Графический метод расчета поступающей на фасад прямой солнечной радиации при наличии противостоящего здания

Е.В. Коркина^{1,2}

¹ Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук (НИИСФ РААСН), 127238, г. Москва, Локомотивный пр., д. 21;

² Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ), 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26

АННОТАЦИЯ

Введение. При проведении расчетов расхода тепловой энергии на отопление и вентиляцию здания согласно методике, представленной в нормативных документах, следует выполнять расчеты теплоступлений в здание от солнечной радиации. Эти расчеты ведутся без учета влияния застройки, что снижает точность результатов. В иностранных и отечественных литературных источниках не обнаружено подходящих для строительных расчетов и одновременно учитывающих все периоды облучения методов, что подтверждает актуальность настоящей работы. В статье представлен метод учета влияния одиночного противостоящего здания на поступление прямой солнечной радиации в исследуемое здание при учете всех периодов облучения исследуемого фасада. Задачами настоящей работы являются: математическое обоснование метода, возможность его практического применения, формирование алгоритма расчета.

Материалы и методы. Применяются расчеты угловой высоты и азимута Солнца по астрономическим формулам, тригонометрические расчеты, построение графиков тангенсов изменения солнечных координат от истинного солнечного времени.

Результаты. На основе рассмотрения формул солнечных координат и расположения противостоящего здания относительно исследуемого предложен метод графического определения периодов облучения прямой солнечной радиацией фасада любой ориентации при наличии противостоящего здания. При этом на графическом поле производится построение графиков изменения тангенсов угловой высоты Солнца и тангенсов разности азимутов Солнца и нормали к поверхности фасада от истинного солнечного времени. На графическое поле наносятся параметры застройки и, в соответствии с предложенными рекомендациями, определяются периоды облучения фасада по истинному солнечному времени. Затем производится суммирование прямой солнечной радиации за периоды облучения фасада. Представлен алгоритм проведения расчетов на примере здания при наличии противостоящего здания. Показано снижение поступающей прямой солнечной радиации.

Выводы. Разработанный графический метод является математически обоснованным, наглядным, имеет практическую направленность, что делает его соответствующим поставленным задачам и удобным в применении. Расчеты показали существенное снижение поступающей прямой солнечной радиации по сравнению с расчетом без учета влияния противостоящего здания, что доказывает необходимость применения метода. Его внедрение будет способствовать повышению точности расчетов поступающей на фасад прямой солнечной радиации и, следовательно, точности расчетов потребления энергии на отопление и вентиляцию здания.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: прямая солнечная радиация, теплоступления, удельная характеристика потребления энергии, застройка, периоды облучения фасада

Благодарности. Автор выражает благодарность рецензентам за внимательное ознакомление с работой, а также за высказывание ценных замечаний и рекомендаций.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Коркина Е.В. Графический метод расчета поступающей на фасад прямой солнечной радиации при наличии противостоящего здания // Вестник МГСУ. 2019. Т. 14. Вып. 2. С. 237–249. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.2.237-249

Graphic method of calculation of the direct solar radiation received on the facade with available opposing building

Elena V. Korkina^{1,2}

¹ Research Institute of building physics of the Russian Academy of architecture and building sciences (NIISF RAACS), 21 Locomotive travel, Moscow, 127238, Russian Federation;

² Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU), 26 Yaroslavlshoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. An approach to the development of a method for taking into account the influence of a single opposing building on direct solar radiation inflows to the building under study, taking into account all the irradiation periods of the facade under study, is presented. When calculating the consumption of thermal energy for heating and ventilation of a

building in accordance with the method presented in regulatory documents, it is necessary to perform calculations of heat gain to the building from solar radiation. These calculations are carried out without taking into account the influence of the opposing building, what reduces the accuracy of the results. In foreign and domestic literature sources not found suitable for construction calculations and taking into account all periods of exposure methods. The objectives of this study are: the mathematical substantiation of the method, the possibility of its practical application, the formation of the calculation algorithm.

Materials and methods. Calculations of the angular height and azimuth of the Sun by astronomical formulas, trigonometric calculations, construction of graphs of the tangents of changes in solar coordinates from the true solar time are applied.

Results. The graphical method is proposed for determining irradiation periods by direct solar radiation of a facade of any orientation. The method is based on consideration of the formulas of the solar coordinates and the location of the opposing building. In this case, the graphic field is used to plot the changes in the tangents of the angular height of the Sun and the tangents of the difference between the azimuths of the Sun and the normal to the surface of the facade from the true solar time. The parameters of the building are applied to the graphic field and, in accordance with the proposed recommendations, the periods of irradiation of the facade are determined. Then the summation of direct solar radiation for the periods of irradiation of the facade is made. The algorithm of calculations on the example of a building in the presence of an opposing building is presented. The decrease of incoming direct solar radiation is shown.

Conclusions. The developed graphic method is mathematically justified, has a practical orientation, which makes it relevant to the purpose and easy to use. The calculations for the presented method showed a significant decrease in the received direct solar radiation compared with the calculation without taking into account the influence of the opposing building, which shows the need to apply the method. The implementation of the method will contribute to an increase in the accuracy of calculations of direct solar radiation received on the facade and, therefore, the accuracy of calculations of energy consumption for heating and ventilation of the building.

KEYWORDS: direct solar radiation, heat gain, specific characteristic of energy consumption, building, facade irradiation periods

Acknowledgements: The author is grateful to the reviewers for attentive familiarization with the work, as well as for making valuable comments and recommendations.

FOR CITATION: Korkina E.V. Graphic method of calculation of the direct solar radiation received on the facade with available opposing building. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2019; 14:2:237-249. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.2.237-249 (rus.).

ВВЕДЕНИЕ

Потребление энергии на отопление и вентиляцию здания определяется расчетом по методике нормативного документа¹. Эта методика основана на расчете удельных характеристик потребления и поступления энергии в здание. Поступление солнечной радиации учитывается посредством соответствующей удельной характеристики [1]. Влияние солнечной радиации на потребление энергии зданием отмечается и в иностранных работах [2–4], в том числе с учетом характеристик заполнений светопроемов [5, 6], указано, что разрабатываются методы регулирования поступления солнечной радиации в теплый период года [7, 8].

В настоящее время в отечественных нормативных документах и в исследовательских работах расчет поступающей за каждый месяц отопительного периода солнечной радиации проводится для одиночно стоящего здания¹ [9]. Однако в условиях городской застройки следует учитывать перекрытие небосвода противостоящими зданиями и, как следствие, сокращение облученности фасада поступающей солнечной радиацией — прямой и рассеянной.

Расчет поступающей рассеянной радиации при наличии противостоящего здания осуществляется на основе специального рассмотрения перекрытия небосвода и описан в работах [10–13].

Известны сложно применимые к практике проектирования иностранные работы [14], а также отечественные работы по расчетам поступления прямой радиации для бесконечно длинной улицы [15–17]. Между тем противостоящее здание имеет ограниченную ширину, а, значит, происходит облучение исследуемого фасада в периоды времени, характеризуемые расположением Солнца не только над противостоящим зданием, но и сбоку от него. Тогда для полного учета влияния противостоящего здания необходимо рассматривать все периоды облучения исследуемого фасада.

Таким образом, актуальной является разработка метода, позволяющего определять влияние противостоящего здания на теплопоступления от прямой солнечной радиации, тем самым способствующего повышению точности дальнейших расчетов по методике нормативного документа¹ и экономии энергии на отопление [1, 18], что необходимо учитывать при проектировании энергосбережения в зданиях [2, 19]. Цель данной работы — разработка метода учета влияния одиночного противостоящего здания на поступления прямой солнечной радиации в исследуемое здание при учете всех периодов облуче-

¹ СП 345.1325800.2017. Здания жилые и общественные. Правила проектирования тепловой защиты. М. : Минстрой России, 2017. 51 с.

ния исследуемого фасада. Задачи — математическое обоснование метода, возможность его практического применения, формирование алгоритма расчета.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Рассматривается ограничение в поступлении прямой солнечной радиации вследствие влияния противостоящего здания. Прямой солнечной радиацией называется радиация, поступающая к фасаду здания непосредственно от диска Солнца и около-солнечной зоны радиусом 5 град. в виде пучка параллельных лучей [9]. Прямая радиация, поступающая на вертикальную поверхность фасада здания заданной ориентации, по методике нормативного документа¹ определяется из соотношения:

$$S^{\text{всп}} = K_{\text{ГВ}} \cdot S^{\text{гор}}, \quad (1)$$

где $K_{\text{ГВ}}$ — коэффициенты пересчета, содержащиеся в СП¹; $S^{\text{гор}}$ — прямая радиация, поступающая на горизонтальную поверхность, МДж/м², почасовые и средние за месяц значения которой приведены в справочном издании [20], составленном на основе многолетних актинометрических наблюдений.

Дальнейшие расчеты основаны на определении координат Солнца и параметров застройки, при которых происходит перекрытие Солнца для исследуемого участка фасада здания. Для вычисления солнечных координат, а именно угловой высоты $h_{\odot}$ и азимута Солнца $\psi_{\odot}$, используются следующие формулы [21]:

$$\sin h_{\odot} = \sin \varphi \cdot \sin \delta + \cos \varphi \cdot \cos \delta \cdot \cos \Omega; \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \cos \psi_{\odot} &= \frac{\sin h_{\odot} \cdot \sin \varphi - \sin \delta}{\cos h_{\odot} \cdot \cos \varphi}, \\ \sin \psi_{\odot} &= \frac{\cos \delta \cdot \sin \Omega}{\cos h_{\odot}}, \end{aligned} \quad (3)$$

где φ — широта места, град.; δ — склонение Солнца, град.; Ω — часовой угол Солнца в данный момент времени, отсчитываемый от момента истинного полдня, град.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Принцип расчета

Для определения влияния застройки на поступление прямой солнечной радиации рассматривается прохождение Солнца над двумя зданиями, расположенными параллельно. При этом фасад исследуемого здания может облучаться в течение нескольких периодов. Пусть начало и окончание периодов облучения представляется интервалами: $(t_{1н}; t_{1к})$, $(t_{2н}; t_{2к})$, $(t_{3н}; t_{3к})$ и т.д. Тогда на фасад исследуемого здания с координатами по центру (x, y) поступает прямая радиация, равная сумме прямой радиации за периоды облучения:

$$\begin{aligned} \hat{S}_{3Д}^{\text{всп}}(x, y) &= \sum_{t_{\odot}=t_{1н}}^{t_{\odot}=t_{1к}} S^{\text{всп}}(t_{\odot}) + \\ &+ \sum_{t_{\odot}=t_{2н}}^{t_{\odot}=t_{2к}} S^{\text{всп}}(t_{\odot}) + \sum_{t_{\odot}=t_{3н}}^{t_{\odot}=t_{3к}} S^{\text{всп}}(t_{\odot}), \end{aligned} \quad (4)$$

где значения $S^{\text{всп}}(t_{\odot})$ определяются по формуле (1) с использованием почасовых значений $S^{\text{гор}}$. Тогда для определения величины $\hat{S}_{3Д}^{\text{всп}}(x, y)$ необходимо определить промежутки истинного солнечного времени $\Delta t_{\odot}$, за которые происходит облучение исследуемого здания.

При разработке данного метода делается допущение о проведении расчетов по поступлению прямой солнечной радиации за каждый ровный час светового дня. Расчеты проводятся для центра исследуемого участка фасада с координатами (x, y) . Перекрытие Солнца от боковых фасадов противостоящего здания не учитывается. Расчеты проводятся для отопительного периода, когда Солнце не поднимается высоко над линией горизонта и, таким образом, не может заходить за верхнюю грань южного фасада здания. Влияние иной схемы расположения зданий [22] и архитектурных элементов [23, 24] возможно предусмотреть при дальнейших модификациях предлагаемого метода.

Тогда, пусть фасад исследуемого здания имеет азимут нормали к поверхности ψ_n . Противостоящее здание перекрывает исследуемый фасад на угол ψ_1 , отсчитываемый от нормали к исследуемому фасаду до первой по ходу движения Солнца перекрывающей боковой грани фасада противостоящего здания, и на угол ψ_2 , отсчитываемый от нормали к исследуемому фасаду до второй перекрывающей Солнце грани фасада противостоящего здания (см. рис. 1). При этом азимутальный угол перекрытия Солнца $\psi_{\odot}$ изменяется от $\psi_n - \psi_1$ до $\psi_n - \psi_2$ (см. рис. 1). Угол перекрытия по высоте определяется угловой высотой $\beta(\psi)$, определяемой по верхней грани фасада противостоящего здания (рис. 2).

Для определения времени облучения фасада рассматриваются условия облучения, при одновременном выполнении которых солнечное излучение направлено на исследуемую поверхность фасада, но может быть перекрыто вследствие наличия противостоящего здания при одновременном выполнении условий затенения.

Условия облучения:

Азимут Солнца и азимут проекции нормали к поверхности исследуемого фасада лежат в пределах развернутого угла.

Солнце находится над линией горизонта.

Условия затенения:

Азимут Солнца находится в диапазоне изменения азимутального угла перекрытия небосвода противостоящим зданием.

Угловая высота Солнца меньше угла закрытости горизонта противостоящим зданием.

Рис. 1. Схема расположения зданий в плане, движение Солнца в проекции на горизонтальную плоскость: 1 — исследуемое здание; 2 — противостоящее здание

Fig. 1. The scheme layout of the buildings in the plan, the movement of the Sun in a projection on a horizontal plane: 1 — the building under study; 2 — opposing building

Рис. 2. Схема расположения зданий в разрезе, движение Солнца в проекции на вертикальную плоскость: 1 — исследуемое здание; 2 — противостоящее здание

Fig. 2. The scheme layout of the buildings in the in section, the movement of the Sun in projection on a vertical plane: 1 — the building under study; 2 — opposing building

Данные условия и определяемые из них периоды облучения фасада необходимо рассмотреть подробнее.

Определение времени облучения фасадов различной ориентации в условиях открытого горизонта

Условие облучения по азимуту

Для каждого фасада условие облучения по азимуту Солнца выглядит следующим образом:

$$\psi_n - \frac{\pi}{2} \leq \psi_{\oplus} \leq \psi_n + \frac{\pi}{2}. \quad (5)$$

Солнечное излучение, падающее по касательной, не поглощается участком фасада. В связи с этим предлагается рассмотреть так называемый *эффективный угол облучения*, т.е. наименьший угол в горизонтальной плоскости между солнечным лучом и поверхностью фасада, при котором начинается прохождение солнечного излучения через остекление [25], переплеты, оконные откосы (так называемые теневые углы [26]). Подобный подход косвенно рассмотрен в работе [27]. Можно принять, что таким углом является угол в 15 град. (0,3 рад.). Определение величины эффективного угла облучения требует дополнительных исследований, после проведения которых не составит труда откорректировать предлагаемый метод. Тогда условие облучения по азимуту (5) представляется следующим образом:

$$\psi_n - \frac{\pi}{2} + 0,3 \leq \psi_{\oplus} \leq \psi_n + \frac{\pi}{2} - 0,3. \quad (6)$$

Из неравенства (6) определяются азимуты Солнца, при которых оно начинает и заканчивает облучать фасад. Часовые углы Солнца определяются из соотношения, полученного из (3):

$$\Omega_{n,k} = \arcsin \left(\frac{\sin \psi_{\oplus n,k} \cdot \cos h_{\oplus}}{\cos \delta} \right). \quad (7)$$

Затем по формуле расчета истинного солнечного времени через часовой угол Солнца [21] определяются моменты начала и окончания облучения поверхности фасада по условию азимутов:

$$t_{\oplus n,k} = 12 + \Omega_{n,k} / 15, \quad (8)$$

где 15 — размерный коэффициент, °/ч.

Условие облучения по угловой высоте

В момент восхода и захода Солнца его угловая высота равна нулю [21]:

$$h_{\oplus} = 0, \quad (9)$$

тогда по формуле, аналогичной (7), вычисляется часовой угол Солнца $\Omega_{n,k}$ и затем по формуле определяется истинное солнечное время начала $t_{\oplus n}$ и окончания облучения фасада $t_{\oplus k}$ по условию угловой высоты Солнца [21]:

$$t_{\oplus n,k} = 12 + \Omega_{n,k} / 15. \quad (10)$$

Выбор времени начала и окончания облучения фасада

Солнце облучает поверхность фасада, если выполнены оба условия облучения, поэтому время начала облучения фасада следует выбирать наибольшее, а время окончания облучения фасада — наименьшее. Из формул (8) и (10) определяются моменты истинного солнечного времени начала и окончания облучения фасада при открытом горизонте:

$$t_n = \max \{ t_{\oplus n}; t_{\oplus h_n} \},$$

$$t_k = \min \{ t_{\oplus k}; t_{\oplus h_k} \}. \quad (11)$$

Определение времени затенения фасадов различной ориентации при наличии противостоящего здания

Условие затенения по азимуту

Пусть исследуемая область фасада имеет координату x по горизонтали. Противостоящее здание находится на расстоянии L от исследуемого и перекрывает исследуемую область фасада на величину x_1 и x_2 слева и справа, соответственно (см. рис. 1).

Угол перекрытия небосвода в горизонтальной плоскости в данной работе называется *азимутальным углом перекрытия небосвода*. Тогда Солнце перекрывается противостоящим зданием при условии, что его азимут находится в диапазоне изменения азимутального угла перекрытия небосвода:

$$\psi_n(x) - \psi_1(x) \leq \psi_{\oplus} \leq \psi_n(x) + \psi_2(x), \quad (12)$$

где: $\psi_1(x)$, $\psi_2(x)$ — азимуты перекрытия Солнца для точки фасада с координатой x , определяются из размеров противостоящего здания и расстояния до него (см. рис. 1) по соотношениям:

$$\psi_1 = \arctg \left(\frac{x - x_1}{L} \right); \quad \psi_2 = \arctg \left(\frac{x_2 - x}{L} \right). \quad (13)$$

Переходя к параметрам застройки в плане расположения зданий:

$$L_{1L} = \frac{x - x_1}{L} \text{ и } L_{2L} = \frac{x_2 - x}{L}. \quad (14)$$

Условие (12) перекрытия Солнца для области фасада с координатой x по горизонтали записывается через тангенс разности азимутов:

$$L_{1L} \leq \operatorname{tg}(\psi_{\oplus} - \psi_n) \leq L_{2L}. \quad (15)$$

Аналогично (7)–(8) из (15) определяется истинное солнечное время начала и окончания затенения:

$$\tau_{\psi_n} = 12 + \Omega_{1n} / 15,$$

$$\tau_{\psi_k} = 12 + \Omega_{2k} / 15. \quad (16)$$

Условие затенения по угловой высоте

Солнце перекрыто при угловой высоте, меньшей угла, под которым видно противостоящее здание из исследуемой точки (рис. 2). При этом

моменты начала или окончания периода затенения определяются из уравнения:

$$h_{\oplus}(\psi_{\oplus}) \leq \beta(y, \psi) \quad (17)$$

Если фасад ориентирован на СВ, В, ЮВ, то при предельном выполнении условия (17) определяется момент окончания затенения в утренние часы, при этом момент начала затенения может приходиться на начало светового дня. Если фасад ориентирован на юг, то при предельном выполнении условия (17) определяются моменты окончания первого периода затенения и затем возможного начала второго периода затенения. Если фасад ориентирован на ЮЗ, З, СЗ, то при предельном выполнении условия (17) определяется момент начала затенения, в то время как момент окончания затенения может приходиться на окончание светового дня. В работе рассматривается отопительный период, в который облучение северного фасада происходит только в апреле, когда условия его затенения близки к таковым для СВ и СЗ фасадов.

Пусть противостоящее здание превышает исследуемую область фасада на величину $H = H_2 - y$. Отношение превышения высоты противостоящего здания над координатой y по высоте исследуемого здания к расстоянию между зданиями является параметром застройки в разрезе расположения зданий и обозначается H_L :

$$H/L = H_L. \quad (18)$$

Тогда условие (17) может быть записано в виде:

$$\text{tg}(h_{\oplus}(\psi_{\oplus})) \leq H_L. \quad (19)$$

Часовой угол Солнца определяется из соотношения:

$$\Omega_{\text{нвк}} = \arccos \left[\frac{\sin \{ \arctg[H_L] \} - \sin \varphi \sin \delta}{\cos \varphi \cos \delta} \right]. \quad (20)$$

Истинное солнечное время окончания затенения (для СВ, В, ЮВ, Ю фасадов) или начала затенения (для Ю, ЮЗ, З, СЗ фасадов) по условию затенения по угловой высоте Солнца:

$$\tau_{\text{нвк}} = 12 + \Omega_{\text{нвк}}/15. \quad (21)$$

Выбор времени начала и окончания затенения фасада

Солнце затеняется противостоящим зданием только при одновременном выполнении условий затенения, поэтому время начала затенения фасада следует выбирать наибольшее, а время окончания затенения фасада — наименьшее. Данное обстоятельство объясняется тем, что участок фасада может затеняться по условию азимутов, но при этом облучаться по условию угловой высоты, или наоборот, тогда участок фасада все-таки облучается, поэтому для определения времени затенения необходимо выбирать наименьший временной интервал, в котором выполняются оба условия затенения.

Из формул (16) и (21) определяется время начала и окончания затенения фасада:

$$\begin{aligned} \tau_{\text{н}} &= \max \{ \tau_{\text{нн}}; \tau_{\text{нн}} \}, \\ \tau_{\text{к}} &= \min \{ \tau_{\text{нк}}; \tau_{\text{нк}} \}. \end{aligned} \quad (22)$$

Определение периодов облучения фасадов различной ориентации при наличии противостоящего здания

Переходя к обозначениям уравнения для вычисления радиации (4), полученные из условий облучения моменты времени (11) обозначают начало первого периода облучения и конец последнего (второго или даже третьего для южного фасада) периода облучения:

$$\begin{aligned} t_{1\text{н}} &= t_{\text{н}}, \\ t_{2\text{к}\vee 3\text{к}} &= t_{\text{к}}. \end{aligned} \quad (23)$$

В свою очередь, полученные из условий затенения моменты времени (22) обозначают конец первого периода облучения и начало последнего (второго или третьего для южного фасада) периода облучения:

$$\begin{aligned} t_{1\text{к}} &= \tau_{\text{н}}, \\ t_{2\text{н}\vee 3\text{н}} &= \tau_{\text{к}}. \end{aligned} \quad (24)$$

Таким образом, расчетом по представленным формулам определяются периоды облучения фасада для дальнейшего определения поступления солнечной радиации по формуле (4). Однако представленный метод необходимо адаптировать для применения в проектной практике.

Разработка графиков для определения периодов облучения участка фасада при наличии противостоящего здания

Видимое расположение Солнца на небосводе, а, следовательно, и поступление прямой радиации на фасады здания за отопительный период зависит от многих параметров, таких как географическая широта местности, в которой расположено здание, месяц года и день месяца, время суток, что видно из формул (2) и (3) и учитывается в аналогичных расчетах продолжительности инсоляции [26, 28].

Поэтому с целью проведения расчета угловой высоты и азимута Солнца принимаются исходные данные об указанных характеристиках:

- широта местности 56° с.ш. (г. Москва);
- расчетный период — отопительный период для г. Москвы (с октября по апрель);
- расчетный день — 15-е число каждого месяца;
- расчетный час — каждый ровный час светового дня.

Склонение Солнца принимается по таблице И.9 руководящего документа по актинометрическим наблюдениям².

² РД 52.04.562-96. Наставление гидрометеорологическим станциям и постам. Актинометрические наблюдения на станциях. М.: Росгидромет, 1997. Вып. 5. Ч. I. 221 с.

В соответствии с представленными выше выкладками построены графики (рис. 3), отображающие условия облучения южного фасада при открытом горизонте для каждого месяца отопительного периода. На оси ординат графиков (рис. 3) отложено изменение тангенсов солнечных координат, т.е. $\operatorname{tg}(h_{\odot})$ и $\operatorname{tg}(\psi_{\odot} - \psi_n)$. Значения оси абсцисс отображают интервал истинного солнечного времени $t_{\odot}$, отвечающий условиям одновременного облучения по угловой высоте (9) и по азимуту Солнца (6) и выбранный исходя из соотношений (11).

Далее на графики следует наносить параметры застройки и проверять выполнение условий затенения по азимуту (15) и угловой высоте (19), определять время затенения по равенствам (22) и периоды облучения по (23)–(24). Графики построены при

изменении истинного солнечного времени с шагом в полчаса, тем не менее в связи с тем, что значения S^{top} в труде [20] представлены с шагом в один час, то период облучения следует определять также по часам. Представленный графический метод следует проиллюстрировать примером с алгоритмом выполнения расчетов.

Пример расчета по разработанному графическому методу

Описание застройки

В качестве методического примера рассматривается односекционное здание серии 111М, расположенное в г. Москве. Напротив южного фасада находится двухсекционное здание серии 111М, расположение которого относительно исследуемого показано на схеме застройки в плане на рис. 4. Вы-

Рис. 3. Тангенсы угловой высоты Солнца и разности азимутов Солнца и нормали к поверхности фасада, ориентированного на юг, от истинного солнечного времени облучения, построенные для отопительного периода (г. Москва)

Fig. 3. Tangents of the angular height of the Sun and the difference of azimuths of the Sun and normal to the surface of the facade, oriented to the south, from the true solar irradiation time, built for the heating period (Moscow)

сота каждого здания 48 м. Необходимо определить период затенения и период облучения геометрической середины южного фасада исследуемого здания, пользуясь графиками (рис. 3), и провести расчет поступающей прямой солнечной радиации по формуле (4). Расчет проводится для отопительного периода по следующему алгоритму.

Алгоритм проведения расчетов на примере южного фасада исследуемого здания при наличии противостоящего здания

Определение периода облучения участка фасада

Расчет параметров застройки

Параметры застройки рассчитываются по формулам (14) и (18):

$$H_L = (48 : 2) / 30 = 0,8;$$

$$L_{1L} = 30 / 30 = 1;$$

$$L_{2L} = 10 / 30 = 0,33.$$

Нанесение параметров застройки на графики и определение времени затенения

Для определения времени затенения участка фасада необходимо графически проверить выполнение условий (15) и (19). Для этого на каждом из графиков рис. 5 проводятся горизонтальные линии, соответствующие параметрам застройки: H_L и L_{1L} , L_{2L} . Области графиков, на которых значения $\operatorname{tg}(h_{\odot})$ и $\operatorname{tg}(\psi_{\odot} - \psi_n)$ меньше соответствующего параметра застройки H_L и L_{1L} , или L_{2L} , являются областью затенения фасада, что отмечено затеняющими прямоугольниками на рис. 5.

Участок фасада затеняется в течение временного периода, на котором одновременно выполняются условия затенения (15) и (19), что графически означает совпадение верхнего и нижнего затеняющего прямоугольников и отмечено черной полосой на оси времени (рис. 5). Таким образом, период затенения для апреля длится с 9 ч 36 мин до 10 ч 5 мин. Аналогично он определяется для остальных месяцев. При этом для всех остальных месяцев происходит пол-

ное затенение по условию угловой высоты Солнца, поэтому следует определять период затенения только по условию азимутов.

Определение периодов облучения

Период облучения участка фасада с учетом противостоящего здания определяется из соотношений (23) и (24) при известном их периоде затенения. Тогда для апреля определено два периода облучения — с 8 ч до 9 ч 36 мин и с 10 ч 05 мин до 16 ч. Периоды облучения участка фасада для остальных месяцев отопительного периода определяются аналогично. Периоды облучения для всех месяцев отопительного периода представлены в табл. 1.

Как видно из данных табл. 1, для всех месяцев, кроме декабря, имеется два периода облучения исследуемого участка южного фасада. Начало первого и конец второго периодов зависят от точности построения графика.

Расчет поступающей прямой солнечной радиации

В табл. 2 в столбцах II–X представлены значения солнечной радиации, поступающей на горизонтальную поверхность за период облучения южного фасада (по исходным данным из табл. 1.8 [20]). В соответствии с определенным графически временем облучения фасада заполняется столбец XI табл. 2 по формуле (4), а также для сравнения с расчетом по методике нормативного документа¹ без учета застройки, столбец XII по формуле (1).

Суммарное за отопительный период значение поступающей прямой радиации на середину участка исследуемого фасада при учете наличия противостоящего здания составляет 317 МДж/м², без учета наличия противостоящего здания — 696 МДж/м², т.е. расчетное значение прямой солнечной радиации снизилось на 54 %. Существенное различие в расчетах наблюдается для всех месяцев, кроме апреля, для которого период затенения наименьший и, следовательно, результаты вычислений без учета

Рис. 4. Схема расположения зданий в плане: 1 — исследуемое здание; 2 — противостоящее здание

Fig. 4. The scheme layout of the buildings in the plan: 1 — the building under study; 2 — opposing building

Рис. 5. Тангенсы угловой высоты Солнца и разности азимутов Солнца и нормали к поверхности фасада, ориентированного на юг, построенные для апреля с нанесенными параметрами застройки (г. Москва)

Fig. 5. Tangents of the angular height of the Sun and the difference of azimuths of the Sun and normal to the surface of the facade, oriented to the south, built for April with plotted building parameters (Moscow)

Табл. 1. Периоды облучения участка южного фасада с учетом влияния противостоящего здания

Table 1. Periods of irradiation of a section of the south facade, taking into account the influence of the opposing building

Месяц / Month	Первый период облучения / The first period of radiation	Второй период облучения / Second period of radiation
Октябрь / October	8 ч — 9 ч 5 мин / 8 h — 9 h 5 min	13 ч 5 мин — 17 ч / 13 h 5 min — 17 h
Ноябрь / November	8 ч — 8 ч 50 мин / 8 h — 8 h 50 min	13 ч 20 мин — 16 ч / 13 h 20 min — 16 h
Декабрь / December	—	13 ч 20 мин — 15 ч / 13 h 20 min — 15 h
Январь / January	8 ч 25 мин — 8 ч 48 мин / 8 h 25 min — 8 h 48 min	13 ч 12 мин — 15 ч 30 мин / 13 h 12 min — 15 h 30 min
Февраль / February	7 ч 30 мин — 9 ч / 7 h 30 min — 9 h	13 ч 18 мин — 16 ч 30 мин / 13 h 18 min — 16 h 30 min
Март / March	7 ч 30 мин — 9 ч 24 мин / 7 h 30 min — 9 h 24 min	13 ч 5 мин — 16 ч 30 мин / 13 h 5 min — 16 h 30 min
Апрель / April	8 ч — 9 ч 36 мин / 8 h — 9 h 36 min	10 ч 5 мин — 16 ч / 10 h 5 min — 16 h

Табл. 2. Поступление прямой солнечной радиации на участок южного фасада здания № 1 за отопительный период с учетом противостоящего здания, $\hat{S}_{Ю-ЗД\#1}^{вер}(x, y)$, и без его учета по¹, $S_{Ю-ЗД\#1}^{вер}$

Table 2. Arrival of direct solar radiation to the site of the southern facade of the building number 1 for the heating period, taking into account the opposing building, $\hat{S}_{S-BU\ No. 1}^{ver}(x, y)$, and without taking it into account¹, $S_{S-BU\ No. 1}^{ver}$

Месяц / Month	Прямая солнечная радиация на горизонтальную поверхность, МДж/м ² , по часам по табл. 1.8 [20] / Direct solar radiation on a horizontal surface, MJ/m ² , according to the hours on the table 1.8 [20]									$\hat{S}_{Ю-ЗД\#1}^{вер}$ МДж/м ² / $\hat{S}_{S-BU\ No. 1}^{ver}$ MJ/m ²	$S_{Ю-ЗД\#1}^{вер}$ МДж/м ² / $S_{S-BU\ No. 1}^{ver}$ MJ/m ²
	8–9	9–10	10–11	11–12	12–13	13–14	14–15	15–16	16–17	XI	XII
I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X		
Октябрь / October	0,07					0,21	0,16	0,08	0,02	37	97
Ноябрь / November						0,08	0,04	0,01		16	59
Декабрь / December						0,03	0,01			8	31
Январь / January						0,08	0,01			14	62
Февраль / February	0,04					0,25	0,16	0,07		41	120
Март / March	0,22					0,49	0,39	0,24		64	169
Апрель / April	0,46	0,62	0,71	0,77	0,76	0,72	0,6	0,43		137	158
Сумма, МДж/м ² / Amount, MJ/m ²										317	696

и с учетом влияния противостоящего здания близки между собой.

При сравнении с известными отечественными методами [16, 17] разработанный метод учитывает все периоды облучения исследуемого фасада при наличии противостоящего здания конечных размеров, что представляет собой научную новизну. Возможность графического определения периодов облучения представляет собой практическую значимость работы относительно методов [14, 16, 17].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Разработан метод определения периодов облучения фасада при наличии противостоящего здания. Для его использования необходимы графики изменения тангенсов солнечных координат, построенные для местности с определенной географической широтой, а также элементарные характеристики застройки, такие как взаиморасположение зданий и размеры противостоящего здания. Нанесение па-

раметров застройки проводится однократно на одном графическом поле для всех представленных на нем месяцев, затем для каждого из месяцев отдельно проводится определение периодов облучения исследуемого участка фасада и суммирование прямой солнечной радиации за периоды облучения.

Расчет по разработанному методу для фасада южной ориентации при наличии противостоящего здания показал снижение на 54 % поступающей прямой солнечной радиации за отопительный период относительно расчета без учета влияния противостоящего здания, что представляется значимым результатом.

Таким образом, разработанный метод является математически обоснованным, наглядным и адаптированным к практике строительного проектирования, что делает его соответствующим поставленной цели и задачам. Внедрение предложенного метода в расчеты поступающей солнечной радиации повысит их точность и, в дальнейшем, точность расчетов потребления энергии на отопление и вентиляцию здания.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гагарин В.Г., Козлов В.В. Требования к теплотзащите и энергетической эффективности в проекте актуализированного СНиП «Тепловая защита зданий» // Жилищное строительство. 2011. № 8. С. 2–6.
2. Goswami D. Yogi. Principles of solar engineering // CRC Press Taylor & Francis Group. 3rd edition. 2015.
3. Hay J.E., Davies J.A. Calculation of the solar radiation incident on an inclined surface // Proceedings

- of First Canadian Solar Radiation Data Workshop. 1980. Pp. 59–72.
4. Heinemann Detlev. Energy meteorology. Lecture notes postgraduate programme «Renewable energy». Oldenburg, 2000. 102 p.
5. Esquivias P.M., Moreno D., Navarro J. Solar radiation entering through openings: Coupled assessment of luminous and thermal aspects // Energy and Buildings. 2018. Vol. 175. Pp. 208–218. DOI: 10.1016/j.enbuild.2018.07.021

6. Muscio A., Akbari H. An index for the overall performance of opaque building elements subjected to solar radiation // *Energy and Buildings*. 2017. Vol. 157. Pp. 184–194. DOI: 10.1016/j.enbuild.2017.01.010
7. Vlachokostas A., Madamopoulos N. Quantification of energy savings from dynamic solar radiation regulation strategies in office buildings // *Energy and Buildings*. 2016. Vol. 122. Pp. 140–149. DOI: 10.1016/j.enbuild.2016.04.022
8. Arens E., Heinzerling D., Paliaga G. Sunlight and indoor thermal comfort: updates to standard 55 // *ASHRAE Journal*. 2018. Vol. 60. No. 7. Pp. 12–21.
9. 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.
10. Ivanova S.M. Estimation of background diffuse irradiance on orthogonal surfaces under partially obstructed anisotropic sky. Part I – Vertical surfaces // *Solar Energy*. 2013. Vol. 95. Pp. 376–391. DOI: 10.1016/j.solener.2013.01.021
11. Ivanova S.M. Estimation of background diffuse irradiance on orthogonal surfaces under partially obstructed anisotropic sky. Part II — Horizontal surfaces // *Solar Energy*. 2014. Vol. 100. Pp. 234–250. DOI: 10.1016/j.solener.2013.12.010
12. Коркина Е.В., Земцов В.А., Шмаров И.А., Савин В.К. Графический метод расчета поступающей на фасад рассеянной солнечной радиации при частично перекрытом небосводе // *Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности*. 2018. № 3 (375). С. 216–220.
13. Коркина Е.В., Шмаров И.А. Аналитический метод расчета рассеянной солнечной радиации, поступающей на вертикальную поверхность при частично перекрытом небосводе // *Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности*. 2018. № 3 (375). С. 230–236.
14. Lee K., Levermore G. Estimation of surface solar irradiation using sky view factor, sunshine factor and solar irradiation models according to geometry and buildings // *4 International Conference on Building Energy and Environment*. Melbourne, Australia. 2018. Pp. 329–332.
15. Каган Р.Л., Клягина Л.П. О расчете потоков коротковолновой радиации в условиях городской застройки // *Труды главной геофизической обсерватории*. 1976. Вып. 365. С. 61–75.
16. Клягина Л.П. Прямая солнечная радиация, поступающая на вертикальные стены при условии моделирования городской застройки // *Труды главной геофизической обсерватории*. 1973. Вып. 305. С. 30–40.
17. Пигольцина Г.Б. Радиационные факторы мезо- и микроклимата. Санкт-Петербург : Санкт-Петербургская государственная лесотехническая академия, 2003. 199 с.
18. Ehling K. Tageslichtsysteme: Lichttechnische Bewertung und Wirtschaftlichkeit. 1st ed. VDI-Verlag. Berlin, 2000. 117 p.
19. Shristi Kh., Singh S.K. Energy efficient buildings // *International Journal of Civil Engineering Research*. 2014. Vol. 5. No. 4. Pp. 361–366.
20. Научно-прикладной справочник по климату СССР. Сер. 3: Многолетние данные. Санкт-Петербург : Гидрометеиздат, 1989–1998. Ч. 1–6. Вып. 1–34.
21. Кондратьев К.Я., Пивоварова З.И., Федорова М.П. Радиационный режим наклонных поверхностей. Л. : Гидрометеиздат, 1978. 216 с.
22. Prada A., Pernigotto G., Baggio P., Gasparella A., Mahdavi A. Effect of solar radiation model on the predicted energy performance of buildings // *International High Performance Buildings Conference*. 2014. P. 130. URL: <http://docs.lib.purdue.edu/ihpbc/130>
23. Kerekes A. Effect of wall thickness on the solar gain // *Journal of Sustainable Energy*. 2016. Vol. 7. No. 1. Pp. 15–21.
24. Стецкий С.В., Кузнецова П.И. Светотехнические, солнцезащитные и информативные качества окон нетрадиционной формы в гражданских зданиях стран с жарким солнечным климатом // *Научное обозрение*. 2017. № 10. С. 20–25.
25. Куприянов В.Н., Халикова Ф.Р. Пропускание ультрафиолетовой радиации оконными стеклами при различных углах падения луча // *Жилищное строительство*. 2012. № 6. С. 64–65.
26. Шмаров И.А., Земцов В.А., Коркина Е.В. Инсоляция: практика нормирования и расчета // *Жилищное строительство*. 2016. № 7. С. 48–53.
27. ASTM E1980-11. Standard practice for calculating solar reflectance index of horizontal and low-sloped opaque surfaces. 2011. 3 p.
28. Куприянов В.Н., Седова Ф.Р. Обоснование и развитие энергетического метода расчета инсоляции жилых помещений // *Жилищное строительство*. 2015. № 5. С. 83–87.

Поступила в редакцию 14 ноября 2018 г.

Принята в доработанном виде 4 декабря 2018 г.

Одобрена для публикации 29 января 2019 г.

ОБ АВТОРЕ: Коркина Елена Владимировна — старший научный сотрудник, Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук (НИИСФ)

РААСН), 127238, г. Москва, Локомотивный пр., д. 21; кандидат технических наук, доцент, **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26, elena.v.korkina@gmail.com.

REFERENCES

1. Gagarin V.G., Kozlov V.V. Requirements for thermal protection and energy efficiency in the project of the updated Building codes "Thermal protection of buildings". *Housing construction*. 2011; 8:2-6. (rus.).
2. Goswami D. Yogi. Principles of solar engineering. *CRC Press Taylor & Francis Group*. 3rd edition. 2015.
3. Hay J.E., Davies J.A. Calculation of the solar radiation incident on an inclined surface. *Proceedings of First Canadian Solar Radiation Data Workshop*. 1980; 59-72.
4. Heinemann Detlev. Energy meteorology. *Lecture notes postgraduate programme "Renewable energy"*. Oldenburg, 2000; 102.
5. Esquivias P.M., Moreno D., Navarro J. Solar radiation entering through openings: Coupled assessment of luminous and thermal aspects. *Energy and Buildings*. 2018; 175:208-218. DOI: 10.1016/j.enbuild.2018.07.021
6. Muscio A., Akbari H. An index for the overall performance of opaque building elements subjected to solar radiation. *Energy and Buildings*. 2017; 157:184-194. DOI: 10.1016/j.enbuild.2017.01.010
7. Vlachokostas A., Madamopoulos N. Quantification of energy savings from dynamic solar radiation regulation strategies in office buildings. *Energy and Buildings*. 2016; 122:140-149. DOI: 10.1016/j.enbuild.2016.04.022
8. Arens E., Heinzerling D., Paliaga G. Sunlight and indoor thermal comfort: updates to standard 55. *ASHRAE Journal*. 2018; 60(7):12-21.
9. Korkina E.V., Gorbarenko E.V., Gagarin V.G., Shmarov I.A. Basic ratios for calculation of irradiation of solar radiation of walls of detached buildings. *Housing construction*. 2017; 6:27-33. (rus.).
10. Ivanova S.M. Estimation of background diffuse irradiance on orthogonal surfaces under partially obstructed anisotropic sky. Part I — Vertical surfaces. *Solar Energy*. 2013; 95:376-391. DOI: 10.1016/j.solener.2013.01.021
11. Ivanova S.M. Estimation of background diffuse irradiance on orthogonal surfaces under partially obstructed anisotropic sky. Part II — Horizontal surfaces. *Solar Energy*. 2014; 100:234-250. DOI: 10.1016/j.solener.2013.12.010
12. Korkina E.V., Zemtcov V.A., Shmarov I.A., Savin V.K. Graphic method of calculation of the diffuse solar radiation received on the facade at partially obstructed sky. *News of higher educational institutions. Technology of the textile industry*. 2018; 3(375):216-220. (rus.).
13. Korkina E.V., Shmarov I.A. Analytical method of calculation of the diffuse solar radiation received on a vertical surface with partially obstructed sky. *News of higher educational institutions. Technology of the textile industry*. 2018; 3(375):230-236. (rus.).
14. Lee K., Levermore G. Estimation of surface solar irradiation using sky view factor, sunshine factor and solar irradiation models according to geometry and buildings. *4 International Conference on Building Energy and Environment*. Melbourne, Australia, 2018; 329-332.
15. Kagan R.L., Cliagina L.P. On the calculation of shortwave radiation fluxes in urban areas. *Works of the main geophysical observatories*. 1976; 365:61-75. (rus.).
16. Cliagina L.P. Direct solar radiation arriving at vertical walls subject to urban building simulations. *Works of the main geophysical observatories*. 1973; 305:30-40. (rus.).
17. Pigol'tcina G.B. *Radiation factors of meso- and microclimate*. Saint Petersburg, St. Petersburg State Forestry Academy Publ., 2003; 199. (rus.).
18. Ehling K. *Tageslichtsysteme: Lichttechnische Bewertung und Wirtschaftlichkeit*. 1st ed. VDI-Verlag. Berlin, 2000; 117.
19. Shristi Kh., Singh S.K. Energy efficient buildings. *International Journal of Civil Engineering Research*. 2014; 5(4):361-366.
20. *The scientific and application-oriented reference manual on climate of the USSR. Ser. 3: Long-term data*. Parts 1-6. Saint-Petersburg, Hydrometeoizdat Publ., 1989-1998; 1-34. (rus.).
21. Kondrat'ev K.Ia. Pivovarov Z.I., Fedorova M.P. *Radiation regime of inclined surfaces*. Leningrad, Hydrometeoizdat Publ., 1978; 216. (rus.).
22. Prada A., Pernigotto G., Baggio P., Gasparella A., Mahdavi A. Effect of solar radiation model on the predicted energy performance of buildings. *International High Performance Buildings Conference*. 2014; 130. URL: <http://docs.lib.purdue.edu/ihpbc/130>
23. Kerekes A. Effect of wall thickness on the solar gain. *Journal of Sustainable Energy*. 2016; 7(1):15-21.
24. Stetckii' S.V., Kuznetsova P.I. Lighting, sun-protection and informative qualities of windows of a nonconventional form in civil buildings of the countries with hot solar climate. *Scientific Review*. 2017; 10:20-25. (rus.).

25. Kupriyanov V.N., Halikova F.R. Transmission of ultraviolet radiation by glass panes at different angles of incidence of the beam. *Housing construction*. 2012; 6:64-65. (rus.).

26. Shmarov I.A., Zemtcov V.A., Korkina E.V. Insolation: the practice of rationing and calculation. *Housing construction*. 2016; 7:48-53. (rus.).

27. ASTM E1980-11. *Standard practice for calculating solar reflectance index of horizontal and low-sloped opaque surfaces*. 2011; 3.

28. Kupriyanov V.N., Sedova F.R. Justification and development of energy method for calculation of insolation of domestic premises. *Housing construction*. 2015; 5:83-87. (rus.).

Received November 14, 2018

Adopted in a modified form on December 4, 2018

Approved for publication January 29, 2019

ABOUT THE AUTHOR: **Elena V. Korkina** — Senior Researcher, **Research Institute of building physics of the Russian Academy of architecture and building sciences (NIISF RAACS)**, 21 Locomotive travel, Moscow, 127238, Russian Federation; Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**, 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation, elena.v.korkina@gmail.com.