

## Математический и стереографический анализ интенсивности солнечной радиации и затенения светопроемов для расчета СКВ зданий

Д.т.н., проф. А.Г. Сотников\*,  
НП «АВОК Северо-Запад»

Современные административно-общественные здания имеют повышенную, а иногда и чрезмерную площадь остекления. Витражи часто занимают высоту от пола до перекрытия, а в угловых помещениях площадь окон может достигать 30–40% от общей площади ограждений как наружных, так и внутренних. Не обсуждая внешнюю привлекательность таких фасадов, обратим внимание на защиту от потерь теплоты зимой и поступления теплоты летом. Известно, что коэффициент теплопередачи окна в 4–5 раз больше, чем стены, а радиационная теплота имеет интенсивность до 700–800 Вт/м<sup>2</sup>. Для таких помещений и зданий должна быть уточнена расчетная температура для отопления зимой. Традиционно принятая в России «пятнадцатичасовая» температура может привести к отклонениям температуры в помещении, превышающим допустимые. Периодичность воздействия радиации требует применить при ее описании гармонический анализ. В более общем случае с учетом затенения данным или соседними зданиями необходим гармонический анализ в более общем виде. Наконец, время начала и конца облучения можно определить только на основе стереографических траекторий Солнца. Все это вместе взятое позволит иначе и более точно подойти к расчету радиационных теплопритоков в помещение и определению времени его инсоляции.

Закономерности поступления теплоты в помещение и ее вычисление по своему физическому механизму принципиально отличаются для светопроемов и наружных непрозрачных ограждений (стен, кровли). Для остекленных поверхностей (рис. 1) передача теплоты за счет разности температур и солнечной радиации происходит без заметной аккумуляции и тепловой инерции при любой текущей разности температур  $\Delta t = t_H(\tau) - t_B$ .

Поток падающей солнечной радиации плотностью  $q(\tau)$ , Вт/м<sup>2</sup>, включая прямую и рассеянную, немного отражается и поглощается стеклом, а остальная, большая, часть поступает в помещение, а точнее, в пространство между стеклом и солнцезащитным устройством, частично отражается, а частично поглощается и в виде конвективной теплоты поднимается вверх. Солнцезащитные устройства поглощают и отражают падающее излучение, а при их отсутствии поток теплоты падает на стены и оборудование (мебель) помещения. В отоплении соответствующие теплопотери через окна называют *быстрыми* в силу безинерционной передачи теплоты такой конструкцией, в отличие от *медленных* – через массивные стены и кровлю. Чем больше доля остекленных поверхностей в здании, тем оно сильнее подвержено внешним температурным, ветровым и радиационным воздействиям и тем сложнее создать человеку в таком помещении тепловой комфорт. Учитывая это, нами предложена методика расчета, связывающего расчетную отопительную температуру наружного воздуха с относительной площадью остекления [1, 2].

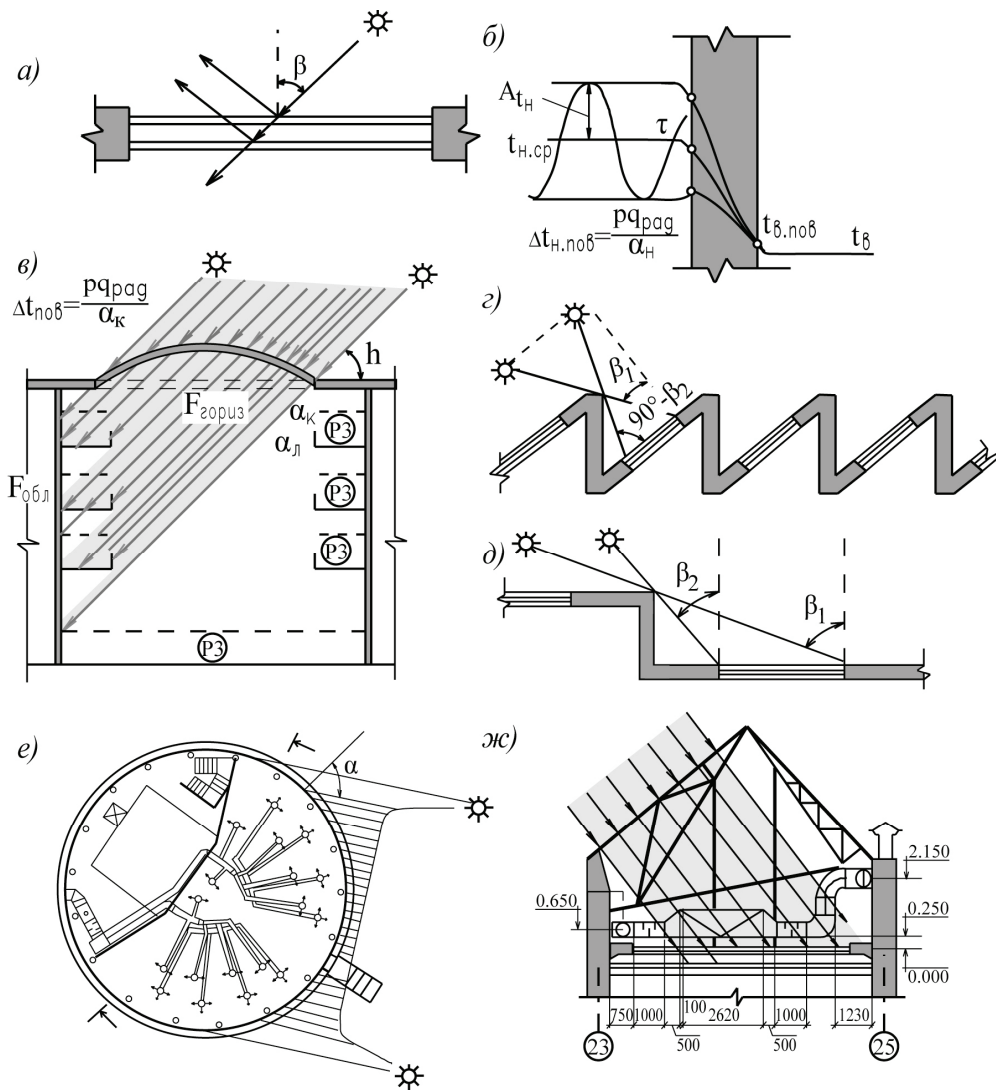
Суточная периодичность радиации позволяет приближенно описать ее изменение  $q(\tau)$  гармоническим рядом, т.е. среднесуточной величиной (нулевой гармоникой)  $q_{cp}$ , первой (основной) гармоникой с амплитудой  $A_{q_1}$  и периодом  $\tau=24$  ч, второй гармоникой с амплитудой  $A_{q_2}$  и периодом  $\tau=12$  ч, третьей, четвертой и высшими гармониками [3, 4, 5]:

$$q(\tau) = q_{cp} + A_{q_1} \cos[2\pi(\tau - \tau_1)/24] + A_{q_2} \cos[2\pi(\tau - \tau_2)/12] + \dots + A_{q_k} \cos[2\pi k(\tau - \tau_k)/24]. \quad (1)$$

Специфическая колоколообразная форма кривой изменения  $q(\tau)$  в течение суток и приближенная симметрия этой кривой относительно максимума  $q_{max}$  (в момент  $\tau_1$ ) позволяет описать ее суточное изменение приближенной зависимостью:

$$q(\tau) = \begin{cases} q_{max} \exp\left[-(\tau - \tau_1)^2 / 2\sigma_\tau^2\right] & \text{при } 0 < |\tau - \tau_1| < 2\sigma_\tau, \\ 0 & \text{при } \tau_n / 2 > |\tau - \tau_1| > 2\sigma_\tau, \end{cases} \quad (2)$$

формально совпадающей с нормальным законом распределения (хотя к статистике это отношения не имеет). Об этом же свидетельствует и график на рис. 2,а, где по горизонтальной оси в специальном масштабе отложены значения накопленной от начала суток до произвольного часа  $\tau$  интенсивности суммарной падающей радиации, отнесенной к ее суточной сумме.



**Рисунок 1. Характерные случаи и примеры воздействия солнечной радиации на прозрачные и непрозрачные ограждающие конструкции здания:**

- а** – схема поступления теплоты солнечной радиации через двойное (однокамерное) остекление в помещении с частичным поглощением и отражением (средства солнцезащиты не указаны);
- б** – схема воздействия периодического температурного или радиационного потока на непрозрачное ограждение и затухание температурных колебаний в нем;
- в** – расчетная схема поступления лучистой теплоты через прозрачное покрытие атриума;
- г** – схема стены пилообразной формы с наружным остеклением при его частичном затенении (комбинат печати в г. Тбилиси);
- д** – схема воздействия солнечной радиации при наличии затеняющего угла для остекления;
- е** – схема воздействия солнечной радиации на остекление круглой в плане формы (ресторан гостиницы «Советская», С-Петербург); в этом случае площадь криволинейной поверхности полуокружности заменяют ее проекцией на нормаль к лучам Солнца, т.е. уменьшают ее в  $\sqrt{2}$  раза;
- ж** – сложная трехслойная конструкция остекления верхней части здания Корпуса Бенуа ГРМ (С-Петербург) с расположением в нем кондиционеров и воздуховодов.

Полученные линии изменения накопленной радиации в основной (средней) части прямые, что позволяет вводить для  $q(\tau)$  зависимость (2). Величина  $\sigma_\tau$ , называемая здесь временем среднеквадратического отклонения, определяется из графика (рис. 2,а) как среднее из разностей моментов времени, соответствующих накопленной сумме радиации  $\bar{q}(\tau)=0,50$ ,  $\bar{q}(\tau)=0,16$  и соответствующих  $\bar{q}(\tau)=0,84$ ,  $\bar{q}(\tau)=0,50$ . Значения  $\sigma_\tau$  и  $\tau_1$  (при  $q_{max}$ ) представлены в табл. 1, а величины  $q_{max}$  для разной широты и ориентации (для июля) приведены на графике (рис. 2,б).

Сотников А.Г. Математический и стереографический анализ интенсивности солнечной радиации и затенения светопроемов для расчета СКВ зданий

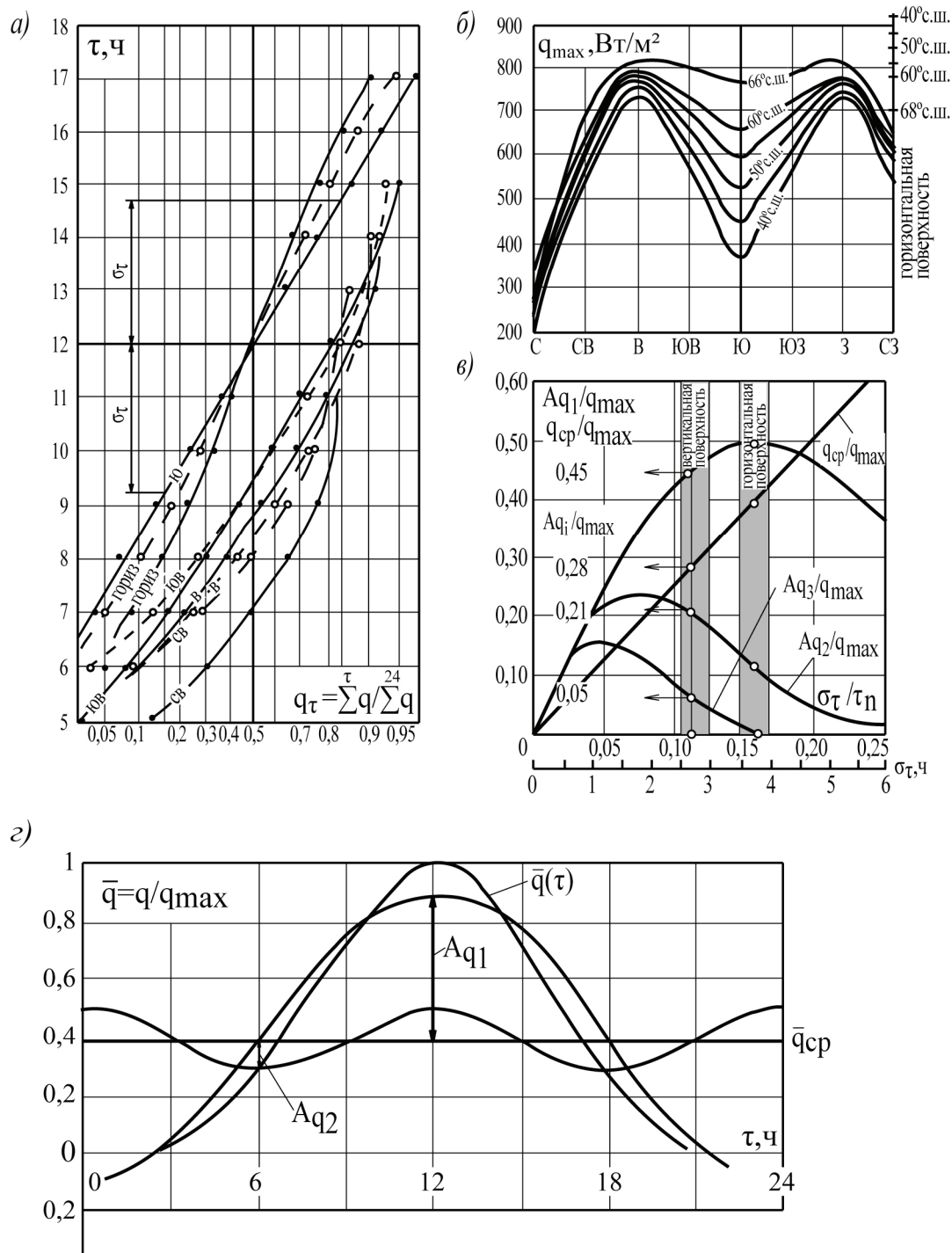


Рисунок 2. Комплексные зависимости для анализа и расчета интенсивности суммарной падающей солнечной радиации:

а – график почасового изменения накопленной от начала суток до произвольного часа  $\tau$  интенсивности суммарной падающей радиации, отнесенной к ее суточной сумме для остекления разной ориентации и географической широты;

б – зависимость максимальной интенсивности суммарной падающей солнечной радиации от географической широты и ориентации остекления по странам света;

в – график для определения среднесуточной радиации и амплитуд первых трех гармоник разложения интенсивности радиации в гармонический ряд и отнесенных к максимальной плотности  $q_{\max}$ ;

г – пример представления относительной интенсивности солнечной радиации  $\bar{q}(\tau) = q(\tau) / q_{\max}$ , падающей на горизонтальную поверхность как суммы нулевой (среднего), первой и второй гармоник ее разложения в ряд Фурье.

Сотников А.Г. Математический и стереографический анализ интенсивности солнечной радиации и затенения светопроемов для расчета СКВ зданий

**Таблица 1. Значения  $\sigma_\tau$  и часа максимума  $\tau_1$  суммарной падающей радиации для разной ориентации остекления и разной географической широты**

Величина	Географическая широта, ° с.ш.	Ориентация вертикальной поверхности по странам света							Горизонтальная поверхность
		СВ	В	ЮВ*	Ю*	ЮЗ*	З	СЗ	
Интервал $\sigma_\tau$ , ч	40	3,0	2,6	2,5	2,7	2,5	2,6	3,0	3,4
	60	2,5	2,5	2,7	2,7	2,7	2,5	2,5	4,0
Час максимума $\tau_1$ , ч	40	8	8,5	9,5	12	14,5	15,5	16	12
	60	7	8,5	9,5	12	14,5	15,5	17	12

\* Для ограждений этих ориентаций момент  $\tau_1$  максимума радиации примерно соответствует нормальному углу проекции на горизонтальную ось между лучом и вертикальной поверхностью.

Исходя из свойств периодической функции (2), время облучения вертикальных ограждений можно ограничить периодом  $\tau_{обл}=4\sigma_\tau=10-12$  ч. Не учитываемая этим интервалом радиация не превысит 5% суточной величины. **Среднюю за период  $\tau_n=24$  ч интенсивность радиации** (нулевую гармонику) можно записать как:

$$q_{cp} = \frac{2}{\tau_n} \int_0^{\tau_n/2} q(\tau) d\tau = \frac{2}{\tau_n} \int_0^{2\sigma_\tau} q_{max} \exp\left[-(\tau - \tau_1)^2 / 2\sigma_\tau^2\right] d\tau \approx \frac{2}{\tau_n} \int_0^{+\infty} q_{max} \exp\left[-(\tau - \tau_1)^2 / 2\sigma_\tau^2\right] d\tau. \quad (3)$$

\*Замена предела с  $2\sigma_\tau$  на  $+\infty$  в формулах (2) и (3) произведена для возможности непосредственного вычисления этого интеграла.

**Среднее значение интенсивности солнечной радиации** определяется по формуле:

$$q_{cp} = \sqrt{2\pi} q_{max} \sigma_\tau / \tau_n \approx 0,1\sigma_\tau q_{max}. \quad (4)$$

**Амплитуда  $k$ -й гармоники разложения** интенсивности радиации определяется по зависимости:

$$A_{q_k} = \frac{4}{\tau_n} \int_0^{\tau_n/2} q(\tau) \cos(2k\pi\tau / \tau_n) d\tau = \frac{4q_{max}}{\tau_n} \int_0^{2\sigma_\tau} \exp\left[-(\tau - \tau_1)^2 / 2\sigma_\tau^2\right] \cos(2k\pi\tau / \tau_n) d\tau \approx \frac{4q_{max}}{\tau_n} \int_0^{+\infty} \exp\left[-(\tau - \tau_1)^2 / 2\sigma_\tau^2\right] \cos(2k\pi\tau / \tau_n) d\tau = 2\sqrt{2\pi} (\sigma_\tau / \tau_n) q_{max} \exp\left(-2k^2 \pi^2 \sigma_\tau^2 / \tau_n^2\right). \quad (5)$$

Учитывая, что  $2\sqrt{2\pi} \approx 5$  и  $\pi^2 \approx 10$ , получаем:

$$A_{q_k} = 5 \exp\left(-20k^2 \sigma_\tau^2 / \tau_n^2\right) q_{max} \sigma_\tau / \tau_n. \quad (6)$$

Из этой формулы следует, что амплитуда  $k$ -й гармоники  $A_{q_k}$  разложения интенсивности солнечной радиации в гармонический ряд, отнесенная к максимальной интенсивности  $q_{max}$ , зависит лишь от порядкового номера гармоники  $k$  и интервала времени  $\sigma_\tau$ . Последний зависит в основном от того, какая поверхность (горизонтальная или вертикальная) рассматривается. От ориентации же вертикальной поверхности и географической широты величина  $\sigma_\tau$  меняется сравнительно мало (см. табл. 1).

**Амплитуда первой (основной) гармоники** разложения интенсивности солнечной радиации (при  $k=1$ ) выражается зависимостью:

$$A_{q_1} = 5 \exp\left(-20\sigma_\tau^2 / \tau_n^2\right) q_{max} \sigma_\tau / \tau_n. \quad (7)$$

**Амплитуда второй гармоники** разложения интенсивности солнечной радиации (при  $k=2$ ) выражается зависимостью:

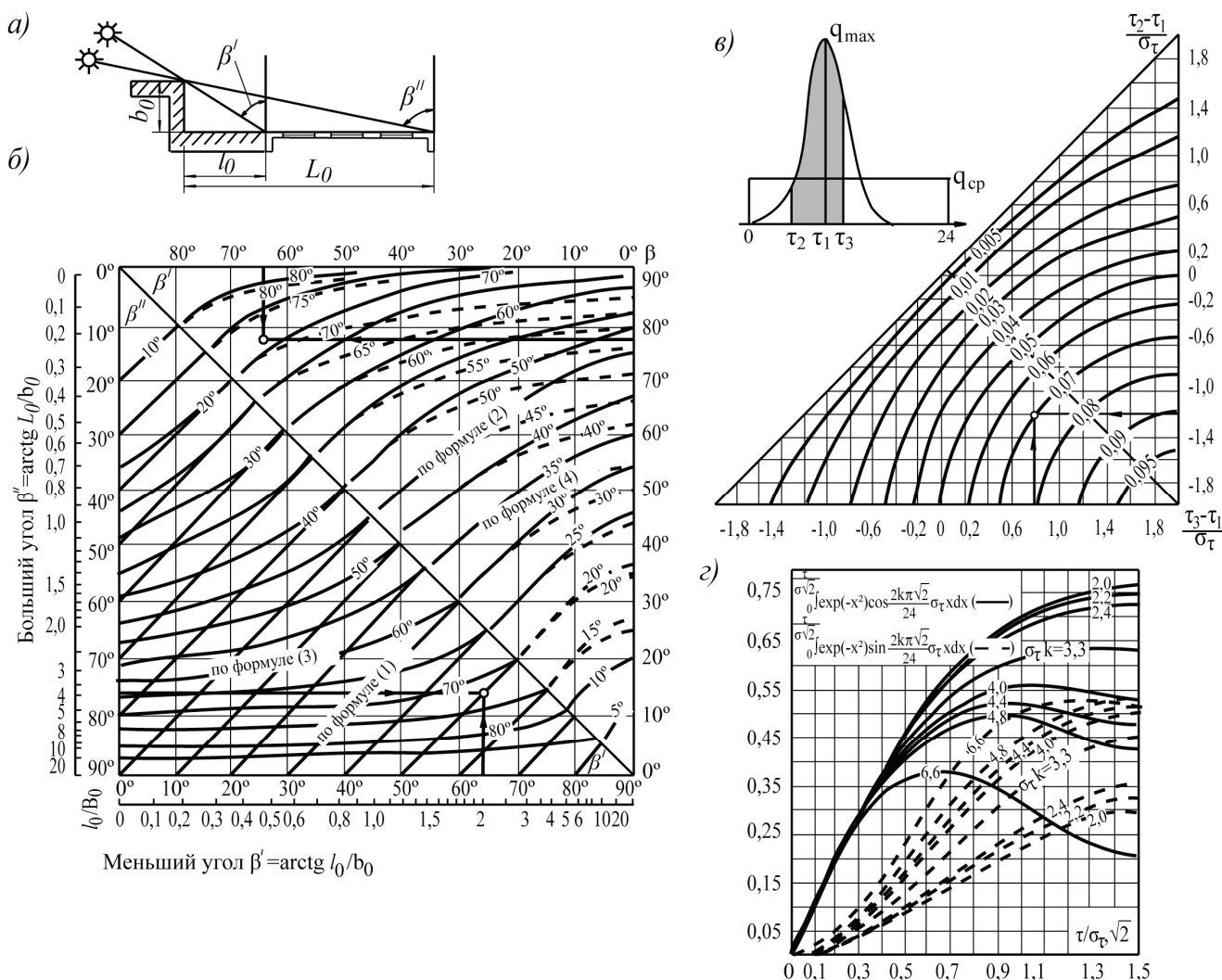
$$A_{q_2} = 5 \exp\left(-80\sigma_\tau^2 / \tau_n^2\right) q_{max} \sigma_\tau / \tau_n. \quad (8)$$

Для определения относительной величины среднесуточной радиации  $q_{cp}/q_{max}$  и относительных амплитуд первой (основной), второй и третьей гармоник разложения  $A_{q_k}/q_{max}$  построен график (рис. 2, в).

**Воздействие прерывистой солнечной радиации на остекление при произвольном начале и конце облучения является наиболее общим и физически правильным случаем расчета.** Рассмотрим эту двумерную задачу в плоском варианте, т.е. на плане помещения, этот случай описан в книге автора [3]. Прерывистость радиации объясняется затенением остекления близкорасположенными строениями данного Сотников А.Г. Математический и стереографический анализ интенсивности солнечной радиации и затенения светопроемов для расчета СКВ зданий

или соседних зданий (рис. 1,д). При таком затенении можно определить средние моменты начала  $\tau_{2,ср}$  и конца  $\tau_{3,ср}$  облучения. В более сложном случае прерывистость радиации объясняется изменением состояния атмосферы (облачности), является неупорядоченной и аналитическому расчету не подлежит.

Рассмотрим остекление помещения длиной  $L_0-l_0$ , затеняемое выступом шириной  $b_0$ , удаленным от дальнего края остекления на расстояние  $L_0$  (рис. 3,а).



**Рисунок 3. Комплекс номограмм для расчета прерывистой солнечной радиации, поступающей на остекление помещения (в плане):**

- а** – схема прерывистой солнечной радиации при затенении остекления выступом здания;
- б** – номограмма для определения среднего момента начала или конца прерывистого облучения остекления, определяемого по формулам (8) – (11);
- в** – номограмма для определения средней за сутки прерывистой радиации в долях от максимальной часовой при произвольных моментах начала  $\tau_2$  и конца  $\tau_3$  облучения остекления;
- г** – график для определения значений интегралов (13) и (14) при определении амплитуд первой (основной) и второй гармоник разложения прерывистой солнечной радиации в ряд Фурье.

Чем меньше ширина выступа  $b_0$  и чем больше длина окна  $L_0-l_0$ , тем дальше движется граница тени вдоль поверхности остекления. Это время в пределе может достигать  $\Delta\tau=6$  ч. Поэтому принцип определения среднего момента начала или конца облучения остекления имеет во многих случаях большое значение. При разных способах усреднения получаем разные толкования среднего времени начала и конца облучения. Для упрощения задачи первоначально предположим, что за время движения границы тени по остеклению интенсивность падающей радиации не меняется.

**Расчет времени начала и конца облучения** будем проводить от момента  $\tau'_1$ , когда направление солнечного луча в плане нормально к поверхности остекления. В соответствии с замечанием к табл. 1, момент Сотников А.Г. Математический и стереографический анализ интенсивности солнечной радиации и затенения светопроемов для расчета СКВ зданий



$\tau'_1$  совпадает с моментом  $\tau_1$  максимума падающей радиации для южной, юго-западной и юго-восточной ориентации остекления. Угол, образованный солнечным лучом и нормалью к поверхности остекления, обозначим  $\beta$ . Рассмотрим следующие принципы усреднения момента начала или конца прерывистой радиации.

1. За момент начала или конца радиации на остекленной поверхности принимают такой, при котором угол  $\beta$  является **средним** между его крайними значениями  $\beta'$  и  $\beta''$  на облучаемой поверхности:

$$\tau'_1 - \tau_{2,cp} = \tau_{3,cp} - \tau'_1 = 24\beta_{cp} / 2\pi = 24(\beta' + \beta'') / 4\pi = 24(\arctg l_0 / b_0 + \arctg L_0 / b_0) / 4\pi. \quad (8)$$

2. За момент начала или конца радиации на остекленной поверхности принимают такой, который соответствует моменту **среднеинтегрального** угла  $\beta$ :

$$\tau'_1 - \tau_{2,cp} = \tau_{3,cp} - \tau'_1 = 24\beta_{cp,инт} / 2\pi = 24\arctg\left(\frac{1}{\beta'' - \beta'} \ln \frac{\cos \beta'}{\cos \beta''}\right) / 2\pi. \quad (9)$$

3. За момент начала или конца радиации на остекленной поверхности принимают такой, когда облучается **половина длины** рассматриваемого остекления:

$$\tau'_1 - \tau_{2,cp} = \tau_{3,cp} - \tau'_1 = 24\beta_{cp,l} / 2\pi = 24\arctg\left[(L_0 + l_0) / 2b_0\right] / 2\pi. \quad (10)$$

4. За момент начала или конца радиации на остекленной поверхности принимают такой, когда облучается **среднеинтегральная длина** рассматриваемого остекления:

$$\begin{aligned} \tau'_1 - \tau_{2,cp} = \tau_{3,cp} - \tau'_1 &= 24\beta_{cp,инт,l} / 2\pi = \frac{24}{2\pi} \cdot \frac{1}{L_0 - l_0} \int_{l_0}^{L_0} \arctg(l / b_0) dl = \\ &= \frac{24}{2\pi(L_0 - l_0)} \left[ l \arctg(l / b_0) - \frac{b_0}{2} \ln(1 + l^2 / b_0^2) \right] \Big|_{l_0}^{L_0}. \end{aligned} \quad (11)$$

Поясним методику сравнительного определения среднего момента начала облучения остекленной поверхности по разным методикам характерным примером.

**Пример 2.** Определить среднее время начала облучения остекленной поверхности, отсчитываемое от момента, когда солнечный луч в плане нормален к поверхности, при таких данных:  $b_0=3$  м,  $L_0=12$  м,  $l_0=6$  м.

Если за начало радиации принять момент времени, соответствующий углу падения лучей, среднему между его крайними значениями  $\beta'$  и  $\beta''$ , то по формуле (8) получим:

$$\begin{aligned} \tau'_1 - \tau_{2,cp} = \tau_{3,cp} - \tau'_1 &= 24\beta_{cp} / 2\pi = 24(\beta' + \beta'') / 4\pi = 24(\arctg l_0 / b_0 + \arctg L_0 / b_0) / 4\pi = \\ &= 24[\arctg(6 / 3) + \arctg(12 / 3)] / 2\pi = 4,5 \text{ ч.} \end{aligned}$$

Если за начало радиации принять момент времени, соответствующий среднеинтегральному углу, то по формуле (9) получим:

$$\begin{aligned} \tau'_1 - \tau_{2,cp} = \tau_{3,cp} - \tau'_1 &= 24\beta_{cp,инт} / 2\pi = 24\arctg\left(\frac{1}{\beta'' - \beta'} \ln \frac{\cos \beta'}{\cos \beta''}\right) / 2\pi = \\ &= 24\arctg\left[1 / (76^\circ - 64^\circ) \ln(\cos 64^\circ / \cos 76^\circ)\right] / 2\pi = 4,7 \text{ ч.} \end{aligned}$$

Если за начало радиации принять момент времени, когда облучается половина длины остекления, то по формуле (10) получим:

$$\tau'_1 - \tau_{2,cp} = \tau_{3,cp} - \tau'_1 = 24\beta_{cp,l} / 2\pi = 24\arctg\left[(L_0 + l_0) / 2b_0\right] / 2\pi = 24\arctg\left[(12 + 6) / 2 \cdot 3\right] / 2\pi = 4,8 \text{ ч.}$$

Если за начало радиации принять момент времени, соответствующий среднеинтегральной длине тени, то по формуле (11) получаем:  $\tau'_1 - \tau_{2,cp} = 4,7$  ч. Таким образом, в условиях данного примера разные способы определения среднего времени начала и конца радиации при его прерывистом воздействии дают близкие результаты.

Сотников А.Г. Математический и стереографический анализ интенсивности солнечной радиации и затенения светопроемов для расчета СКВ зданий

Различие результатов усреднения будет возрастать, когда угол  $\beta' \rightarrow 0$ , а угол  $\beta'' \rightarrow \pi/2$ , что имеет место при геометрических размерах, соответствующих неравенствам:  $L_0 \gg l_0$  и  $L_0 \gg b_0$ . Для практического определения среднего момента начала или конца облучения по формулам (8)-(11) на рис. 3,б приведена номограмма.

Для более детального анализа нужно определить первые гармоники разложения прерывистой солнечной радиации. В общем случае амплитуда  $k$ -й гармоники такого разложения определяется как:

$$A_{q_k} = \sqrt{(A'_{q_k})^2 + (A''_{q_k})^2}. \quad (12)$$

Интервалы времени  $\tau_{3,ср} - \tau_1$  и  $\tau_{2,ср} - \tau_1$ , отнесенные к среднеквадратическому отклонению  $\sigma_\tau$ , обозначим через  $\bar{\tau}_3$  и  $\bar{\tau}_2$ . Первая составляющая амплитуды:

$$A'_{q_k} = \frac{2}{\tau_n} q_{\max} \int_{\bar{\tau}_2 \sigma_\tau}^{\bar{\tau}_3 \sigma_\tau} \exp\left[-(\tau - \tau_1)^2 / 2\sigma_\tau^2\right] \cos(2k\pi\tau / \tau_n) d\tau = \frac{2\sqrt{2}\sigma_\tau}{\tau_n} \int_{\bar{\tau}_2 \sigma_\tau}^{\bar{\tau}_3 \sigma_\tau} \exp(-x^2) \cos(2k\pi\sqrt{2}\sigma_\tau x / \tau_n) dx \quad (13)$$

Аналогично выражается вторая составляющая амплитуды:

$$A''_{q_k} = \frac{2}{\tau_n} q_{\max} \int_{\bar{\tau}_2 \sigma_\tau}^{\bar{\tau}_3 \sigma_\tau} \exp\left[-(\tau - \tau_1)^2 / 2\sigma_\tau^2\right] \sin(2k\pi\tau / \tau_n) d\tau = \frac{2\sqrt{2}\sigma_\tau}{\tau_n} \int_{\bar{\tau}_2 \sigma_\tau}^{\bar{\tau}_3 \sigma_\tau} \exp(-x^2) \sin(2k\pi\sqrt{2}\sigma_\tau x / \tau_n) dx \quad (14)$$

Значения интегралов (13) и (14) при нулевом нижнем пределе, произвольном верхнем пределе и переменном аргументе  $k \cdot \sigma_\tau$  тригонометрических функций косинуса и синуса предварительно вычислены на ЭВМ, а результаты расчетов представлены на графике (рис. 3, в). Поясним методику расчета примером.

**Пример 3.** Определить амплитуды основной и второй гармоник разложения интенсивности прерывистой солнечной радиации в условиях предыдущего примера. Для определения значений интегралов (13) и (14) по графику рис. 3, в предварительно определяем на основе данных примера  $2 \bar{\tau}_2 / \sqrt{2} = -0,85$ ,  $\bar{\tau}_3 / \sqrt{2} = 0,53$ . По графику рис. 3, в определяем значения четырех интегралов при двух пределах интегрирования и  $k\sigma_\tau = 2,5$  ч и четырех интегралов при двух пределах интегрирования и  $k\sigma_\tau = 5,0$  ч. Амплитуда основной гармоники:

$$A_{q_1} = 2\sqrt{2}\sigma_\tau q_{\max} \sqrt{\left(\int_{0,1}^{0,53} - \int_{0,1}^{-0,85}\right)^2 + \left(\int_{0,11}^{0,53} - \int_{0,11}^{-0,85}\right)^2} / \tau_n =$$

$$= 2\sqrt{2} \cdot 2,5 \cdot 770 \sqrt{[0,47 - (-0,62)]^2 + [0,13 - (-0,23)]^2} / 24 \approx$$

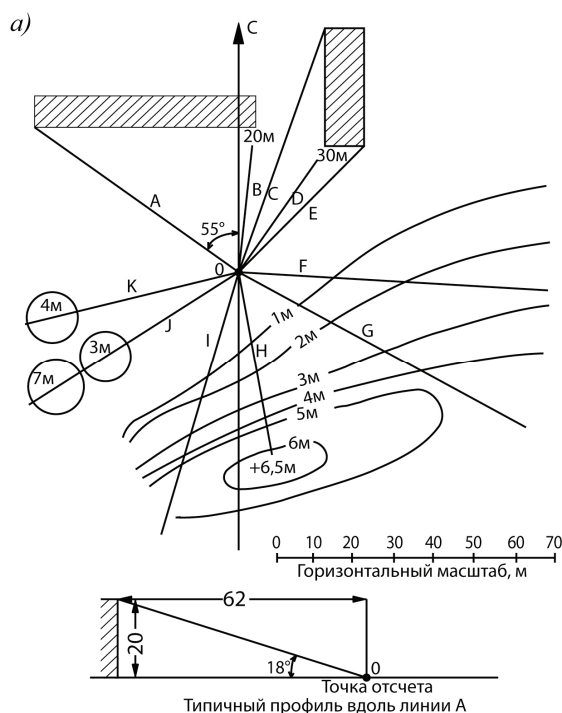
$$\approx 260 \text{ Вт/м}^2.$$

Амплитуда второй гармоники:

$$A_{q_2} = 2\sqrt{2} \cdot 2,5 \cdot 770 \sqrt{[0,42 - (-0,48)]^2 + [0,23 - (-0,40)]^2} /$$

$$/ 24 \approx 250 \text{ Вт/м}^2.$$

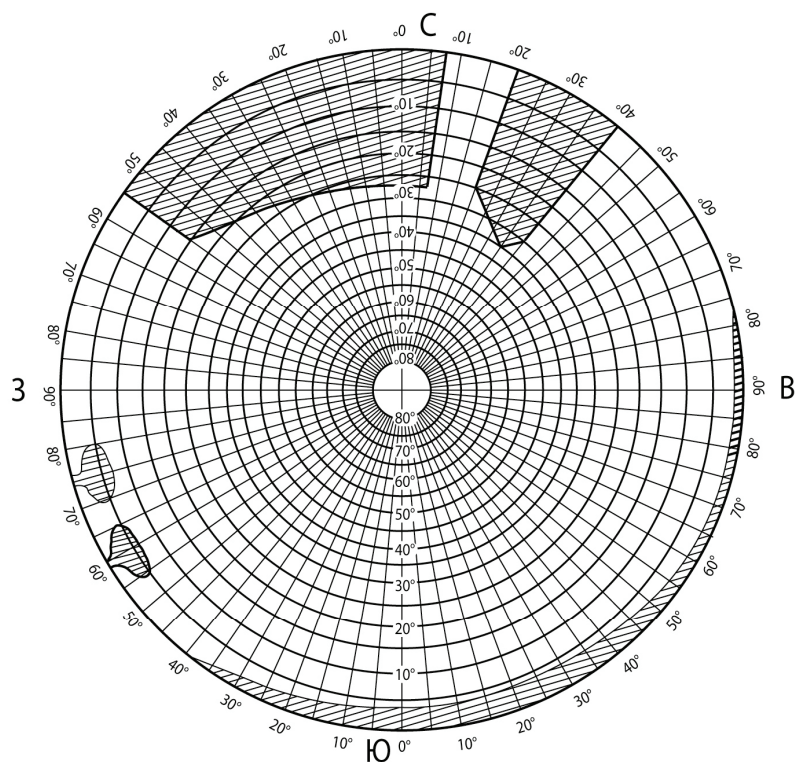
Вычисленные амплитуды используют для оценки колебаний температуры воздуха в помещении под влиянием периодических тепловых потоков с разными периодами (частотами).



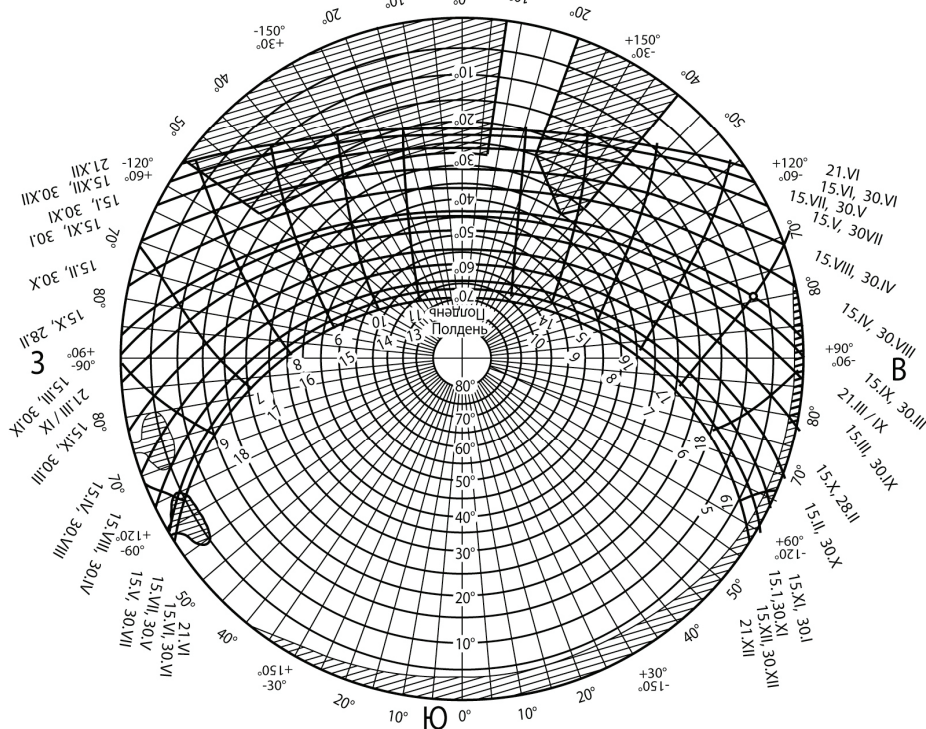
**Рисунок 4. Методика использования диаграммы траектории Солнца с наложением на нее высоты и азимута затенения и распределения тени на строительной площадке:**

**а** – план строительной площадки с высотами (высоты даны в метрах), **О** – точка отсчета

б)



в)



**Рисунок 4. Методика использования диаграммы траектории Солнца с наложением на нее высоты и азимута затенения и распределения тени на строительной площадке:**

**б** – теньевая маска для  $45^\circ$  с.ш., построенная для точки отсчета  $O$  на строительной площадке;  
**в** – теньевая маска строительной площадки, наложенная на диаграмму траектории Солнца.

**Определение времени облучения** помещения и здания при произвольной планировке (застройке) участка и для произвольной географической широты пункта наиболее удобно производить с помощью номограмм Рейдата или солнечных карт, широко используемых за рубежом и реже в России. Подробное описание номограмм Рейдата можно найти в книге Т.А. Маркуса и Э.Н. Морриса [6]. Методика использования диаграммы траектории Солнца с наложением на нее высоты Солнца над горизонтом и азимута затенения и распределения тени на строительной площадке показана на рис. 4.

Сотников А.Г. Математический и стереографический анализ интенсивности солнечной радиации и затенения светопроемов для расчета СКВ зданий



Основу номограмм составляет стереографическая проекция с изображенными на ней траекториями Солнца в разные дни и месяцы года для известной географической широты. Ряд концентрических окружностей представляют собой высоты Солнца ( $h$ , °), а по внешнему краю указаны азимуты. По такой сфере при наложении на нее соответствующих планшетов могут быть определены высота и азимут Солнца для любой даты и любого часа суток, а также угол падения Солнца на поверхности с разными углами наклона. Например, на рис. 4, в для  $45^\circ$  с.ш. 30 марта в 7 ч утра положение Солнца характеризуется азимутом (углом наклона к линии С-Ю)  $80^\circ$  и высотой Солнца над горизонтом  $h=8^\circ$ . Максимальная высота Солнца над горизонтом в зависимости от географической широты, месяца и числа может быть приближенно определена по рис. 5.

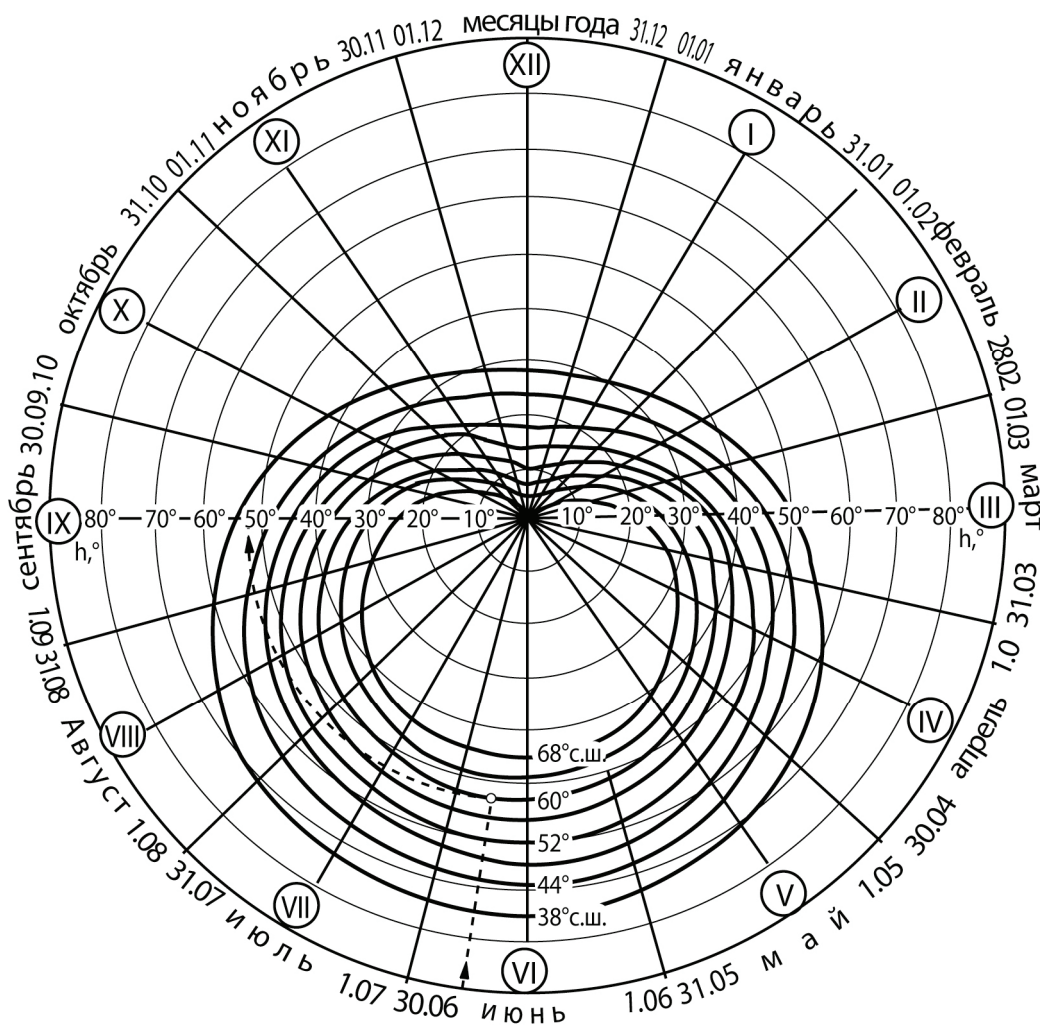


Рисунок 5. Зависимость максимальной высоты Солнца над горизонтом (угла склонения  $h$ , °) от географической широты пункта, месяца года и числа

Ключ: на широте С-Петербурга ( $60^\circ$  с.ш.) 22 июня максимальная высота Солнца в полдень над горизонтом достигает  $h=53^\circ$

Каждая такая номограмма составлена для определенной географической широты, такие номограммы для разной широты от  $33^\circ$  до  $65^\circ$  представлены в [6]. Ими можно пользоваться для той же широты и в другом полушарии. На номограммах траектории Солнца нанесены часовые линии, они соответствуют истинному солнечному времени (а не декретному), когда в полдень Солнце находится точно на юге (в северном полушарии). Положение Солнца в дни равноденствий на всех широтах во время восхода точно на востоке, а во время захода – точно на западе, т.е. в 6 и 18 ч соответственно. На рис. 4,а показан пример определения по номограмме Рейдата продолжительности облучения территории конкретного здания с учетом его затенения препятствиями и требований норм инсоляции жилых и общественных помещений [7, 8]. Как следует из построений, в осенне-зимний период значительную часть суток здание затенено. В теплый же период года это затенение невелико. Например, в ноябре–январе строительная площадка без учета затенения освещается в течение 4–7 ч в сутки, а при затенении – лишь 2 ч утром. В июне объект затеняется в течение 2 ч из 19 ч.

**Таким образом, последовательность построений и расчетов затенения (или освещения Солнцем) по этой методике следующая:**

- выбрать из [6] номограмму, соответствующую географической широте расположения строительного объекта;
- выбрать точку отсчета (0) на планировке в центре рассматриваемого микрорайона;
- составить план застройки вокруг проектируемого здания, измерить расстояния до ближайших препятствий, указать их длину, ширину и высоту, а для деревьев – диаметр окружности, в которую вписывается крона деревьев;
- измерить угловые размеры препятствий согласно схеме (рис. 4,а);
- нанести изображения препятствий на номограмму (рис. 4,б), т.е. построить теневую маску;
- пользуясь номограммой на рис. 4,в, на которой изображены и оцифрованы суточные траектории движения Солнца для центральной и последней даты каждого месяца, определить периоды, когда данное ограждение будет освещено.

Для того чтобы определить облученность Солнцем конкретного окна, нужно вырезать сектор на номограмме и определить соответствующие ему часы суток, когда оно будет освещено. Следует отметить, что облученность зданий, как правило, в реальных условиях, особенно в высоких широтах, сокращается из-за облаков. Поэтому возможное число часов облучения здания следует уменьшить с учетом облачности.

### Литература

1. Сотников А. Г. О связи расчетной отопительной температуры и мощности системы отопления с относительной площадью остекления помещения и здания // Теплоэнергоэффективные технологии: информ. бюллетень. 2009. № 4(57). С. 25–28; «С.О.К.». 2010. № 3. С. 52–54.
2. Сотников А. Г. Связь температуры и мощности отопления с площадью остекления // «С.О.К.». 2010. № 3. С. 52–54.
3. Сотников А. Г. Системы кондиционирования воздуха с количественным регулированием. Л. : Стройиздат. Ленингр. отд-ние, 1976. 168 с.
4. Сотников А. Г., Хомуцкий Ю. Н. Определение летних теплоступлений для зданий с повышенной остекленностью / В кн.: Кондиционирование воздуха в промышленности. М. : ВЦНИИ охраны труда, 1973. С. 102–111.
5. Сотников А. Г., Хомуцкий Ю. Н. Метод расчета солнечной радиации / В кн.: Кондиционирование воздуха в промышленных и гражданских зданиях. Л. : ЛДНТП, 1974.
6. Маркус Т. А., Моррис Э. Н. Здания, климат и энергия / Пер. с англ. под ред. Н.В. Кобышевой и Е.Г. Малявиной. Л. : Гидрометеоздат, 1985. 543 с.
7. СанПиН 2.2.1/2.1.1.1076-01. Гигиенические требования к инсоляции и солнцезащиты помещений жилых и общественных зданий и территорий.
8. ТСН-23-359-2006. Инсоляция и солнцезащита помещений жилых и общественных зданий в Санкт-Петербурге.

*\* Анатолий Геннадиевич Сотников, Санкт-Петербург  
Тел. раб.: +7(812)558-48-92; эл. почта: asotnikov2005@yandex.ru*