

УДК 697.132.3

**АНАЛИТИЧЕСКИЙ МЕТОД РАСЧЕТА
РАССЕЯННОЙ СОЛНЕЧНОЙ РАДИАЦИИ,
ПОСТУПАЮЩЕЙ НА ВЕРТИКАЛЬНУЮ ПОВЕРХНОСТЬ
ПРИ ЧАСТИЧНО ПЕРЕКРЫТОМ НЕБОСВОДЕ**

**ANALYTICAL METHOD OF CALCULATION
OF THE DIFFUSE SOLAR RADIATION RECEIVED
ON A VERTICAL SURFACE WITH PARTIALLY**

Е.В. КОРКИНА, И.А. ШМАРОВ
E.V. KORKINA, I.A. SHMAROV

(Научно-исследовательский институт строительной физики
Российской академии архитектуры и строительных наук,
Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет)
(Research Institute of Building Physics of the Russian Academy
of Architecture and Construction Sciences,
Moscow State (National Research) University of Civil Engineering)
E-mail: elena.v.korkina@gmail.com; shmarovigor@yandex.ru

В настоящее время расчеты теплоступлений от солнечной радиации в нормативных документах приводятся без учета перекрытия части небосвода противостоящим зданием, что в дальнейшем влияет на расчеты расхода тепловой энергии на отопление здания. В настоящей работе предложен метод аналитического расчета теплоступлений от одной из составляющих суммарной солнечной радиации – рассеянной радиации – при частично перекрытом небосводе. Применение метода проиллюстрировано примером. Предложенный метод адаптирован к строительной практике.

Currently, the calculations of heat gain from solar radiation in the normative documents are presented excluding the overlapping part of the sky opposing the building, which further affects the calculation of heat consumption for heating of the building. In this paper, we propose a method of analytical calculation of heat gain from one of the components of the total solar irradiance – diffuse irradiance – with a partially obstructed sky. The application of the method is illustrated by example. The proposed method is adapted to the construction practice.

Ключевые слова: рассеянная радиация, теплоступления, застройка.

Keywords: diffuse solar, heat gain, building.

Поступление солнечной радиации в помещение способствует экономии энергии на отопление зданий [1...3]. Расчет теплоступлений от солнечной радиации по методике нормативных документов, изложенной в [4], проводится для одиночно стоящего здания. Между тем в условиях городской застройки противостоящие здания перекрывают часть небосвода, ограничивая тем самым поступление солнечной радиации, таким образом, возникает необходимость уточнять имеющиеся методики с учетом закрытости горизонта при разных типах и

этажности зданий. Имеющиеся работы по исследованию данной тематики недостаточно адаптированы для проектной строительной практики [5...7]. В настоящей статье рассматривается влияние противостоящего здания на расчетную величину рассеянной солнечной радиации, поступающей на светопроемы вертикального фасада исследуемого здания, с возможностью применения в строительных расчетах.

Согласно [4] рассеянная радиация от небосвода рассчитывается по формуле:

$$D_s = \int_0^{2\pi} d\psi \int_{h(\psi)}^{\pi/2} D(h, \psi) (\sin \alpha \sin \psi \cos h + \cos \alpha \sin h) \cosh dh, \quad (1)$$

где

$$h(\psi) = \begin{cases} 0 & \text{при } 0 \leq \psi \leq \pi, \\ \arccos \frac{\cos \alpha}{\sqrt{1 - \sin^2 \alpha \cos^2 \psi}} & \text{при } \pi \leq \psi \leq 2\pi, \end{cases} \quad (2)$$

α – угол наклона поверхности по отношению к горизонтальной плоскости, рад; $h(\psi)$ – наименьшая угловая высота точки неба в азимуте ψ , рад; $\psi = \psi_0 - \psi_s$ (ψ_0 и ψ_s – азимуты точки небосвода и проекции нормали к поверхности), рад; φ – широта, °с.ш.

При использовании изотропной модели радиации $D(h, \psi) = D = \text{const}$. Радиация, отраженная от фасада противостоящего здания, в данном расчете не учитывается.

Из [4] известно, что рассеянная радиация, поступающая на вертикальную поверхность, равняется половине рассеянной радиации, поступающей на горизонтальную поверхность при условии изотропности:

$$D^{\text{вер}} = \frac{D^{\text{гор}}}{2}. \quad (3)$$

Логично предположить, что в случае перекрытия части небосвода противостоящим зданием с коэффициентом перекрытия $\varepsilon_{\text{зд}}$ рассеянная радиация, поступающая на точку фасада с координатами (x, y) , рассчитывается из соотношения:

$$D_{\varepsilon}^{\text{вер}}(x, y) = \frac{D^{\text{гор}}}{2} [1 - \varepsilon_{\text{зд}}(x, y)]. \quad (4)$$

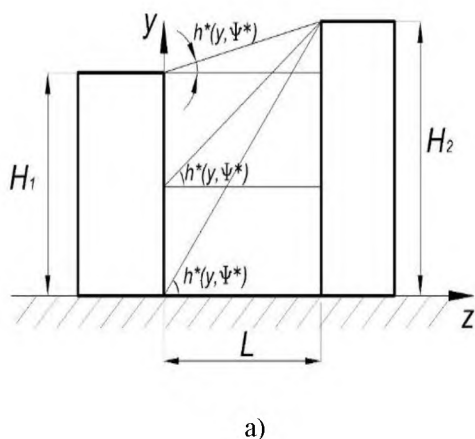
Далее рассмотрен метод определения коэффициента перекрытия небосвода для

точки фасада с координатами (x, y) противостоящим зданием, $\varepsilon_{зд}(x, y)$, отн. ед.

Исходя из (2) для вертикальной поверхности фасада $\alpha = \pi/2$, тогда значение $h(\psi)$ равно $h = 0$ при $0 \leq \psi \leq \pi$, или $h = \pi/2$ при $\pi \leq \psi \leq 2\pi$. Рассматривается случай $0 \leq \psi \leq \pi$, тогда выражение для рассеянной радиации, поступающей на вертикальную поверхность, записывается в виде:

$$D^{вер} = \int_0^{\pi} \sin \psi d\psi \int_0^{\pi/2} D \cos^2(h) dh. \quad (5)$$

На фасад здания с координатами (x, y) поступает рассеянная радиация, равная разности рассеянной радиации от небосвода $D^{вер}$, рассчитываемой по формуле (3), и рассеянной радиации, перекрываемой противостоящим зданием $D_{зд}^{вер}(x, y)$:



$$D_{\varepsilon}^{вер}(x, y) = D^{вер} - D_{зд}^{вер}(x, y). \quad (6)$$

В данной работе приняты следующие допущения.

1. При проведении расчетов для точки с координатой по высоте, равной y , изменение уровня горизонта пренебрежимо мало в сравнении с удаленностью горизонта, поэтому интегрирование по угловой высоте точки перекрытого участка небосвода проводится от нуля.

2. Перекрытие небосвода торцом противостоящего здания, которое возможно при определенном расположении зданий, не рассматривается, поэтому интегрирование по азимуту точки перекрытого участка небосвода проводится только по расположению напротив фасаду противостоящего здания.

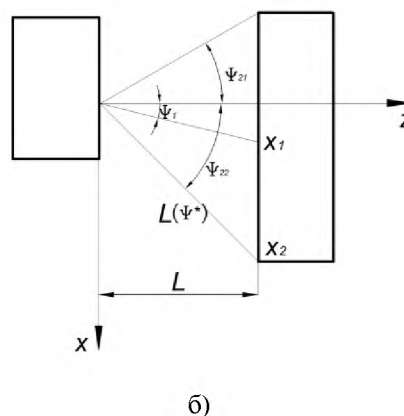


Рис. 1

В этом случае изменение угловой высоты точки перекрытого участка небосвода происходит в пределах от 0 до $h^*(y, \psi^*)$

(рис. 1-а), а изменение угла ψ^* происходит от ψ_1 до ψ_2 (рис. 1-б):

$$D_{зд}^{вер}(x, y) = \int_{\psi_1}^{\psi_2} \sin \psi^* d\psi^* \int_0^{h^*(y, \psi^*)} D \cos^2(h) dh. \quad (7)$$

На рис. 1 представлены схемы расположения зданий – разрез (а) и план (б).

Тогда формула (6) преобразуется к виду:

$$D_{\varepsilon}^{\text{вер}}(x, y) = D^{\text{вер}} - D_{3\text{Д}}^{\text{вер}}(x, y) = \int_0^{\pi} \sin \psi d\psi \int_0^{\pi/2} D \cos^2(h) dh - \int_{\psi_1}^{\psi_2} \sin \psi^* d\psi^* \int_0^{h^*(y, \psi^*)} D \cos^2(h) dh =$$

$$= D \left[\frac{1}{2} \pi - \int_{\psi_1}^{\psi_2} \sin \psi^* d\psi^* \int_0^{h^*(y, \psi^*)} \cos^2(h) dh \right]. \quad (8)$$

Из (8) следует, что двойной интеграл представляет собой долю перекрытия небосвода противостоящим зданием участка фасада (x, y):

$$\varepsilon_{3\text{Д}}^*(x, y) = \int_{\psi_1}^{\psi_2} \sin \psi^* d\psi^* \int_0^{h^*(y, \psi^*)} \cos^2(h) dh. \quad (9)$$

Тогда:

$$D_{\varepsilon}^{\text{вер}}(x, y) = D \left[\frac{1}{2} \pi - \varepsilon_{3\text{Д}}^*(x, y) \right]. \quad (10)$$

$$h^*(y, \psi^*) = \text{arctg} \left(\frac{H_2 - y}{L(\psi^*)} \right) = \text{arctg} \left(\frac{H_2 - y}{L} \cos \psi^* \right) = \text{arctg}(H_L \cos \psi^*). \quad (11)$$

Изменение расстояния от исследуемой области фасада до точек противостоящего здания выражается через азимутальный угол ψ^* , согласно рис. 1-б:

$$L(\psi^*) = \frac{L}{\cos \psi^*}. \quad (12)$$

Из схемы расположения зданий в плане (рис. 1-б) определяется изменение азимутальных углов, под которыми видно противостоящее здание из точки фасада (x, y):

$$\psi_1 = \text{arctg} \left(\frac{x_1 - x}{L} \right), \quad (13)$$

$$\psi_2 = \text{arctg} \left(\frac{x_2 - x}{L} \right).$$

После подстановки (11) в (9) и вычисления внутреннего интеграла выражение для вычисления $\varepsilon_{3\text{Д}}^*(x, y)$ имеет вид:

$$\varepsilon_{3\text{Д}}^*(x, y) = \int_{\psi_1}^{\psi_2} \sin \psi^* \left[\frac{\text{arctg}(H_L \cos \psi^*)}{2} + \frac{\sin [2 \text{arctg}(H_L \cos \psi^*)]}{4} \right] d\psi^*. \quad (14)$$

Для численного решения интеграла (14) принимаются следующие значения переменных:

- отношение H_L изменяется от 0,2 до 2;
- азимутальные углы имеют значения: $\psi_1=0$; ψ_2 изменяется в пределах от $\pi/16$ до $\pi/2$ с шагом $\pi/16$.

Результаты численного решения интеграла (14) (приведены в табл. 1) (значения $\varepsilon_{3\text{Д}}^*(x, y)$ умножены на $2/\pi$ в соответствии с формулой (18).

Значение рассеянной радиации на вертикальную поверхность из формулы (10)

удобно выразить через значение изотропной рассеянной радиации D , попадающей

на горизонтальную поверхность $D^{гор}$. Согласно [8]:

$$D^{гор} = D\pi. \quad (15)$$

Тогда выражение (10) запишется в виде:

$$D_{\varepsilon}^{вер}(x, y) = \frac{D^{гор}}{\pi} \left[\frac{1}{2} \pi - \varepsilon_{зд}^*(x, y) \right] = \frac{D^{гор}}{2} \left[1 - \frac{2}{\pi} \varepsilon_{зд}^*(x, y) \right], \quad (16)$$

или

$$D_{\varepsilon}^{вер}(x, y) = \frac{D^{гор}}{2} [1 - \varepsilon_{зд}(x, y)], \quad (17)$$

где

$$\varepsilon_{зд}(x, y) = \frac{2}{\pi} \varepsilon_{зд}^*(x, y). \quad (18)$$

Значения $\varepsilon_{зд}(x, y)$ протабулированы по формулам (14), (18) и представлены в табл. 1 (значения коэффициента перекрытия небосвода против остоящим зданием $\varepsilon_{зд}(x, y)$ для точки фасада).

Таблица 1

H_L	Значения $\varepsilon_{зд}(x, y)$ при значениях азимутального угла ψ_2							
	$\pi/16$	$\pi/8$	$3\pi/16$	$\pi/4$	$5\pi/16$	$3\pi/8$	$7\pi/16$	$\pi/2$
0,2	0,003	0,009	0,019	0,031	0,044	0,054	0,061	0,063
0,4	0,004	0,017	0,036	0,060	0,083	0,103	0,117	0,122
0,6	0,006	0,023	0,050	0,082	0,116	0,145	0,166	0,173
0,8	0,007	0,028	0,060	0,099	0,141	0,180	0,206	0,216
1,0	0,008	0,031	0,067	0,112	0,161	0,207	0,239	0,252
1,2	0,008	0,033	0,072	0,121	0,176	0,228	0,266	0,280
1,4	0,009	0,035	0,075	0,127	0,187	0,244	0,287	0,304
1,6	0,009	0,035	0,077	0,132	0,195	0,257	0,305	0,324
1,8	0,009	0,036	0,079	0,136	0,201	0,266	0,319	0,340
2,0	0,009	0,036	0,081	0,138	0,205	0,275	0,331	0,355

Таким образом, для вычисления величины рассеянной радиации, поступающей на участок фасада здания с координатами (x, y) с учетом влияния противостоящего здания, можно пользоваться формулой (17) и набором таблиц для вычисления коэффициента перекрытия небосвода $\varepsilon_{зд}(x, y)$.

При симметричном расположении противостоящего здания относительно исследуемого окна результат вычисления $\varepsilon_{зд}(x, y)$ умножается на два. В случае несимметричного расположения противостоящего здания следует считать две ве-

личины $\varepsilon_{зд}(x, y)$, складывать их и подставлять сумму в формулу (17).

При расчетах поступления рассеянной радиации $D_{\varepsilon}^{вер}(x, y)$ за отопительный период путем суммирования данных величину $(1 - \varepsilon_{зд}(x, y))$ можно вынести за скобку, а значит результат расчета всегда будет ниже такового, выполненного без учета влияния противостоящего здания, $D^{вер}(x, y)$, на величину $(1 - \varepsilon_{зд}(x, y)) \cdot 100\%$ для любого климата и периода расчета в предположении изотропности рассеянной радиации:

$$D_{\varepsilon}^{вер}(x, y) = \sum_{i=1}^m \frac{D^{гор}}{2} [1 - \varepsilon_{зд}(x, y)] = [1 - \varepsilon_{зд}(x, y)] \sum_{i=1}^m \frac{D^{гор}}{2}, \quad (19)$$

где m – число месяцев периода расчета (в настоящей работе отопительного периода).

Пример расчета. Расчет поступления рассеянной радиации на наружную поверхность площадью 1 м^2 исследуемого здания проводится за отопительный период. Исследуемое здание предположительно расположено в г.Москве и в г. Краснодаре. Расстояние до противостоящего здания $L = 25 \text{ м}$. Центр исследуемой вертикальной поверхности с координатами (x, y) находится

на высоте $y = 15 \text{ м}$. Противостоящее здание превышает исследуемую вертикальную поверхность на высоту $H=20 \text{ м}$. Одна часть противостоящего здания перекрывает небосвод на азимутальный угол $\psi_{21} = \pi / 6$, другая часть на $\psi_{22} = \pi / 4$, $\psi_1=0$.

Расчет проводится по формулам (17)...(19).

По табл. 1 определяется значение $\varepsilon_{\text{зд}}(x, y)$ при отношении $H_L=H/L=0,8$: $\varepsilon_{\text{зд}}(x, y)=0,028+0,099 = 0,127$.

Таблица 2

Месяц отопительного периода	г.Москва		г. Краснодар	
	$D^{\text{веп}}(x, y)$, МДж/м ²	$D_{\varepsilon}^{\text{веп}}(x, y)$, МДж/м ²	$D^{\text{веп}}(x, y)$, МДж/м ²	$D_{\varepsilon}^{\text{веп}}(x, y)$, МДж/м ²
Октябрь	51	44	-	-
Ноябрь	25	21	38	33
Декабрь	18	15	32	27
Январь	28	24	40	35
Февраль	47	41	59	51
Март	87	76	88	76
Апрель	115	100	-	-
Сумма	368	321	256	223
Отличие $\frac{D^{\text{веп}}(x, y) - D_{\varepsilon}^{\text{веп}}(x, y)}{D^{\text{веп}}(x, y)} \cdot 100\%$	13%		13%	

Как видно из данных табл. 2 (результаты расчета поступающей рассеянной радиации на вертикальную поверхность площадью 1 м^2 с координатами по центру (x, y)) для рассмотренного примера значение рассеянной радиации, поступающей на фасад здания на 1 м^2 , с учетом перекрытия части небосвода меньше такового без учета перекрытия на 13%, что представляется результатом, который следует учитывать при расчетах.

ВЫВОДЫ

1. Разработан метод расчета рассеянной радиации, поступающей на фасад здания, в условиях частично перекрытого небосвода противостоящим зданием. Метод основан на аналитических расчетах, адаптированных в данной работе для проектной практики. Применение метода проиллюстрировано примером.

2. Предложенный метод направлен на повышение точности расчетов теплоступлений в здание от проникающей рас-

сеянной солнечной радиации в условиях частично перекрытого небосвода противостоящим зданием.

ЛИТЕРАТУРА

1. Куприянов В.Н., Седова Ф.Р. Обоснование и развитие энергетического метода расчета инсоляции жилых помещений // Жилищное строительство. – 2015, № 5. С. 83...87.
2. Гагарин В.Г., Коркина Е.В., Шмаров И.А. Теплоступления и теплотери через стеклопакеты с повышенными теплозащитными свойствами // Academia. Архитектура и строительство. – 2017, №2. С.106...110.
3. Prada A., Pernigotto G., Baggio P. Effect of solar radiation model on the predicted energy performance of buildings // International High Performance Buildings Conference. – 2014. Paper 130. <http://docs.lib.purdue.edu/ihpbc/130>.
4. Коркина Е.В., Горбаренко Е.В., Гагарин В.Г., Шмаров И.А. Основные соотношения для расчета облучения солнечной радиацией стен отдельно стоящих зданий. // Жилищное строительство. – 2017, №6. С. 27...33.
5. Пигольцина Г.Б. Радиационные факторы мезо- и микроклимата. – С-Пб.: С.-Петерб. гос. лесотехн. акад, 2003.

6. Ivanova S.M. 3D analysis of the incident diffuse irradiance on the building's surfaces in an urban environment // *Int. J. Low-Carbon Tech.* – (01/2014), open access article.

7. Ivanova S.M. Estimation of background diffuse irradiance on orthogonal surfaces under partially obstructed anisotropic sky. Part 1 - Vertical surfaces // *Solar Energy.* – 2013. P. 376...391.

8. Научно-прикладной справочник по климату СССР. Серия 3. Многолетние данные. Части 1 – 6, вып. 1 – 34. – С-Пб.: Гидрометеиздат, 1989-1998.

REFERENCES

1. Kupriyanov V.N., Sedova F.R. Obosnovanie i razvitie energeticheskogo metoda rascheta insolyacii zhilyh pomeshenij // *Zhilishnoe stroitelstvo.* – 2015, №5. S. 83...87.

2. Gagarin V.G., Korkina E.V., Shmarov I.A. Teplopostupleniya i teplopoteri cherez steklopakety s povyshennymi teplozashitnymi svojstvami // *Academia. Arhitektura i stroitelstvo.* – 2017, №2. S. 106...110.

3. Prada A., Pernigotto G., Baggio P. Effect of solar radiation model on the predicted energy performance of buildings // *International High Performance Buildings*

Conference. – 2014. Paper 130. <http://docs.lib.purdue.edu/ihpbc/130>.

4. Korkina E.V., Gorbarenko E.V., Gagarin V.G., Shmarov I.A. Osnovnye sootnosheniya dlya rascheta oblucheniya solnechnoj radiaciej sten ot delno stoyashih zdaniy. // *Zhilishnoe stroitelstvo.* – 2017, №6. S. 27...33.

5. Pigolcina G.B. Radiacionnye faktory mezo- i mikroklimata. – S-Pb.: S.-Peterb. gos. lesotehn. akad, 2003.

6. Ivanova S.M. 3D analysis of the incident diffuse irradiance on the building's surfaces in an urban environment // *Int. J. Low-Carbon Tech.* – (01/2014), open access article.

7. Ivanova S.M. Estimation of background diffuse irradiance on orthogonal surfaces under partially obstructed anisotropic sky. Part 1 - Vertical surfaces // *Solar Energy.* – 2013. P. 376...391.

8. Научно-прикладной справочник по климату СССР. Серия 3. Многолетние данные. Части 1 – 6, вып. 1 – 34. – С-Пб.: Гидрометеиздат, 1989-1998.

Рекомендована Ученым советом НИИСФ РААСН. Поступила 18.06.18.