УДК 697.14

А.Ф.СТРОЙ, д-р техн. наук, М.А.ОЛЕНЕЦ
Технологический университет «Свентокшиская политехника», г. Кельце (Польша)

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭКВИВАЛЕНТНОЙ (СОЛНЕЧНОЙ) ТЕМПЕРАТУРЫ ПРИ РАСЧЕТЕ ТЕПЛОПОСТУПЛЕНИЙ ЧЕРЕЗ НЕПРОЗРАЧНЫЕ ОГРАЖДАЮЩИЕ КОНСТРУКЦИИ

Исследуется вопрос определения величины теплового потока, который поступает в помещение от солнца. Критическому анализу подвергается целесообразность использования т.н. эквивалентной (солнечной) температуры при расчете теплопоступлений через непрозрачные ограждающие конструкции разного рода. Детально рассмотрен тепловой баланс поверхности ограждения и приведены рекомендации по использованию в расчетах эквивалентной температуры.

Досліджується питання визначення величини теплового потоку, який надходить в приміщення від сонця. Критичному аналізу піддається доцільність використання т.зв. еквівалентної (сонячної) температури при розрахунку надходження тепла через непрозорі огороджувальні конструкції різного роду. Детально розглянуто тепловий баланс поверхні огородження та наведено рекомендації з використання в розрахунках еквівалентної температури.

The article is about calculation of the heat flux that enters the room from the sun. The expediency of using the so-called equivalent (solar) temperature in the calculations of heat gain through the all kinds of opaque building envelopes was critically reviewed. The heat balance of the walling external surface was considered in detail. The recommendations of using equivalent temperature were also given.

Ключевые слова: эквивалентная (солнечная) температура, коэффициент теплообмена, теплопоступления.

При расчете теплопоступлений через непрозрачные ограждающие конструкции достаточно часто используют понятие эквивалентной температуры. В зарубежной литературе эту температуру называют солнечной [3]. Уравнение теплового баланса для определения эквивалентной температуры имеет вид [4]

$$\alpha_н (t_{экв} - t_{CT}^{н}) = \alpha_н (t_н - t_{CT}^{н}) + \rho \cdot I_c . \qquad (1)$$

Из этого уравнения эквивалентная температура $t_{экв}$ равна

$$t_н^{экв} = t_н + \frac{\rho \cdot I_c}{\alpha_н} . \qquad (2)$$

В уравнениях (1) и (2) ρ – коэффициент поглощения солнечной радиации, I_c – плотность теплового потока, поступающего от солнца, Вт/м^2; $\alpha_н$ – коэффициент теплообмена от наружного воздуха к поверхности ограждения либо от эквивалентной температуры воздуха к поверхности ограждения Вт/м$^{2.0}$С; $t_н$ – температура наружного воздуха,

^{0}С, $t_{CT}^{н}$ – температура наружной поверхности ограждения, ^{0}С.

В уравнении (2) выражение $\rho \cdot I_c / \alpha_н$ представляет собой как бы избыточную разность температур, обусловленную действием солнечной радиации. При составлении уравнения (1) принята упрощающая предпосылка о том, что коэффициент теплообмена $\alpha_н$, который характеризует процесс перехода тепла от воздуха с эквивалентной температурой к наружной поверхности ограждающей конструкции, равен коэффициенту теплообмена при переходе тепла от наружного воздуха к поверхности ограждения. В действительности это не так. Прежде всего, потому, что $(t_{экв} - t_{CT}^{н}) > (t_н - t_{CT}^{н})$, а значит и коэффициенты $\alpha_н$ в правой и левой части уравнения будут разными. Кроме этого уравнение (1) характеризует процесс поступления тепла к наружной поверхности ограждения, когда температура наружного воздуха выше температуры поверхности ограждения, т.е. $t_н > t_{CT}^{н}$.

Чаще всего, при поступлении теплового потока от солнца на наружную поверхность ограждающей конструкции, она нагревается и ее температура выше, чем температура наружного воздуха $t_н < t_{CT}^{н}$. Как определить эквивалентную температуру в этом случае?

При вычислении $t_{экв}$ с помощью формулы (2), плотность теплового потока, поступающего от солнца, и коэффициент поглощения солнечной радиации обычно заданы, а для определения коэффициента теплообмена $\alpha_н$ существуют рекомендации в литературе [1, 2, 5]. При этом значения $\alpha_н$, в зависимости от источника, могут отличаться более чем в два раза.

В то же время, расчет теплопередачи через ограждающую конструкцию с вентилируемой прослойкой показал, что значение $\alpha_н$ существенно сказывается на результатах расчета.

С целью разработки более обоснованных, чем в существующей литературе, рекомендаций для определения коэффициента теплообмена $\alpha_н$ и вывода формулы для вычисления $t_{экв}$ в случае, когда $t_н > t_{CT}^{н}$, рассмотрим процесс теплопередачи через непрозрачную ограждающую конструкцию при поступлении на наружную поверхность ограждения теплового потока от солнца (рисунок).

Тепловой поток от солнца в виде коротковолнового излучения I_c поступает на наружную поверхность ограждения. Часть теплового потока поглощается поверхностью (величина $\rho \cdot I_c$), а часть отражается –

$I_c(1-\rho)$. Поглощенный тепловой поток нагревает поверхность до температуры $t_{CT}^{н}$, которая выше температуры наружного воздуха $t_н$. Нагретая поверхность, в свою очередь, частично отдает тепло к наружному воздуху за счет лучисто-конвективного теплообмена. Другая часть теплового потока поступает в помещение в результате теплопередачи через ограждающую конструкцию. Следовательно, можно записать следующее уравнение

$$\rho \cdot I_c = q_н + q_m \ , \tag{3}$$

где $q_н$ – тепловой поток, который поступает от нагретой наружной поверхности к наружному воздуху $q_н = q_к + q_л$, Вт; q_m – тепловой поток, который поступает в результате теплопередачи от наружной поверхности в помещение, Вт; $q_к$, $q_л$ – конвективный и лучистый тепловой поток у наружной поверхности ограждения, Вт.

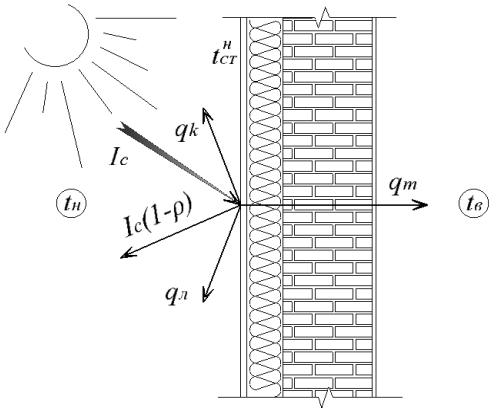

Схема тепловых потоков на наружной поверхности ограждения

Из уравнения (3)

$$q_m = \rho \cdot I_c - q_н \tag{4}$$

или

$$q_m = \rho \cdot I_c - \alpha_н (t_{CT}^{н} - t_н) \, . \tag{5}$$

При стационарном процессе теплопередачи, к примеру, через однослойную ограждающую конструкцию, справедливы также два следующих уравнения:

$$q_m = \frac{\lambda}{\delta}(t_{CT}^{н} - t_{CT}^{в}) \, ; \tag{6}$$

$$q_m = \alpha_в (t_{CT}^в - t_в) . \quad (7)$$

В уравнениях (6) и (7) λ – коэффициент теплопроводности ограждающей конструкции, Вт/м·^{0}С; δ – толщина ограждающей конструкции, м; $\alpha_в$ – коэффициент теплообмена у внутренней поверхности ограждения, Вт/м^2·^{0}С; $t_{CT}^в$ – температура внутренней поверхности ограждения, ^{0}С; $t_в$ – температура воздуха в помещении, ^{0}С.

Запишем уравнение (5) в следующем виде:

$$q_m = \rho \cdot I_c + \alpha_н (t_н - t_{CT}^н) . \quad (8)$$

Из уравнений (6)-(8) определим разность температур и сложим полученные равенства. В результате получим:

$$t_н - t_в = \frac{1}{\alpha_н}(q_m - \rho \cdot I_c) + \frac{\lambda}{\delta} q_m + \frac{1}{\alpha_в} q_m \quad (9)$$

или

$$t_н - t_в = q_m \left[\frac{1}{\alpha_н} + \frac{\lambda}{\delta} + \frac{1}{\alpha_в} \right] - \frac{\rho \cdot I_c}{\alpha_н} . \quad (10)$$

Окончательно имеем:

$$q_m = k(t_н - t_в) + k \frac{\rho \cdot I_c}{\alpha_н} , \quad (11)$$

где k – коэффициент теплопередачи $k = \frac{1}{\alpha_н} + \frac{\lambda}{\delta} + \frac{1}{\alpha_в}$.

На основании уравнения (11) можно сделать вывод о том, что тепловой поток, который будет поступать в помещение в результате действия солнечной радиации, можно представить как сумму двух тепловых потоков. Один тепловой поток – это тот поток, который поступает в помещение от наружного воздуха, в результате процесса теплопередачи через ограждающую конструкцию, а второй – как бы вызван непосредственно действием солнечной радиации.

Второй тепловой поток можно определить по формуле

$$q_c = k \frac{\rho \cdot I_c}{\alpha_н} . \quad (12)$$

Если заменить этот тепловой поток эквивалентным тепловым потоком $q_{экв}$, вызванным повышением температуры по сравнению с температурой наружного воздуха, то при такой замене должно выполняться равенство

$$q_c = q_{экв} \tag{13}$$

$$q_{экв} = \alpha_н^{экв}(t_{экв} - t_н)\,, \tag{14}$$

где $\alpha_н^{экв}$ – эквивалентный коэффициент теплообмена, Вт/м$^{2\cdot 0}$С; $t_{экв}$ – эквивалентная температура, ^{0}С.

При известном тепловом потоке $q_{экв}$ равенство (14) можно обеспечить при любых значениях $\alpha_н^{экв}$. В этом случае, если задаться значением $\alpha_н^{экв}$, то из уравнения (14) нужно определить эквивалентную температуру $t_{экв}$.

Подставим в уравнение (13) значение тепловых потоков из уравнений (12) и (14). В результате получим

$$k\frac{\rho \cdot I_c}{\alpha_н} = \alpha_н^{экв}(t_{экв} - t_н)\ . \tag{15}$$

Из последнего уравнения имеем

$$t_{экв} = t_н + \frac{k}{\alpha_н^{экв}} \cdot \frac{\rho \cdot I_c}{\alpha_н}\,. \tag{16}$$

При анализе уравнения (14) было сказано, что значение $\alpha_н^{экв}$ можно принимать произвольно, а $t_{экв}$ в этом случае следует определять из уравнения (14) либо из уравнения (15). Чтобы упростить формулу (16), примем что $\alpha_н^{экв} = k$, тогда соотношение $k / \alpha_н^{экв} = 1$, а формула (16) будет иметь вид:

$$t_{экв} = t_н + \frac{\rho \cdot I_c}{\alpha_н}\,. \tag{17}$$

Полученное уравнение соответствует уравнению (2). Таким образом, в случае, когда $t_н < t_{CT}^н$, для вычисления эквивалентной температуры также можно воспользоваться уравнением (2). Однако в этом случае коэффициент $\alpha_н$ характеризует процесс теплообмена от наружной поверхности в окружающую среду, а не от воздуха с эквивалентной температурой к наружной поверхности, как предполагает уравнение (1).

Достаточно строго этот коэффициент можно определить только после определения температуры поверхности ограждающей конструкции $t_{CT}^н$, т.е. после составления и решения уравнения теплового баланса для наружной поверхности ограждающей конструкции. После определения

$t_{CT}^{н}$ проще вычислить тепловой поток, который будет поступать в помещение, чем определять коэффициент теплообмена $\alpha_н$ затем $t_{экв}$ и только после этого – тепловой поток.

Если известна эквивалентная температура, то тепловой поток, вызван действием солнечной радиации, равен

$$q_c = q_{экв} = \alpha_н^{экв}(t_{экв} - t_н) = k(t_{экв} - t_н). \quad (18)$$

А суммарный тепловой поток, который будет поступать в помещение

$$q_m = k(t_н - t_в) + k(t_{экв} - t_н) = k(t_{экв} - t_в). \quad (19)$$

Таким образом, для расчета процесса теплопередачи через ограждающую конструкцию с вентилируемой прослойкой более целесообразно использовать не эквивалентную температуру, а метод, предложенный в источнике [6]. Он предполагает, на первом этапе, определить температуру на наружной поверхности ограждения, а затем вычислить тепловые потоки. В то же время, если воспользоваться ориентировочным значением коэффициента теплообмена $\alpha_н$ для вычисления теплопоступлений, как рекомендуют источники [1, 2, 5], то можно получить недостаточно достоверные результаты. Для ограждающих конструкций без вентилируемой прослойки ориентировочно принятое значение $\alpha_н$, как показывают расчеты, не дает существенных погрешностей.

1.Курылев Е.С. Холодильные установки / Е. С. Курылев, Н. А. Герасимов. – Л.: Машиностроение, 1970 – 672 с.

2.СНиП 2.04.05-91*. Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха. – М., 1997. – 89 с.

3.Malicki M. Wentylacja i klimatyzacja / Malicki M. – Warszawa: Wydawnictwo państwowe naukowe, 1974. – 520 s.

4.Maczek K. Uzdatnienie powietrza w inżynierii środowiska dla celów wentylacji i klimatyzacji / Maczek K., Schnotale J., Skrzyniowska D., Sikorska-Bączek R. – Kraków, 2004.

5.СНиП II-3-79**. Строительная теплотехника / Госстрой СССР. – М., 1986. – 30 с.

6.Строй А.Ф. Расчет теплопоступлений от солнца через непрозрачные ограждающие конструкции / А. Ф. Строй, Е. З. Пиотровски // Коммунальное хозяйство городов: Науч.-техн. сб. Вып.90. – К: Техніка, 2009. – С.358-366.

Получено 04.05.2012