



(a) (b)

Fig. 4 – a) Positioning scheme of Enercon E 82 wind turbines; b) Positioning scheme of Enercon E 126 wind turbines

Discussion

Thus, wind energy sector development in Karelia is proved and expediently. To search a rational way of development it is important to take into account changes in carbon balance of region. One of the rational ways of Karelia's development in view of resource, economic and ecological aspects (carbon balance) and restrictions is found.

In this variant further development of the large-scale and small hydro energetics and wind energetics are supposed. The balance is covered by input of heat power plant on natural gas with total power 500-1000 MW. Also it is necessary to build heat power plant on natural gas with total power 180 MW in Petrozavodsk and power plants on biomass.

References

1. Sidorenko G.I., Sidorenko D.G. Model of optimization and rational use of Karelia's renewable energy resources. Journal "Ecology of Industrial Manufacturing", №4, 2007. pp.10-22.
2. Climatic Factors of Renewable Sources of Energy // V.V. Elistratov [et al.]. Ed.: V.V. Elistratov, N.V. Kobysheva and G.I. Sidorenko, 2010, - SPb.: Nauka, - 235 p.: ill
3. Zubarev, V., Minin, V., Stepanov, I., 1989, "Use of wind energy in northern regions", Nauka, Leningrad, Russia.
4. Sidorenko, G., 1993, "Space-time distribution and integral estimates of renewable energy sources of Karelia", Tiedonantoja 15, Vol.1, University of Joensuu, Finland, 19-38.
5. Sidorenko G.I. Kemsкая Wind Power Plant in Karelia // Applied Mechanics and Materials. 2014. №672-674. REET-2014. pp.240-245

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОТОКА СОЛНЕЧНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ MODELING THE FLUX OF SOLAR RADIATION

Е. А. Уткина, Г. И. Сидоренко
E. Utkina, G. Sidorenko

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
г. Санкт-Петербург, Россия,
sgenergom@yandex.ru utkina.ea@edu.spbstu.ru
Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, St.Petersburg, Russia

Существует ряд методик, позволяющих определить поток солнечного излучения на принимающую поверхность. Наилучшие результаты дает методика Берда. Ее улучшение возможно введением поправочных коэффициентов. Моделирование потока солнечного излучения, построенное на данном подходе, дает достаточно точные результаты для решения практических задач. Для повышения достоверности расчетов целесообразно более широко использовать базы данных актинометрических наблюдений, полученных в постах наблюдений на территории бывшего СССР.

There are a number of methods to determine the flux of solar radiation onto the receiving surface. The best results are obtained by Byrd's method. Its improvement is possible by introducing correction factors. Simulation of the solar radiation flux, based on this approach, gives sufficiently accurate results for solving practical problems. To increase the reliability of calculations, it is advisable to use more extensively the databases of actinometric observations obtained at observation posts on the territory of the former USSR.

Ключевые слова: возобновляемая энергия, методика Берда, поток солнечного излучения, солнечные технологии.

Keywords: renewable energy, Byrd's method, solar flux, solar technology.

<https://doi.org/10.46646/SAKH-2021-2-321-324>

Для оценки экономической эффективности солнечных технологий необходимо иметь данные о поступлении солнечного излучения (СИ) на принимающую поверхность. Поток СИ зависит от ряда факторов: климатические условия, географическое положение солнечной установки и других.

Существует ряд методик, позволяющих определить поток СИ на горизонтальную поверхность. Согласно результатам расчетов среднеквадратичных ошибок отклонения расчетных значений потока СИ от наблюдаемых для различных методик [1], наименьшую погрешность имеет методика Бёрда [2]. Данная методика проста в использовании и дает возможность рассчитать все составляющие потока СИ без использования дополнительных данных.

Для повышения достоверности полученных данных были введены поправочные коэффициенты, зависящие от типа поверхности, излучения, а также сезона года [1, 3]. Поправочные коэффициенты были рассчитаны по методу наименьших квадратов. За критерий выбора лучшего коэффициента принималось требование минимальной суммы квадратов расхождения наблюдаемых и расчетных данных в каждом месяце года для 50 различных станций, расположенных на постсоветском пространстве. Значения поправочных коэффициентов представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Значения поправочных коэффициентов

| Тип поверхности | Прямое излучение | Диффузное излучение |
|-----------------|--|--------------------------------------|
| Следящая | $K_{\text{след}}^{\text{пр}} = 0,9$ | – |
| Горизонтальная | $K_{\text{гор}}^{\text{пр}} = 1,14$ - зима $K_{\text{гор}}^{\text{пр}} = 0,91$ - лето | $K_{\text{гор}}^{\text{диф}} = 1,05$ |

С учетом поправочных коэффициентов зависимости для расчета потока СИ на горизонтальную поверхность при чистом небе имеют вид:

– для прямого СИ:

$$E_{\text{гор}}^{\text{пр}} = E_c * \cos \cos \theta_z * \tau_R \tau_{O_3} \tau_{\text{газ}} \tau_{H_2O} \tau_A K_{\text{гор}}^{\text{пр}}, \quad (1)$$

– для диффузного СИ:

$$E_{\text{гор}}^{\text{диф}} = (E_c * \cos \cos \theta_z * \tau_{O_3} \tau_{\text{газ}} \tau_{H_2O} \tau_{AA} * (0,5(1 - \tau_R) + B_a(1 - \tau_{AS_i}))) / (1 - M_i^* + M_i^{*1.02}) K_{\text{гор}}^{\text{диф}}, \quad (2)$$

где E_c – солнечная постоянная, 1367 Вт/м²; θ_z – угол падения солнечных лучей на горизонтальную поверхность; τ_R – коэффициент пропускания, учитывающий релеевское рассеивание СИ; τ_A – коэффициент пропускания, учитывающий ослабление СИ аэрозолями; τ_{AA} , τ_{AS} – коэффициенты пропускания, учитывающие аэрозольное поглощение и рассеивание СИ; τ_{O_3} , $\tau_{\text{газ}}$, τ_{H_2O} – коэффициенты пропускания, учитывающие поглощение СИ озоном, газами и водой; $K_{\text{гор}}^{\text{пр}}$, $K_{\text{гор}}^{\text{диф}}$ – поправочные коэффициенты для расчета прямого и диффузного СИ на территории бывшего СССР.

Плотность полного СИ при чистом небе:

$$E_{\text{гор}}^{\text{полн}} = (E_{\text{гор}}^{\text{пр}} + E_{\text{гор}}^{\text{диф}}) / (1 - r_z * r_{a_i}), \quad (3)$$

где r_z , r_{a_i} – альбедо земной поверхности и атмосферы.

Данная методика была использована для моделирования потока СИ в пос. Новомихайловский (Краснодарский край). Для определения достоверности моделирования результаты расчета были сопоставлены с экспериментальными данными о приходе солнечной радиации на горизонтальную поверхность, которые были получены студентами Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого (СПбПУ) в 2016 году. Продолжительность светового дня в выбранные даты составляла 15 часов (восход солнца приходился на 5:00, закат на 20:00). Для каждого часа были рассчитаны потоки СИ. Полученные значения потоков СИ представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Значения потока СИ в течение светового дня в п. Новомихайловский (Южный лагерь СПбПУ) *

| Дата | 04.07 | 05.07 | 06.07 | 07.07 | 08.07 | 09.07 | 11.07 | 12.07 | 13.07 | 14.07 |
|------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 5:00 | | | | | | | | | | |
| $E_{гор}^{пр}$ | 0.64 | 0.56 | 0.48 | 0.41 | 0.34 | 0.28 | 0.16 | 0.11 | 0.06 | 0.02 |
| $E_{гор}^{полн}$ | 1.15 | 0.97 | 0.80 | 0.65 | 0.51 | 0.39 | 0.20 | 0.12 | 0.07 | 0.02 |
| 6:00 | | | | | | | | | | |
| $E_{гор}^{пр}$ | 52.48 | 51.68 | 50.79 | 49.90 | 49.02 | 48.06 | 52.48 | 45.12 | 44.09 | 43.08 |
| $E_{гор}^{полн}$ | 85.05 | 83.97 | 82.77 | 81.58 | 80.38 | 79.08 | 85.05 | 75.06 | 73.65 | 72.25 |
| 7:00 | | | | | | | | | | |
| $E_{гор}^{пр}$ | 161.30 | 160.14 | 159.11 | 157.95 | 156.80 | 155.65 | 153.12 | 151.86 | 150.60 | 149.23 |
| $E_{гор}^{полн}$ | 218.04 | 216.71 | 215.50 | 214.16 | 212.82 | 211.49 | 208.54 | 207.07 | 205.60 | 204.00 |
| 8:00 | | | | | | | | | | |
| $E_{гор}^{пр}$ | 286.79 | 285.73 | 284.67 | 283.49 | 282.32 | 281.14 | 278.66 | 277.37 | 276.07 | 274.65 |
| $E_{гор}^{полн}$ | 359.96 | 358.78 | 357.61 | 356.30 | 354.99 | 353.68 | 350.93 | 349.48 | 348.04 | 346.46 |
| 9:00 | | | | | | | | | | |
| $E_{гор}^{пр}$ | 408.28 | 407.31 | 406.34 | 405.26 | 404.18 | 403.09 | 400.71 | 399.51 | 398.31 | 397.00 |
| $E_{гор}^{полн}$ | 493.61 | 492.55 | 491.49 | 490.31 | 489.12 | 487.94 | 485.33 | 484.03 | 482.72 | 481.29 |
| 10:00 | | | | | | | | | | |
| $E_{гор}^{пр}$ | 511.56 | 510.74 | 509.82 | 508.91 | 507.99 | 506.98 | 504.85 | 503.74 | 502.63 | 501.51 |
| $E_{гор}^{полн}$ | 605.78 | 604.89 | 603.91 | 602.91 | 601.92 | 600.83 | 598.53 | 597.32 | 596.12 | 594.91 |
| 11:00 | | | | | | | | | | |
| $E_{гор}^{пр}$ | 586.10 | 585.38 | 584.65 | 583.85 | 583.05 | 582.17 | 580.40 | 579.43 | 578.39 | 577.34 |
| $E_{гор}^{полн}$ | 686.24 | 685.46 | 684.68 | 683.82 | 682.95 | 682.00 | 680.09 | 679.05 | 677.93 | 676.80 |
| 12:00 | | | | | | | | | | |
| $E_{гор}^{пр}$ | 624.85 | 624.31 | 623.70 | 622.99 | 622.28 | 621.57 | 620.07 | 619.09 | 618.30 | 617.32 |
| $E_{гор}^{полн}$ | 727.93 | 727.36 | 726.69 | 725.93 | 725.17 | 724.41 | 722.79 | 721.74 | 720.89 | 719.84 |
| 13:00 | | | | | | | | | | |
| $E_{гор}^{пр}$ | 624.26 | 623.79 | 623.32 | 622.73 | 622.14 | 621.54 | 620.10 | 619.37 | 618.52 | 617.73 |
| $E_{гор}^{полн}$ | 727.30 | 726.80 | 726.29 | 725.65 | 725.01 | 724.37 | 722.82 | 722.04 | 721.13 | 720.27 |
| 14:00 | | | | | | | | | | |
| $E_{гор}^{пр}$ | 584.36 | 583.93 | 583.56 | 583.05 | 582.53 | 581.95 | 580.69 | 580.03 | 579.21 | 578.39 |
| $E_{гор}^{полн}$ | 684.37 | 683.89 | 683.50 | 682.95 | 682.40 | 681.76 | 680.41 | 679.69 | 678.81 | 677.93 |
| 15:00 | | | | | | | | | | |
| $E_{гор}^{пр}$ | 508.81 | 508.45 | 508.08 | 507.62 | 507.16 | 506.61 | 505.41 | 504.67 | 503.93 | 503.09 |
| $E_{гор}^{полн}$ | 602.81 | 602.42 | 602.02 | 601.52 | 601.02 | 600.43 | 599.13 | 598.33 | 597.53 | 596.62 |
| 16:00 | | | | | | | | | | |
| $E_{гор}^{пр}$ | 404.72 | 404.50 | 404.07 | 403.64 | 403.20 | 402.66 | 401.36 | 400.71 | 399.95 | 399.07 |
| $E_{гор}^{полн}$ | 489.72 | 489.48 | 489.01 | 488.53 | 488.06 | 487.47 | 486.05 | 485.33 | 484.50 | 483.55 |
| 17:00 | | | | | | | | | | |
| $E_{гор}^{пр}$ | 282.90 | 282.55 | 282.20 | 281.73 | 281.26 | 280.67 | 279.37 | 278.66 | 277.84 | 276.90 |
| $E_{гор}^{полн}$ | 355.64 | 355.25 | 354.86 | 354.33 | 353.81 | 353.16 | 351.71 | 350.93 | 350.01 | 348.96 |
| 18:00 | | | | | | | | | | |
| $E_{гор}^{пр}$ | 157.49 | 157.15 | 156.80 | 156.34 | 155.76 | 155.19 | 153.81 | 153.12 | 152.20 | 151.40 |
| $E_{гор}^{полн}$ | 213.63 | 213.22 | 212.82 | 212.29 | 211.62 | 210.95 | 209.35 | 208.54 | 207.47 | 206.54 |
| 19:00 | | | | | | | | | | |
| $E_{гор}^{пр}$ | 49.72 | 49.46 | 49.11 | 48.67 | 48.23 | 47.79 | 46.67 | 45.98 | 45.29 | 44.61 |
| $E_{гор}^{полн}$ | 81.34 | 80.98 | 80.50 | 79.91 | 79.31 | 78.72 | 77.18 | 76.24 | 75.30 | 74.36 |
| 20:00 | | | | | | | | | | |
| $E_{гор}^{пр}$ | 0.42 | 0.40 | 0.37 | 0.33 | 0.29 | 0.26 | 0.19 | 0.15 | 0.11 | 0.08 |
| $E_{гор}^{полн}$ | 0.68 | 0.62 | 0.56 | 0.49 | 0.42 | 0.36 | 0.24 | 0.18 | 0.13 | 0.08 |

* - все данные предоставлены в Вт/м²

Энергия падающего солнечного излучения на горизонтальную поверхность была найдена по следующим формулам:

– для прямого СИ:

$$W_{\text{гор}}^{\text{пр.расч}} = \int_{t_{\text{восх}}}^{t_{\text{зах}}} E_{\text{гор}}^{\text{пр}} dt, \quad (4)$$

– для полного СИ:

$$W_{\text{гор}}^{\text{полн.расч}} = \int_{t_{\text{восх}}}^{t_{\text{зах}}} E_{\text{гор}}^{\text{полн}} dt, \quad (5)$$

где $t_{\text{восх}}$, $t_{\text{зах}}$ – время восхода и захода Солнца.

С помощью полученных данных, представленных в таблице 2, а также формул (4-5), был найден приход солнечной энергии на горизонтальную поверхность при чистом небе для каждого расчетного дня. Результаты представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Приход солнечной радиации в п. Новомихайловский (Южный лагерь СПбПУ)*

| Дата | 04.07 | 05.07 | 06.07 | 07.07 | 08.07 | 09.07 | 11.07 | 12.07 | 13.07 | 14.07 |
|-------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $W_{\text{гор}}^{\text{экспер.}}$ | 4929 | 5347 | 5393 | 5723 | 4034 | 5338 | 3859 | 5274 | 5583 | 5716 |
| $W_{\text{гор}}^{\text{пр.расч}}$ | 5245 | 5236 | 5227 | 5217 | 5207 | 5196 | 5178 | 5159 | 5146 | 5131 |
| $W_{\text{гор}}^{\text{полн.расч}}$ | 6333 | 6323 | 6313 | 6301 | 6290 | 6277 | 6258 | 6235 | 6220 | 6204 |

* - все данные предоставлены в Вт*ч/м²

Выводы:

1. Сопоставление результатов моделирования потока СИ на горизонтальную поверхность при чистом небе (прямое СИ) с экспериментальными измерениями показывает возможность использования такого подхода при решении практических задач (средняя погрешность составила около 9%).

2. Целесообразно более широко использовать базы данных актинометрических наблюдений, полученных в постах наблюдений на территории бывшего СССР.

ЛИТЕРАТУРА

1. Аронова, Е.С. Методика расчета реальной плотности солнечного излучения при проектировании фотоэлектрических энергоустановок / Е.С.Аронова, В.А. Грилихес// Научно-технические ведомости СПбГПУ.2006. Т.1. № 6. Естественные и технические науки. С. 62-66.

2. Bird, R.E., Hulstrom, R.L. A simplified clear sky model for direct and diffuse insolation on horizontal surface / R. E.Bird, R.L.Hulstrom // SERI/TR-642-761, Solar Energy Research Institute (SERI/NREL). 1981. P. 7-10.

3. Солнечные энергоустановки. Оценка поступления солнечного излучения: учебное пособие / В.В.Елистратов, В.А. Грилихес., Е.С.Аронова. СПб: Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2009. 101 с.

ГЛУБОКАЯ УТИЛИЗАЦИЯ ДЫМОВЫХ ГАЗОВ КОТЕЛЬНЫХ НА ДРЕВЕСНОЙ БИОМАССЕ

DEEP UTILIZATION OF BOILER'S SMOKE GASES ON WOOD BIOMASS

А. Р. Хамицевич, А. А. Бутько, Л. А. Липницкий
A. R. Khamitsevich, A. A. Butko, L. A. Lipnitsky

Белорусский государственный университет, МГЭИ им. А. Д. Сахарова БГУ
г. Минск, Республика Беларусь
alexunderson001@gmail.com

Belarusian State University, ISEI BSU, Minsk, the Republic of Belarus

В данной работе рассматривается возможность экономии топлива при глубокой утилизации дымовых газов котельных на быстрорастущей древесной биомассе. В качестве биомассы предлагается использовать иву.

This paper discusses the possibility of fuel saving with deep utilization of flue gases from boilers using fast-growing woody biomass. It is proposed to use willow as biomass.