

УДК 628.928

АНАЛИЗ ТЕПЛОПOTЕРЬ ПОМЕЩЕНИЙ ЧЕРЕЗ СИСТЕМЫ ЕСТЕСТВЕННОГО ОСВЕЩЕНИЯ

Т.Г. Коржнева, В.Я. Ушаков, А.Т. Овчаров*

Томский политехнический университет

*ЗАО «Электрум», г. Томск

E-mail: korzhneva.tayana@mail.ru

Работа посвящена анализу теплопотерь помещений через светопрозрачные ограждающие конструкции, образованные боковыми светопроемами и полыми трубчатыми световодами для верхнего освещения (комбинированные системы естественного освещения). Конечной целью исследований, выполняемых авторами, является разработка методики расчета и выбора оптимальных (по энергозатратам и световому комфорту) параметров систем естественного и искусственного освещения. Основное внимание уделено оценке теплопотерь и эффективности светопропускания элементами комбинированного освещения.

Ключевые слова:

Естественное освещение, световод, энергобаланс, верхний свет.

Key words:

Daylighting, light pipe, energy balance, top light.

Введение

Развитие человечества неразрывно связано с потреблением света не меньше, чем с потреблением металла, нефти, угля, электричества. Степень развития общества принято характеризовать световым энергетическим уровнем, измеряемым в мегалюмен-часах (Млм·ч), вырабатываемых в год на одного человека. (В России – около 43 Млм·ч, в США – около 200 Млм·ч.). На сегодня далеко не достигнут физиологический оптимум световой энергии – в большинстве случаев фактический в 5–10 раз ниже оптимального. Это означает, что потребление света будет нарастать и тенденции развития человечества ориентированы на дальнейшее увеличение потребления света. Пока этот рост обеспечивается преимущественно увеличением электрического освещения, требующего нарастающих объемов электроэнергии. В России на цели освещения затрачивается примерно 14 % от общего электропотребления. При этом в общественных зданиях на освещение приходится от 30 до 45 % всей потребляемой электроэнергии [1].

Естественное освещение**через традиционные световые проёмы**

Рациональное использование естественного света – это один из способов экономии электроэнергии на искусственное освещение. Основным источником естественного освещения помещений являются световые проёмы – окна различной геометрии, конструкции, размещения. Несмотря на то, что современные материалы позволяют создавать светопрозрачные конструкции с повышенным сопротивлением теплопередаче, тем не менее, они остаются основными источниками тепловых потерь (до 40...45 %) в здании, а также имеют высокие строительную стоимость и эксплуатационные расходы. Поэтому при строительстве и реконструкции сооружений с целью эффективного использования энергоресурсов параметры светового проема следует выбирать с учетом экономии элек-

троэнергии на искусственное освещение и сокращения затрат энергии на восполнение теплопотерь через световые проёмы зимой и кондиционирование/вентиляцию для компенсации избыточного теплопоступления через них летом.

Важной задачей является поиск таких решений, при которых теплопотери через оконные проёмы будут минимальны и не увеличат затраты на теплоснабжение, а освещенность будет достаточной и не увеличит затраты на искусственное освещение.

Баланс компонентов суммарных энергетических затрат позволяет установить для каждого конкретного случая оптимальный по площади оконный проем, при котором энергетические затраты на естественное и искусственное освещение будут минимальны.

Основные потери теплоты Q_o , Вт, через ограждающие конструкции зависят от разности температуры наружного и внутреннего воздуха и определяются по формуле [2]:

$$Q_o = Ak(t_b - t_n)n, \quad (1)$$

где k – коэффициент теплопередачи ограждения, Вт/(м²·°C); A – расчетная поверхность ограждающей конструкции, м²; t_b – расчетная температура воздуха помещения, °C [3]; t_n – расчетная температура наружного воздуха, °C [3]; n – коэффициент, зависящий от положения наружной поверхности по отношению к наружному воздуху [4].

Коэффициент теплопередачи ограждения обратно пропорционален приведенному сопротивлению теплопередаче R_o' :

$$k = \frac{1}{R_o'}.$$

Показатель k характеризует количество тепла, которое проходит через один квадратный метр конструкции при разности температур по обе стороны в один градус за 1 час.

В соответствии с [2], показатель «градусо–сутки отопительного периода» (ГСОП) равен:

$$\text{ГСОП} = Z_{\text{гт}} \cdot (t_{\text{int}}^h - t_{\text{ext}}) = 6938 \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{сутки}.$$

Приведенное сопротивление теплопередаче светопрозрачных ограждающих конструкций R_0 должно быть не менее допустимого R_0^{req} :

$$R_0^r \geq R_0^{\text{req}}.$$

Для Томской области, в соответствии с [3], приведенное сопротивление теплопередаче светопрозрачных ограждающих конструкций принимается равным $R_0^{\text{req}} = 0,647 \text{ м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$, поэтому для Томска предпочтительно применять стеклопакеты двух типов: однокамерные (два стекла) с i -стеклом и аргонном ($R_0 = 0,66 \text{ м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$) и двухкамерные стеклопакеты (три стекла) с i -стеклом ($R_0 = 0,72 \text{ м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$). Для сравнения деревянное окно устаревшего образца с двойным остеклением имеет сопротивление теплопередаче $R_0 = 0,28 \text{ м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$. На рис. 1 показана зависимость теплотерь из помещения от площади остекленной поверхности для различных типов окон (при построении графика был вве-

ден параметр a — отношение площади окна к ограждающей конструкции, и рассмотрены крайние случаи: 0 % — в помещении отсутствует оконный проем и 100 % — оконный проем занимает всю площадь наружного ограждения).

Основным показателем для нормирования уровня естественной освещенности является коэффициент естественной освещенности (КЕО), %. Чем выше показатель КЕО, тем выше уровень естественной освещенности и, соответственно, комфортнее условия работы и пребывания в помещении. Размер оконного проема не может быть меньше минимально установленного, исходя из уровня естественной освещенности, задаваемого КЕО.

Определим зависимость КЕО от площади окна и сравним с соответствующей зависимостью для теплотерь.

Коэффициент естественной освещенности (e_n) при боковом освещении можно вычислить согласно [4]:

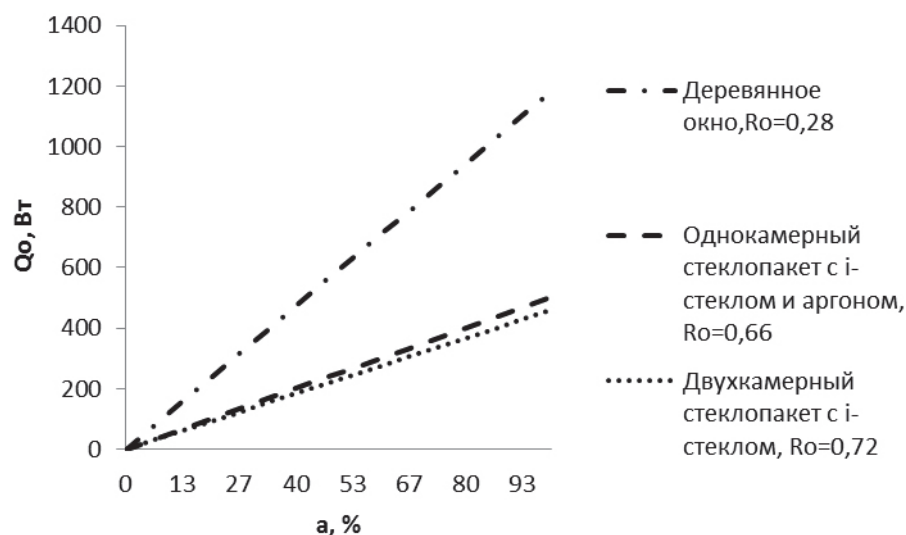


Рис. 1. Влияние площади оконного проема и материалов на потери тепла помещения

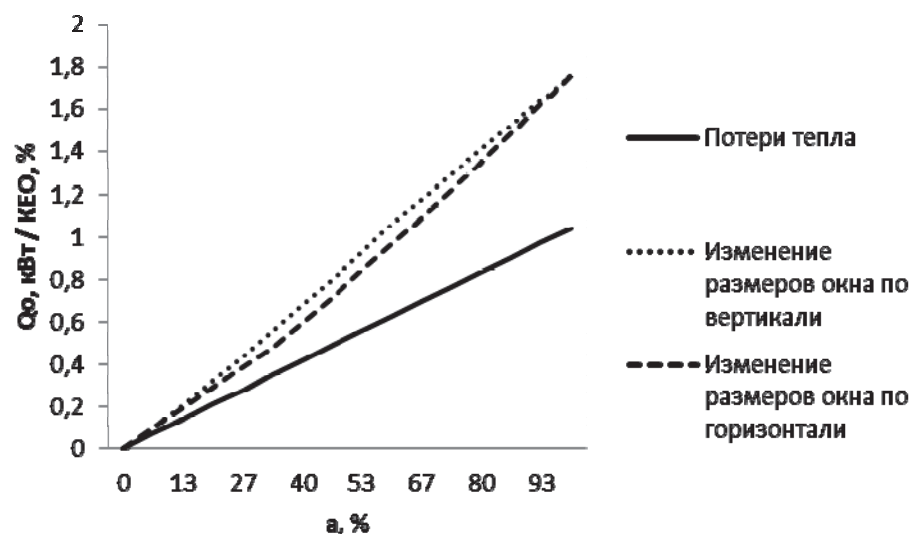


Рис. 2. Влияние площади оконного проема на КЕО и потери тепла из помещения

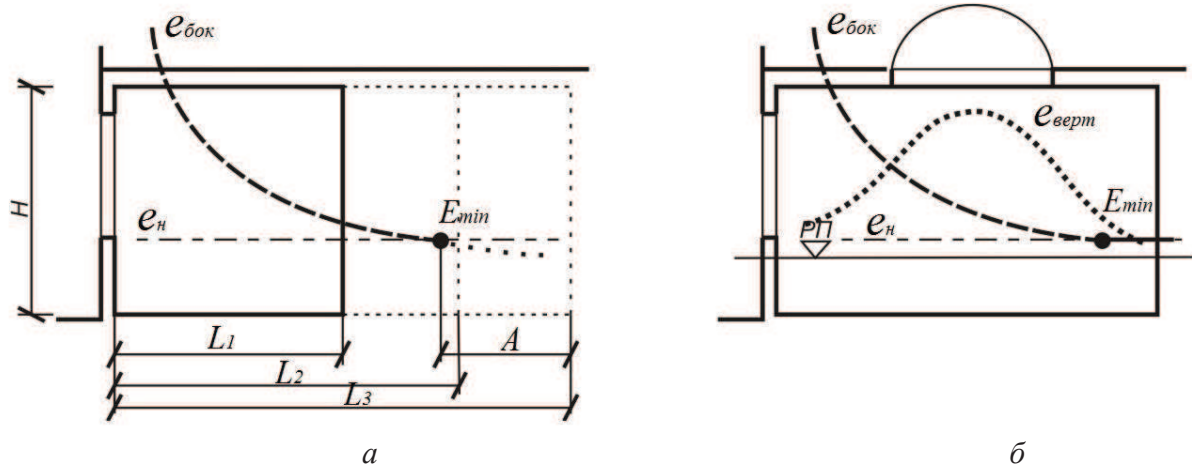


Рис. 3. Влияние на ЕО размеров помещения (а) и положения светового проема (б)

$$e_n = \frac{100 S_o \tau_o r_o}{S_n K_3 K_{зд} \eta_o},$$

где S_o — площадь боковых светопроемов; S_n — площадь пола помещения; τ_o — общий коэффициент светопропускания проема; r_o — коэффициент, учитывающий повышение КЕО при боковом освещении, в результате отражения света от поверхностей помещения; K_3 — коэффициент запаса на загрязнение; $K_{зд}$ — коэффициент, учитывающий затенение окон противостоящими зданиями; η_o — световая характеристика окон.

При расчете зависимостей на рис. 2 значения приведенных выше коэффициентов приняты в соответствии с [4].

Из рис. 2 видно, что изменение размера оконных проемов по вертикали дает наибольший эффект по увеличению КЕО при тех же теплопотерях. Так, увеличение площади окна на 10 % за счёт изменения его вертикальных размеров сопровождается увеличением КЕО в среднем на 12 % в сравнении с изменением площади за счёт ширины.

Традиционные вертикальные окна обеспечивают нормируемый уровень естественной освещенности в помещении на расстоянии приблизительно 6 м от окна, но при высокой неоднородности. Так, если глубина помещения равна его высоте $L_1 = H$ (рис. 3, а), то помещение характеризуется как мелкое, светлое, при $H < L_2 < 2H$ — как типичное, средней глубины и освещенности, при $L_3 \geq 2H$ — как глубокое с недостаточной естественной освещенностью. Распределение освещенности от окна имеет асимптотический характер, резко уменьшаясь по мере удаления от окна; для её увеличения в глубине помещения необходимо значительно увеличивать размеры оконного проема.

Таким образом, при выборе конструктивных параметров боковых световых проемов должны учитываться теплопотери и светораспределение в помещении.

Естественное освещение через полые трубчатые световоды

Рассмотрим решение задачи минимизации энергозатрат и повышения однородности световой среды (более широко — улучшения светового комфорта) с использованием полых трубчатых световодов (ПТС) (рис. 3, б, рис. 4).

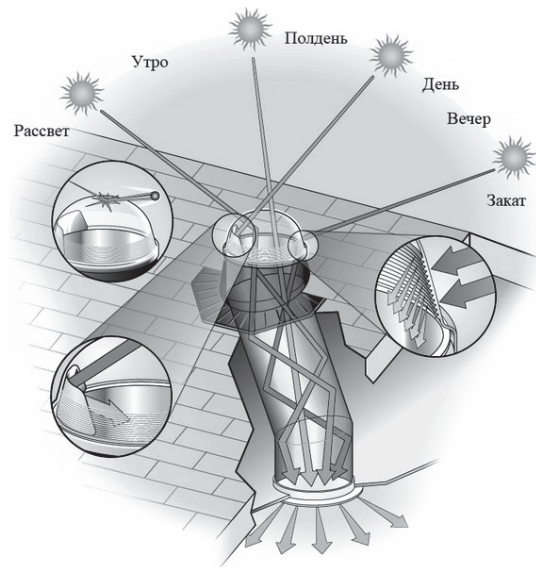


Рис. 4. Принцип работы Solatube Daylighting systems [5]

ПТС позволяют принимать естественный свет на крыше или на стенах здания и проводить его внутрь за счёт коленчатых участков труб, внутренняя поверхность которых покрыта плёнкой с высоким коэффициентом отражения (до 99,7 %). На крыше или стене здания располагается приёмное устройство в виде купола, использующее за основу линзу Френеля, что позволяет направлять диффузный свет неба ближе к оси трубы для уменьшения количества отражений света внутри неё.

Естественный свет имеет следующие положительные качества: сплошной спектр, динамика освещения (день–ночь), соответствующая «биологическим часам» человека, визуальная связь с окружающей средой, благоприятно влияющая на психику человека.

Рассмотрим эффективность использования световодов с позиции энергобаланса и эффективности светопропускания в сравнении с традиционными вертикальными окнами.

Среднее сопротивление теплопередачи световодов (R_0) равно $0,28 \text{ м}^2 \cdot \text{°C/Вт}$ [6], что соответствует значению для деревянного окна с двойным остеклением. Теплотери, согласно (1), для полых трубчатых световодов диаметров 250, 350 и 530 мм составляют 5,2, 10,1 и 23,2 Вт, соответственно.

Общая эффективность светопропускания η_g полого трубчатого световода согласно [7, 8]:

$$\eta_g = \tau_c \tau_d K_m \text{TTE},$$

где τ_c – общий коэффициент пропускания купола ПТС. Для Solatube Daylighting systems $\tau_c=0,92$ [5]; τ_d – коэффициент пропускания диффузора ($\tau_d=0,8$); K_m – коэффициент запаса (учет загрязнения при эксплуатации), $K_m=0,77$ [7]; TTE – эффективность светопропускания световода, которая зависит от коэффициента отражения зеркального покрытия световодной трубы ρ , от отношения длины ПТС L к его диаметру D .

TTE может определяться по упрощенной версии математического уравнения многократных отражений и зависит от коэффициента отражения зеркального покрытия световой трубы (для Solatube Daylighting systems $\rho=0,997$), от отношения длины ПТС L к его диаметру D :

$$\text{TTE} = \frac{e^{\frac{L}{D} \lg \theta \ln \rho}}{\left(1 - \frac{L}{D} \lg \theta \ln \rho\right)^{\frac{1}{2}}},$$

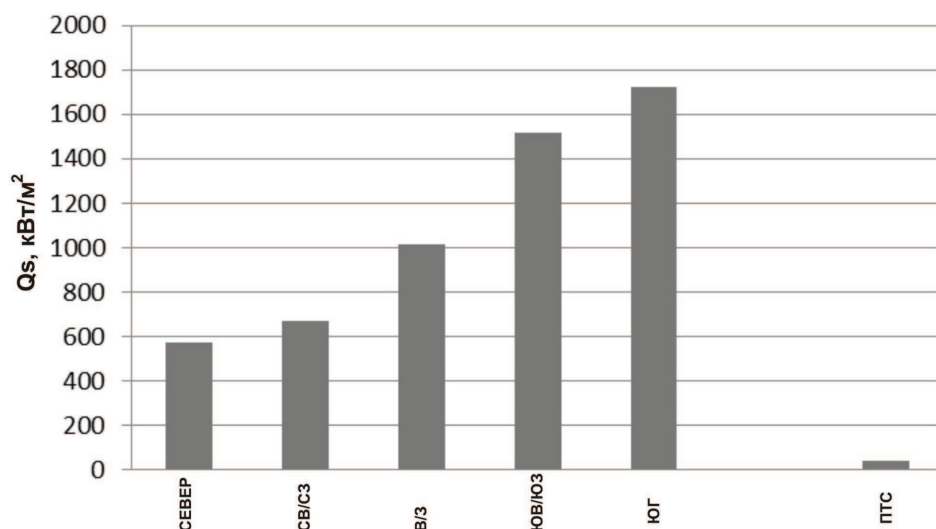


Рис. 5. Сравнение суммарных теплопоступлений от солнечной радиации за отопительный сезон через полый световод и боковой светопроем (при ориентировании его по разным сторонам света)

где θ – угол между осью ПТС и световым лучом ($\theta=30^\circ$).

Так, для полого световода диаметром 530 мм, длиной 2,3 м, имеющего 4 колена, общая эффективность η_g составит 0,56.

Произведем расчет бокового и верхнего освещения на примере помещения площадью 48 м^2 ($6 \times 8 \text{ м}$) и высотой 3 м, используя методику [4, 7].

При боковом освещении нормативное КЕО=0,7 % обеспечивается при площади бокового остекления не менее $9,7 \text{ м}^2$ с размерами окна $5,1 \times 1,9 \text{ м}$, что составляет 54 % от боковой ограждающей конструкции. Теплотери через данный оконный проем за отопительный период для стеклопакетов с $R_0=0,66 \text{ м}^2 \cdot \text{°C/Вт}$ в данном помещении составят 1835,3 кВт·ч.

При верхнем освещении КЕО=0,7 % достигается при 6 световодах $D=530 \text{ мм}$, с общей площадью $1,32 \text{ м}^2$. Теплотери через ПТС за отопительный период составят 802 кВт·ч, что в 2,3 раза ниже в сравнении с оконными проемами при том же количестве естественного освещения.

Поскольку светопрозрачные конструкции являются не только каналом тепловых потерь, но и источником теплопоступлений в помещение от солнечной радиации, при оптимизации системы освещения необходимо учитывать и этот фактор. Величину теплопоступлений можно определить по уравнению из [9, 10]:

$$Q_s = \sum_{j=1}^J \tau_{Fj} k_{Fj} (A_{Fj} Q_{Fj}),$$

где J – ориентация светопрозрачных конструкций помещения по сторонам света; τ_{Fj} – коэффициент учета затенения окна или световода непрозрачными элементами; k_{Fj} – коэффициент проникновения солнечной радиации через элементы окна или ПТС; A_{Fj} – площадь светопрозрачной конструкции; Q_{Fj} – поток суммарной солнечной радиации, проходящей за отопительный период на светопрозрачную поверхность, Вт·ч/м².

На рис. 5 видно, что теплопоступления через ПТС существенно ниже, чем через боковые окна, поскольку полые световоды обладают малой светопрозрачной площадью и малым коэффициентом солнечных теплопоступлений. Можно считать, что общий тепловой баланс помещения не изменяется за счет теплопритока от солнечной радиации через ПТС, что обеспечивает снижение энергозатрат на кондиционирование в летнее время года.

Выводы

Сопоставительные оценки эффективности (с позиции теплового режима и освещенности) боковых оконных проемов и полых трубчатых световодов позволяют сделать вывод о том, что сегодняшние скромные масштабы применения ПТС не соответствуют их потенциальным возможностям. Полые трубчатые световоды позволяют обеспечивать естественным светом при потребном уровне КЕО и равномерности распределения естествен-

ной освещенности даже те помещения, которые не могут освещаться обычными системами естественного света (например, подвалы, центральные помещения широких зданий, находящиеся на нижних этажах и т. п.). В таких помещениях в течение всего года экономится электроэнергия, расходуемая на искусственное освещение. В помещениях, имеющих традиционные светопроемы, скоординированная эксплуатация окон и ПТС в отопительный сезон позволяет экономить энергию на отопление, а в жаркое время года — на вентиляцию и кондиционирование.

Повышение энергоэффективности систем освещения зданий/помещений представляет собой сложную оптимизационную задачу, требующую согласования технических параметров, а так же стоимости устройства и эксплуатации её элементов: окон (фрамуг и др.), ПТС, систем искусственного освещения с учётом географо-климатических условий данной местности и специальных требований заказчика.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Еремкин А.И., Королева Т.И. Тепловой режим зданий. — М.: Изд-во АСВ, 2000. — 368 с.
2. ТСН 23–316–2000 Томской области. Тепловая защита жилых и общественных зданий (Thermal performance in residential and public buildings. Thermal Performance Standard). Введ. 01.01.2001. — М.: Изд-во стандартов, 2000. — 46 с.
3. Строительная теплотехника. СНиП II-3-79. — Взамен главы СНиП II-A.7-71; Введ. 14.03.1979. — М.: Госстрой России, 2001. — 28 с.
4. Архитектурная физика / под ред. Н.В. Оболенского. — М.: Стройиздат, 2001. — 448 с.
5. Саломатин А.В., Казаков Ю.Н. Научное обоснование новых технологий устройства солнечного освещения в зданиях // Строй профиль. — 2011. — № 2/1. — С. 4–5.
6. Harrison S.J., McCurdy G.G., Cooke R. Preliminary Evaluation of the Daylighting and Thermal Performance of Cylindrical Skylights // Proceedings of International Daylight Conference. — Ottawa, Canada, 1998. — P. 205–212.
7. Соловьев А.К. Полые трубчатые световоды: их применение для естественного освещения зданий и экономия энергии // Светотехника. — 2011. — № 5. — С. 41–47.
8. Бракале Дж. Естественное освещение помещений с помощью новой пассивной световодной системы «Solarspot» // Светотехника. — 2005. — № 5. — С. 34–42.
9. Малявина Е.Г. Терлопотери здания: справочное пособие. — М.: АВОК-ПРЕСС, 2007. — 144 с.
10. Зеликов В.В. Справочник инженера по отоплению, вентиляции и кондиционированию. — М.: ИНФА-Инженерия, 2011. — 624 с.

Поступила 24.01.2013 г.