окр}\right)$ и полезно используемой части энергии солнечного излучения $q_{ч}^{U}$ для $10^{00}$ часов дня. Для проведения расчета из таблиц 1 и 2 выбраны $t_{окр}$ = + 3 $^{0}$С и $\left(I_{ч}^{НП}\right)_{e}$ = 476 Вт/м$^2$ и в результате расчета получены: $U_{10}^{L}\left(t_{вх}-t_{окр}\right)$ = 6×(60–3) = 342 Вт/м$^2$ И $q_{10}^{U}$ = 0,9×(476–342) = 121 Вт/м$^2$.

Таким же образом были определены численные значения $U_{ч}^{L}\left(t_{вх}-t_{окр}\right)$ и $q_{ч}^{U}$ для других часов выбранного дня (15 января 2014 г.).

Затем с использованием уравнения (15) были определены часовые и среднесуточные значения КПД ПСК. При этом были учтены соответствующие часовые и суточные значения $I_{ч}^{НП}$, $\sum I_{ч}^{НП}$, определяемые без учета влияния пыли и затенения, а также значения $q_{ч}^{U}$ и $\sum q_{ч}^{U}$, определяемые с учетом влияния пыли и затенения.

Для примера ниже приводим расчет часового значения КПД ПСК для $10^{00}$ часов утра 15 января $\eta_{10}$. Чтобы произвести расчет, из таблицы 3 выбираем $q_{10}^{U}=121$ Вт/м$^2$; $I_{ч}^{НП}$ = 634 Вт/м$^2$ и с учетом выбранных параметров $q_{ч}^{U}$ и $I_{ч}^{НП}$ из уравнения (15) находим часовое значение КПД ПСК $\eta_{10}$:

$$\eta_{10}^{U}=\frac{121}{324}\times 100=19,1\,\%.$$

Аналогичным образом были определены часовые значения КПД ПСК и для других часов светлого времени суток.

Для того чтобы определить среднесуточные значения КПД ПСК, с учетом влияния пыли и затенения, сначала были определены суммарные суточные значения $\sum I_{ч}^{НП}$ и $\sum q_{ч}^{U}$, которые также приведены в Таблице 3. Установлено, что суммарные суточные значения $I_{ч}^{НП}$ и $q_{ч}^{U}$ составляют $\sum I_{ч}^{НП}$ = 4798 Вт/м$^2$ и $\sum q_{ч}^{U}$ = 983 Вт/м$^2$ соответственно. С учетом указанных значений $\sum q_{ч}^{U}$ и $\sum I_{ч}^{НП}$ из уравнения (15) находим $\eta_{сут}^{e}=\frac{983}{4798}\times 100=20,5\,\%$.

Как видно из уравнения (14), значение общего коэффициента влияния пыли и затенения (одновременное влияние) на параметры ПСК составляет $\left(1-d\right)\times\left(1-s\right)$ = 0,941. Поэтому для идеального случая, т. е. когда $\left(1-d\right)=1$ и $\left(1-s\right)=1$ ($d$ = 0 и $s$ = 0), суточное значение КПД ПСК может быть найдено следующим образом: $\eta_{сут}^{ид}=\frac{\eta_{сут}}{0,941}=\frac{20,5}{0,941}=21,8\,\%$.

Как видно из сопоставления двух значений суточного КПД, найденных для идеального и реального (без учета и с учетом пыли и затенения) режимов работы ПСК, разница между ними составляет всего лишь $\Delta\eta_{сут}$ = 1,3. А если выражать в процентах, то общее влияние пыли и затенения на суточное значение КПД ПСК в условиях г. Баку для 15-го января 2014 г. может составить: $\Delta\bar{\eta}_{сут}=\frac{\Delta\eta_{сут}}{\eta_{сут}^{ид}}\times 100\approx 6,0\,\%$

Согласно уравнению (13), как часовые, так и суточные значение ИСР на наклонной плоскости ПСК, в зависимости от изменения коэффициентов влияния пыли ($d$) и затенения ($s$) изменяются линейно. Таким же образом изменяются и численные значения $q_{ч}^{U}$, $\eta_{ч}^{e}$, $\eta_{сут}^{e}$ в зависимости от изменения численных значений $d$ и $s$.

В качестве примера на рис. 1 и рис. 2 показаны суточные изменения $\left(I_{ч}^{НП}\right)_{e}$ для различных значений коэффициентов влияния пыли ($d$) и затенения ($s$).

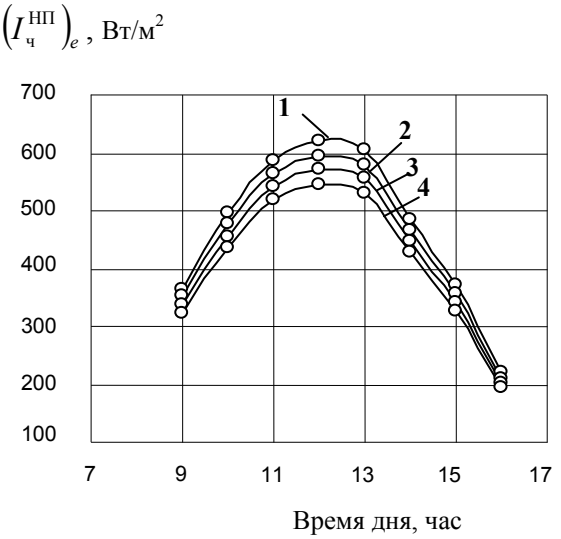


**Рис. 1.** Суточные изменения $\left(I_{ч}^{НП}\right)_{e}$ для различных значений коэффициента влияния пыли $d$ при $s$ = 0,98 (кривые 1, 2, 3 и 4 соответствуют значениям $d$ = 1,0; $d$ = 0,96; $d$ = 0,92 и $d$ = 0,88)

**Fig. 1.** Diurnal variation changes $\left(I_{ч}^{НП}\right)_{e}$ for different values of the coefficient of dust influence $d$ at $s$ = 0.98 (curves 1, 2, 3 and 4 correspond to the values of $d$ = 1.0; $d$ = 0.96; $d$ = 0.92 and $d$ = 0.88)

При этом все кривые, представленные на рис. 1, относятся к значению коэффициента затенения $s$ = 0,98, а кривые, представленные на рис. 2, – к значению $s$ = 0,9.

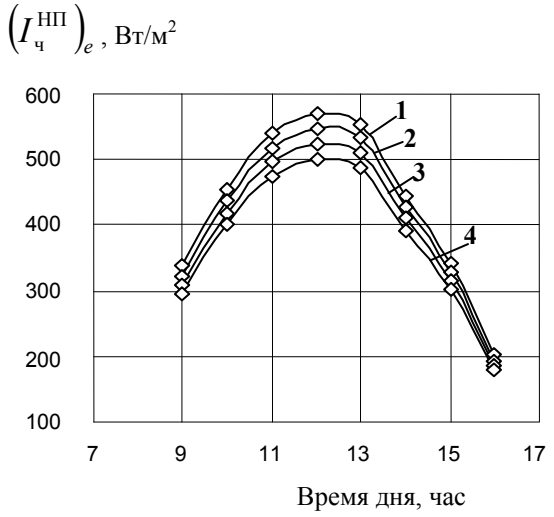


**Рис. 2.** Суточные изменения $\left(I_{ч}^{НП}\right)_e$ для различных значений коэффициента влияния пыли $d$ при $s$ = 0,9 (кривые 1, 2, 3 и 4 соответствуют значениям $d$ = 1,0; $d$ = 0,96; $d$ = 0,92 и $d$ = 0,88)

**Fig. 2.** Diurnal variation changes $\left(I_{ч}^{НП}\right)_e$ for different values of the coefficient of dust influence $d$ at $s$ = 0.9 (curves 1, 2, 3 and 4 correspond to the values of $d$ = 1.0; $d$ = 0.96; $d$ = 0.92 and $d$ = 0.88

Что касается коэффициента влияния пыли $d$, то он изменяется в пределах 0,88 ÷ 1,0 (в двух рисунках кривые 1, 2, 3 и 4 соответствуют численным значениям $d$ = 1,0; $d$ = 0,96; $d$ = 0,92 и $d$ = 0,88). При построении этих кривых параметры были выбраны с учетом реальных возможностей загрязнения верхнего слоя прозрачного покрытия ПСК при 3÷4 часах непрерывной работы каждый день в течение одного месяца в условиях г. Баку. Из сопоставления рисунков 1 и 2, видно, что как максимальное значение, наблюдаемое в полдень, так и остальные значения $\left(I_{ч}^{НП}\right)_e$, наблюдаемые до и после полудня, в зависимости от изменения этих двух коэффициентов (по мере уменьшения их численных значений) линейно перемещаются в сторону уменьшения $\left(I_{ч}^{НП}\right)_e$. При этом разница между максимальными и минимальными значениями $\left(I_{ч}^{НП}\right)_e$, определяемыми для $s$ = 0,9; $d$ = 1,0 и $s$ = 0,98; $d$ = 0,88 соответственно, является существенной (например, для полудня этот показатель составляет $\Delta\left(I_{ч}^{НП}\right)_e$ = 621–502 = 119 Вт/м²). А это означает, что при изменении коэффициентов $s$ и $d$ в указанных пределах, около 19,1 % мощности ИСР, поступающей на поверхности ПСК, теряется. Но, как было указано выше, в практических условиях, т. е. при нормальном обслуживании, суммарное влияние этих коэффициентов на оптические и теплоэнергетические параметры ПСК не превосходит 5÷6 %.

Для большей наглядности на рисунках 3 и 4 представлены графические зависимости $\left(I_{ч}^{НП}\right)_e$ от коэффициента влияния пыли (при этом кривые 1, 2, 3, 4, 5 и 6 соответствуют значениям коэффициента затенения $s$ = 0; 0,02; 0,04; 0,06; 0,08 и 0,1) и от коэффициента затенения (кривые 1, 2, 3, 4, 5 и 6 соответствуют значениям коэффициента влияния пыли $d$ = 0,01; 0,03; 0,05; 0,07; 0,09 и 0,11). Все кривые сняты для $10^{00}$ час дня.

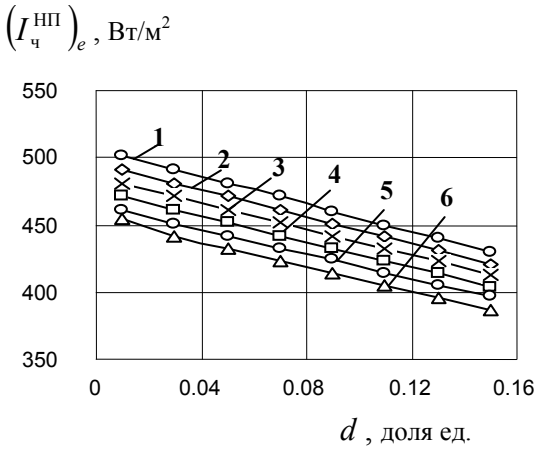


**Рис. 3.** Графическая зависимость $\left(I_{ч}^{НП}\right)_e$ от коэффициента влияния пыли $d$ : (кривые 1, 2, 3, 4, 5 и 6 соответствуют значениям коэффициента затенения $s$ = 0; $s$ = 0,02; $s$ = 0,04; $s$ = 0,06; $s$ = 0,08 и $s$ = 0,1)

**Fig. 3.** Graphic dependence of $\left(I_{ч}^{НП}\right)_e$ on the coefficient of dust impact $d$ : (curves 1, 2, 3, 4, 5 and 6 correspond to the values of the shading coefficient $s$ = 0; $s$ = 0.02; $s$ = 0.04; $s$ = 0.06; $s$ = 0.08 and $s$ = 0.1)

Как видно на рис. 3, разница между максимальным и минимальным значениями $\left(I_{ч}^{НП}\right)_e$ составляет $\Delta\left(I_{ч}^{НП}\right)_e$ = 501–387 = 114 Вт/м², а это 22,8 % от максимальной мощности. Как видно, при больших значениях $s$ и $d$ в утренние и вечерние часы за счет увеличения угла поступления солнечных лучей на поверхности ПСК потерянная часть мощности ИСР тоже растет. А это отрицательно влияет как на часо-

вые, так и на суточные показатели ПСК, в том числе на численные значения $\left(I_{ч}^{НП}\right)_e$, $q_{ч}^{U}$ и $\eta_{ч}^{e}$.

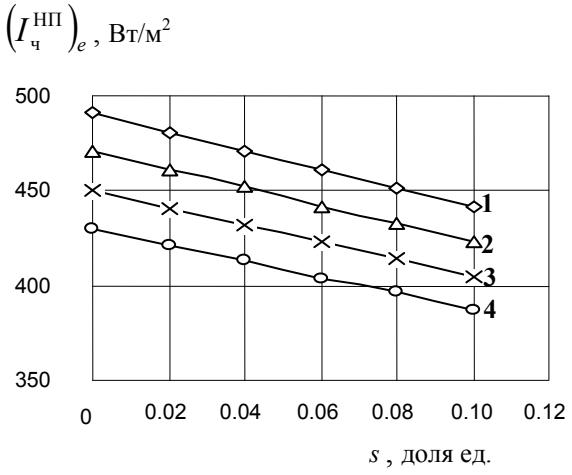


**Рис. 4.** Графическая зависимость $\left(I_{ч}^{НП}\right)_e$ от коэффициента затенения $s$:
(кривые 1, 2, 3, 4, 5 и 6 соответствуют значениям коэффициента влияния пыли $d$ = 0,01; $d$ = 0,03; $d$ = 0,05; $d$ = 0,07; $d$ = 0,09 и $d$ = 0,11)

**Fig. 4.** Graphic dependence of $\left(I_{ч}^{НП}\right)_e$ on shading coefficient $s$ (curves 1, 2, 3, 4, 5 and 6 correspond to the values of the coefficient of dust impact $d$ = 0.01; $d$ = 0.03; $d$ = 0.05; $d$ = 0.07; $d$ = 0.09 and $d$ = 0.11)

Для большей наглядности на рис. 5 представлены графические зависимости $\left(I_{ч}^{НП}\right)_e$ (кривая 1), $q_{ч}^{U}$ (кривая 2) и $\eta_{ч}^{e}$ (кривая 3) от коэффициента влияния пыли $d$, при значении коэффициента затенения $s$ = 0,03; а на рис. 6 – графические зависимости $\left(I_{ч}^{НП}\right)_e$ (кривая 1), $q_{ч}^{U}$ (кривая 2) и $\eta_{ч}^{e}$ (кривая 3) от коэффициентов влияния пыли $d$ и затенения $s$, при их одновременном влиянии.

Обе кривые построены для $10^{00}$ часов дня. Как видно из сопоставления рис. 5 и 6, во втором случае (при одновременном изменении этих двух коэффициентов) часовое значение КПД ПСК изменяется в более широких пределах (от 9,0 до 22,6 %), чем в первом случае (при изменении только коэффициента влияния пыли $d$ при постоянном значении $s$ = 0,03), при котором часовое значение КПД изменяется в пределе 14,2÷21,1 %.

Таким же образом изменяются и часовые значения полезно используемой части энергии солнечного излучения $q_{ч}^{U}$ (в первом и во втором случаях в пределах 90÷134 Вт/м² и 57÷143 Вт/м² соответственно).

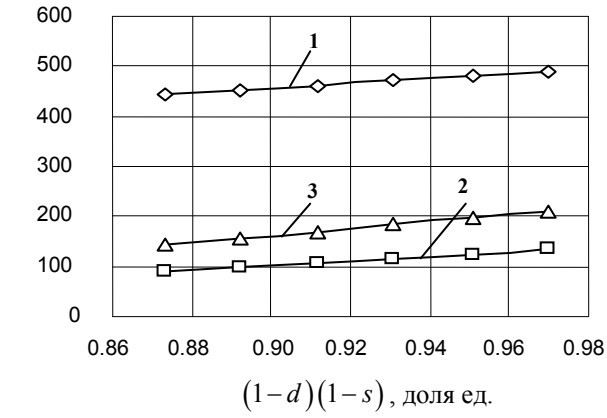


**Рис. 5.** Графические зависимости $\left(I_{ч}^{НП}\right)$ (кривая 1), $q_{ч}^{U}$ (кривая 2) и $\eta_{ч}^{e}$ (кривая 3) от коэффициента влияния пыли $d$ при значении коэффициента затенения ($s$ = 0,03)

**Fig. 5.** Graphic dependence $\left(I_{ч}^{НП}\right)$ (curve 1), $q_{ч}^{U}$ (curve 2) and $\eta_{ч}^{e}$ (curve 3) of the impact of dust coefficient $d$ at a value of shading coefficient ($s$ = 0.03)

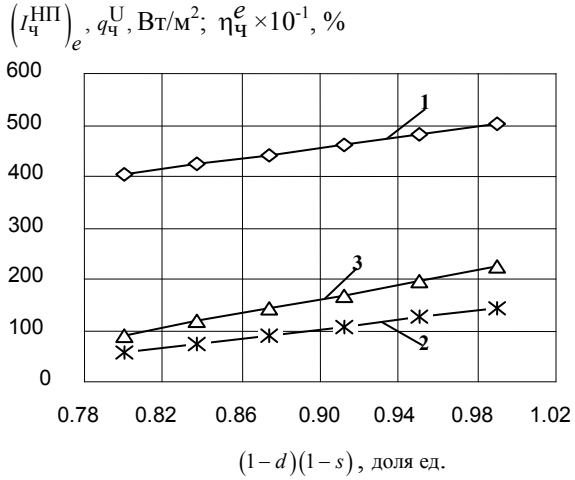


**Рис. 6.** Графические зависимости $\left(I_{ч}^{НП}\right)$ (кривая 1), $q_{ч}^{U}$ (кривая 2) и $\eta_{ч}^{e}$ (кривая 3) от коэффициентов влияния пыли $d$ и затенения $s$ при их одновременном влиянии

**Fig. 6.** Graphic dependence $\left(I_{ч}^{НП}\right)$ (curve 1), $q_{ч}^{U}$ (curve 2) and $\eta_{ч}^{e}$ (curve 3) of the coefficients of dust influence $d$ and shading $s$ at their impact

## Выводы

1. На основе проведенных расчетов с учетом экспериментальных данных, а также данных Управления гидрометеослужбы Министерства экологии и природных ресурсов Азербайджанской Республики, установлено, что в условиях Апшеронского полуострова, в частности г. Баку, при длительной непрерывной работе ПСК за счет влияния пыли как оптические, так и теплоэнергетические параметры значительно ухудшаются. Для устранения указанного недостатка, по меньшей мере раз в месяц необходимо промывать первый (верхний) слой двухстекольного прозрачного покрытия ПСК

2. Определено, что при изменении коэффициента влияния пыли в интервале от 0,01 до 0,15 и постоянном значении коэффициента затенения ($s$ = 0,03) часовое значение КПД ПСК снижается всего лишь на 2,8 %, по сравнению с идеальным случаем, когда численные значения обоих коэффициентов приравниваются к нулю.

3. Показано, что основным фактором, влияющим на собственные параметры ПСК, является оптимальное установление отдельных панелей ПСК относительно друг друга с условием наименьшего затенения.

4. Выявлено, что в самом худшем случае, когда коэффициенты $s$ и $d$ изменяются в широких пределах (например, в пределах 0,02÷0,1 и 0÷0,12 соответственно), около 19,1 % мощности ИСР, поступающей на поверхности ПСК, теряется как отраженное солнечное излучение. Но в практических условиях, т. е. при нормальном обслуживании, суммарное влияние этих коэффициентов на оптические и теплоэнергетические параметры ПСК не превышает 5÷6%.

5. Определено, что при больших значениях $s$ и $d$ в утренние и вечерние часы, за счет увеличения угла падения солнечных лучей на поверхности ПСК, потерянная часть мощности ПСК тоже растет. А это оказывает отрицательное влияние, как на часовые, так и на суточные показатели ПСК, в том числе на численные значения $\left(I_{ч}^{НП}\right)_e$, $q_{ч}^{U}$ и $\eta_{ч}^{e}$.

6. Из сопоставления графиков, построенных расчетным путем, установлено, что при одновременном изменении коэффициентов $s$ и $d$ часовое значение КПД ПСК изменяется в более широких пределах (от 9,0 до 22,6 %), чем при изменении только коэффициента влияния пыли $d$ при постоянном значении коэффициента затенения ($s$ = 0,03), при котором часовое значение КПД изменяется от 14,2 до 21,1 %. А часовые значения полезно используемой части энергии солнечного излучения $q_{ч}^{U}$ в первом и во втором случаях изменяются в пределах 90÷134 Вт/м$^2$ и 57÷143 Вт/м$^2$ соответственно.

## Список литературы


1. Саламов О.М. Процесс аккумулирования солнечной энергии с использованием полупроводниковых фотопреобразователей: Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. Баку, 1990.
2. Саламов О.М., Мамедов Ф.Ф., Самедова У.Ф. Перспективы использования энергии ветра в условиях Азербайджана // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEE). 2010. № 1 (81). С. 132–144.
3. Даффи Дж.А., Бекман У.А. Тепловые процессы с использованием солнечной энергии. М.: Мир, 1977.
4. Байрамов Р.А., Ушакова А.Д. Солнечные водонагревательные установки. Ашхабад: Ылым, 1987.
5. Бекман У., Клейн С., Даффи Дж. Расчет систем солнечного теплоснабжения. М.: Энергоиздат, 1982.
6. Национальное сообщение Азербайджанской Республики по Рамочной Конвенции ООН по климату. Государственный Комитет по Гидрометеорологии Азербайджанской Республики. Б.: 2011.
7. Саламов О.М., Аббасова Ф.Ф., Рзаев П.Ф. Расчет солнечной водоподогревательной системы для горячего водоснабжения сельской семьи // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEE). 2006. № 10 (42). С. 30–36.


## References


1. Salamov O.M. Process Akkumulirovaniâ solnečnoj ènergii s ispol'zovaniem poluprovodnikovyh fotopreobrazovatelej: Diss. kand. fiz.-mat. nauk. Baku, 1990 [in Russ.].
2. Salamov O.M., Mammadov F.F., Samadova U.F. Prospects of wind energy application in Azerbaijan. *International Scientific Journal "Alternative Energy and Ecology" (ISJAEE)*, 2010, no. 1 (81), pp. 132–144.
3. Daffi Dž.A., Bekman U.A. Teplovye processy s ispol'zovaniem solnečnoj ènergii. Moscow: Mir Publ., 1977 [in Russ.].
4. Bajramov R.A., Ushakova A.D. Solnečnye vodonagrevatel'nye ustanovki. Ashhabad.: Ylym Publ., 1987 [in Russ.].
5. Bekman U., Klejn S., Daffi Dž. Rasčet sistem solnečnogo teplosnabženiâ. Moscow: Ènergoizdat Publ., 1982 [in Russ.].
6. Nacional'noe soobŝenie Azerbajdžanskoj Respubliki po Ramočnoj Konvencii OON po klimatu. Gosudarstvennyj Komitet po Gidrometeorologii Azerbajdžanskoj Respubliki. B.: 2011 [in Russ.].
7. Salamov O.M., Abbasova F.F., Rzaev P.F. Rasčet solnečnoj vodopodogrevatel'noj sistemy dlâ gorâčego vodosnabženiâ sel'skoj sem'i. *International Scientific Journal "Al'ternativnaâ ènergetika i èkologiâ" (ISJAEE)*, 2006, no. 10 (42), pp. 30–36 [in Russ.].


*Транслитерация по ISO 9:1995*