

## **Потери тепла зданиями**

В холодное время года нужно отапливать дома, где мы проводим длительное время. Куда девается это тепло? Каковы основные механизмы потерь тепла, действующие в этом случае? Оценим потери тепла, например, школьным зданием, если внутри поддерживается температура  $T_1 = +20^\circ\text{C}$ , а за окнами  $T_2 = -20^\circ\text{C}$ . Учтем только два, как нам кажется, самых сильных механизма тепловых потерь: теплопроводность стен здания и смена воздуха внутри здания за счет обязательной вентиляции и за счет сквозняков. Стены здания школы сделаны из кирпича. Толщина стен  $d = 0.5$  м. Будем считать, что через площадь окон теряется столько же тепла, сколько и через такую же площадь кирпичной стены. Аналогичное предположение сделаем в отношении плоской крыши современного школьного здания. (Потерями через подвал здания давайте пренебрежем.) Размеры здания школы: длина  $A = 100$  м, ширина  $B = 20$  м, высота  $H = 20$  м. Полная площадь  $S$ , через которую тепло поступает наружу равна почти  $7000 \text{ м}^2$ . В справочниках приводятся данные по теплопроводности различных материалов. Так вот для кирпича эта величина равна  $\lambda = 0,7 \text{ Вт/(м град)}$ .

Мощность тепловых потерь оценим с помощью соотношения:

$$W_1 = S\lambda(T_1 - T_2)/d \approx 4 \times 10^5 \text{ Вт.}$$

На каждый квадратный метр площади стены приходится тепловой поток  $\lambda(T_1 - T_2)/d = 57 \text{ Вт/м}^2 \approx 60 \text{ Вт/м}^2$ .

В школьных зданиях по санитарно-гигиеническим нормам воздух должен сменяться минимум 1 раз в час. Это обеспечивается системой вентиляции здания. Общий объем воздуха в школе  $V$  равен примерно  $40000 \text{ м}^3$ . За час в здание поступает  $V = 40000 \text{ м}^3$  холодного воздуха с улицы ( $11 \text{ м}^3/\text{с}$ ). Этот воздух нагревается и вылетает в трубы вентиляции. Нагрев воздуха происходит при постоянном давлении, поэтому мощность тепловых потерь, связанных с вентиляцией равна:

$$W_2 = \rho V/\mu \times (T_1 - T_2)(7/2)R/(t) \approx 5 \times 10^5 \text{ Вт.}$$

Здесь  $R$  – универсальная газовая постоянная,  $\rho$  – плотность воздуха,  $\mu$  – средняя молярная масса газов, входящих в состав воздуха,  $t$  – длительность 1 часа в секундах. Общая мощность тепловых потерь за счет двух рассмотренных механизмов:

$$W_1 + W_2 = 9 \times 10^5 \text{ Вт} \approx 10^6 \text{ Вт.}$$

Если в такой школе учатся 1000 школьников, то на каждого из них приходится по 1000 Вт тепловых потерь. Каждый школьник вырабатывает в среднем около 100 Вт тепловой мощности (наибольшую мощность школьник выделяет, как известно, на переменах), то есть покрывает только 10% от необходимого количества. Остальное обеспечивается

системой отопления здания. Если предположить, что в качестве топлива используется уголь и КПД использования тепловой энергии, выделяющейся при его сгорании 80%, то для поддержания температуры в школьном здании в течение времени занятий (около 7 часов) нужно сжечь примерно 1 тонну каменного угля с теплотой сгорания  $3 \times 10^7$  Дж/кг. А какие тепловые потери обеспечивают сквозняки? Предположим, что входную дверь школы открыли настежь, а на верхнем этаже открыто настежь окно. Площадь двери и площадь окна одинаковы и равны  $2 \text{ м}^2$ . Насколько увеличатся потери тепла зданием школы?

Оценить скорость ветра в дверном проеме можно, воспользовавшись уравнением Бернулли, и зная разность давлений теплого и холодного воздуха. Плотность воздуха имеет величину порядка  $\rho = 1,2 \text{ кг/м}^3$ . За счет разности температур внутри и снаружи создается разность статических давлений:

$$\Delta P \approx \rho g H (T_1 - T_2) / (273^\circ + T_2) \approx 40 \text{ Па.}$$

Это давление разделяется примерно поровну на двух «переходах»: с улицы через входную дверь в школу и из окна на верхнем этаже школы наружу. Разность давлений в 20 Па обеспечивает «заталкивание» холодного воздуха внутрь школьного здания внизу в открытую дверь и такой же перепад давления обеспечивает «выталкивание» теплого воздуха из школьного здания через открытое окно наружу. В соответствии с уравнением Бернулли:

$$\Delta P = \rho v^2 / 2.$$

Отсюда получаем оценку скорости  $v$  поступления холодного ( $-20^\circ\text{C}$ ) воздуха в здание.

$$v \approx 5,7 \text{ м/с.}$$

Значит, каждую секунду в дверь влетает около  $11 \text{ м}^3$  холодного воздуха. Это поток воздуха при нормальной вентиляции здания. Этот воздух нагревается от стен и пр. до  $+20^\circ\text{C}$  и вылетает в окно. Тепловые потери вырастут на  $5 \times 10^5$  Вт! Потери тепла из-за сквозняков сравнимы по величине с потерями через стены за счет теплопроводности и с потерями за счет вентиляции здания! Понятно теперь, почему осенью все окна в школе утепляют, заклеивая все щели?

Мы предположили, что тепловой поток через площадь окна такой же, как и через такую же площадь сплошной стены. На самом деле это, конечно, не так. Поток тепла через окно зависит от конструкции окна. На севере, например, в современных домах и школах используют «тройное» остекление, которое «теплее», чем двойное.

В «обычном» школьном окне между двумя стеклами, находящимися при разной температуре, находится воздух. За счет механизма конвекции этот воздух передает энергию от теплого внутреннего стекла к холодному внешнему стеклу. При таком морозе

(-20°C) на внутренних стеклах возникают морозные узоры. Это означает, что внутреннее стекло имеет температуру поверхности, обращенной к комнате, ниже 0°C. Вторая поверхность этого же стекла имеет еще более низкую температуру. Примем в качестве оценки этой температуры величину -10°C.

Если высота окна порядка 1 м, а разность температур наружного и внутреннего стекла порядка 10°C, то разность давлений, которая обеспечивает конвекцию воздуха между стеклами, в 80 раз меньше величины 40 Па (поскольку высота окна в 20 раз меньше высоты здания и разность температур в 4 раза меньше). Из того же уравнения Бернулли оцениваем скорость движения воздуха в оконном промежутке между двумя стеклами.

$$\Delta P = 0,5 \text{ Па} = \rho v^2 / 2.$$

Скорость  $v$  равна по порядку величины 1 м/с. Будем считать, что с такой скоростью движется слой воздуха  $d = 1$  см, прилегающий к стеклам, толщиной примерно в 1/10 от толщины воздушного промежутка между стеклами. Тогда каждый квадратный метр окна обеспечивает передачу тепловой мощности примерно:

$$d(1\text{м})v\rho/\mu \times (\Delta T)(7/2)R = 116 \text{ Вт/м}^2 \approx 120 \text{ Вт/м}^2.$$

Мы получили, что поток тепла через площадь окна примерно вдвое больше, чем поток через такую же площадь сплошной стены здания. Действительно, чем больше площадь окон, тем холоднее в классе. Площадь окон составляет примерно 20% общей площади наружных стен школьного здания, следовательно, тепловые потери через стены будут больше сделанной нами раньше оценки ( $W_1$ ) примерно на 20%, но порядок величины, тем не менее, сохранится.

С. Варламов