

# 2. Теплотехника<sup>1</sup>

## 2.1. Общие положения

1 января 2003 года в Латвии вступил в силу строительный норматив LBN 002-01 «Теплотехника ограждающих конструкций зданий» [4], который согласует предъявляемые в Латвии к ограждающим конструкциям зданий теплотехнические требования с требованиями ЕС. В этом строительном нормативе главным теплотехническим показателем зданий является расчетный коэффициент потери тепла ( $H_T$ , Вт/К), указывающий потери энергии в ваттах через ограждающие конструкции зданий, если перепад температуры на противоположных поверхностях конструкций составляет один градус. Расчетный коэффициент потери тепла зданием  $H_T$  не должен превышать нормативный коэффициент потери тепла ( $H_{TR}$ ). Чтобы рассчитать  $H_T$ , прежде всего, необходимо рассчитать коэффициенты термического сопротивления ограждающих конструкций здания или коэффициенты теплопередачи  $U$ .

В ограждающих конструкциях зданий поток тепла обычно рассчитывают для стационарного случая (независимо от погоды). Коэффициент теплопередачи  $U$  показывает, какое количество тепла за единицу времени рассеивается через площадь в один квадратный метр конструкции, если перепад температуры между противоположными сторонами ограждающей конструкции равен одному градусу.

В соответствии со стандартом LVS EN ISO 6946 [1] коэффициент теплопередачи  $U$  для плоских конструкций рассчитывают по формуле, которая включает и теплоизоляцию конструкции:

$$U = \frac{1}{R_i + R_e + \sum_{i=1}^N \frac{d_i}{\lambda_i}} \quad (2.1)$$

где  $U$  – коэффициент теплопередачи, Вт/(м<sup>2</sup>·К);

$R_i$  – сопротивление теплопередаче внутренней поверхности ограждающей конструкции, м<sup>2</sup>·К/Вт;

$R_e$  – сопротивление теплопередаче наружной поверхности ограждающей конструкции, м<sup>2</sup>·К/Вт;

$d_i$  – толщина  $i$ -го слоя конструкции, м;

$\lambda_i$  – коэффициент теплопроводности  $i$ -го слоя конструкции, Вт/(м·К);

$N$  – число слоев в конструкции.

В стандарте LVS EN ISO 6946 для сопротивлений теплопередачи  $R_i$  и  $R_e$  установлены следующие значения:

для потока тепла вверх  $R_i = 0,10$  м<sup>2</sup>·К/Вт;

для горизонтального потока тепла  $R_i = 0,13$  м<sup>2</sup>·К/Вт;

для потока тепла вниз  $R_i = 0,17$  м<sup>2</sup>·К/Вт;

$R_e = 0,04$  м<sup>2</sup>·К/Вт.

Тогда потери тепла через 1 м<sup>2</sup> поверхности ограждающей конструкции здания можно рассчитать по формуле:

$$Q = U(T_i - T_e) \quad (2.2)$$

где  $Q$  – потери тепла, Вт/м<sup>2</sup>;

$T_i$  – температура воздуха внутри помещения, °С;

$T_e$  – средняя температура воздуха снаружи в отопительный сезон, которую регламентирует строительный норматив LBN 003-01 [5], °С.

В строительном нормативе LBN 002-01 [4] предусмотрены определенные требования для значения коэффициента теплопередачи ограждающих конструкций зданий. В соответствии с [4] они должны соответствовать нормативам  $U_{RN}$ , а если это невозможно, то они не должны превышать максимальные значения  $U_{RM}$ .

<sup>1</sup> - Требования и расчеты, аналогичные представленным в разделе, должны соответствовать нормативным документам конкретной страны.

Нормативные  $U_{RN}$  и максимальные  $U_{RM}$  значения рассчитывают по следующей методике. По формуле:

$$k = \frac{19}{T_i - T_e} \quad (2.3)$$

где  $T_i$  – расчетная температура воздуха в помещении, °C, [LBN 211-98];

$T_e$  – средняя температура воздуха вне помещения во время отопительного сезона, °C, [5],

рассчитывают температурный коэффициент  $k$ , на который умножают значения коэффициента теплопередачи, указанные в таблице 2.1.

Таблица 2.1

**Нормативные ( $U_{RN}$ ) и максимальные ( $U_{RM}$ ) значения коэффициентов теплопередачи и значения коэффициента  $\Psi_R$**

Строительный элемент	$U_{RN}$ , Вт/(м <sup>2</sup> ·К)			$U_{RM}$ , Вт/(м <sup>2</sup> ·К)		
	Жилые дома	Общественные здания	Производственные здания	Жилые дома	Общественные здания	Производственные здания
Крыши и перекрытия, контактирующие с наружным воздухом	0,20 k	0,25 k	0,35 k	0,25 k	0,35 k	0,50 k
Пол на грунте	0,25 k	0,35 k	0,50 k	0,35 k	0,50 k	0,70 k
Стены с массой 100 кг/м <sup>2</sup> и больше	0,30 k	0,40 k	0,50 k	0,40 k	0,50 k	0,60 k
Стены с массой менее 100 кг/м <sup>2</sup>	0,25 k	0,35 k	0,45 k	0,30 k	0,40 k	0,50 k
Термические мостики $\Psi_R$	0,20 k	0,25 k	0,35 k	0,25 k	0,35 k	0,50 k

## 2.2. Определение теплопроводности пенополистирола

Коэффициент теплопередачи  $U$  для плоских конструкций рассчитывают по формуле (2.1). Для его определения необходимо знать соответствующие коэффициенты теплопроводности слоев строительных конструкций и толщины слоев.

В общем случае теплопроводность теплоизоляционных материалов зависит от температуры и содержания влаги в них.

В стандарте [6] эта зависимость приведена следующим образом:

$$\lambda = \lambda_{10} \cdot F_T \cdot F_m \quad (2.4)$$

где  $\lambda_{10}$  – коэффициент теплопроводности изоляции при 10 °C;

$F_T$  – термический поправочный множитель коэффициента теплопроводности;

$F_m$  – влажностный поправочный множитель коэффициента теплопроводности.

Эти множители рассчитывают по формулам:

$$F_T = e^{f_t \cdot (T_2 - T_1)} \quad (2.5a)$$

$$F_m = e^{f_\omega \cdot (\omega_2 - \omega_1)} \quad (2.5b)$$

где  $f_t$ ,  $f_\omega$  – расчетные коэффициенты температуры и влажности, К<sup>-1</sup>; м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>;

$T_1$ ,  $T_2$ ,  $\omega_1$ ,  $\omega_2$  – предельные значения температуры и влажности, °C; м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>.

Для диапазона температур от 0 до +30°C расчетные коэффициенты температуры и влажности пенополистирола указаны в таблице стандарта [6]. Если температура не находится в этом диапазоне, то для точного определения теплопроводности пенополистирола необходимо выполнить прямые измерения.

Если в формулах (2.5а, 2.5b) показатели степени экспоненты небольшие ( $\ll 1$ ), преобразуя уравнения (2.5а и 2.5b) в ряд и с учетом формулы (2.4) можно получить приблизительное выражение:

$$\lambda = \lambda_{10} + \Delta\lambda_T + \Delta\lambda_m \quad (2.6)$$

где  $\Delta\lambda_T$  – термическая поправка теплопроводности,  $\Delta\lambda_T = \lambda_{10} \cdot f_t \cdot (T_2 - T_1)$ , Вт/(м·К);

$\Delta\lambda_m$  – влажностная поправка теплопроводности,  $\Delta\lambda_m = \lambda_{10} \cdot f_w \cdot (\omega_2 - \omega_1)$ , Вт/(м·К).

Коэффициенты теплопроводности для сухого слоя пенополистирола при 10°C можно рассчитать по европейскому стандарту [2] в соответствии с формулой:

$$\lambda_{10} = 0,027174 + 5,1743 \cdot 10^{-5} \cdot \rho + 0,173606 \cdot \frac{1}{\rho} \quad (2.7)$$

где  $\rho$  – плотность пенополистирола, кг/м<sup>3</sup>.

В таблице 2.2 указана теплопроводность сухого пенополистирола Вт/(м·К), рассчитанная в соответствии с формулой (2.7), с соблюдением коррекции при малых толщинах слоя, если  $\lambda > 0,038$  Вт/(м·К) [2]. Как видно из таблицы 2.2, теплопроводность пенополистирола, в зависимости от толщины, необходимо корректировать, только если  $\rho < 25$  кг/м<sup>3</sup> и толщина слоев меньше 0,10 м.

Таблица 2.2

Теплопроводность пенополистирола при 10 °С, Вт/(м·К)

Толщина, м	Марка пенополистирола; плотность, кг/м <sup>3</sup>			
	EPS 60; 15	EPS 100; 20	EPS 150; 25	EPS 200; 30
0,05	0,0407	0,0373	0,0354	0,0345
0,10	0,0395	0,0369	0,0354	0,0345
0,15	0,0395	0,0369	0,0354	0,0345
0,20	0,0395	0,0369	0,0354	0,0345

Так как теплопроводность пенополистирола зависит от температуры и содержания влаги, необходимо рассчитать соответствующие корректировки по формуле (2.6).

Значение расчетного коэффициента температурной поправки в соответствии с толщиной слоя изоляции [6] от 50 до 200 мм и значений  $\lambda_{10}$  от 0,035 до 0,040 Вт/(м·К) меняется в пределах 0,0033-0,0036 К<sup>-1</sup>. Для расчетов можно использовать среднее значение  $f_T = 0,0035$  К<sup>-1</sup>. Необходимо учесть, что данное значение в стандарте [6] гарантируется до температуры 30°C. Если экспериментальных измерений нет, то приблизительно используем это же значение.

В качестве рабочей температуры теплоизоляционного материала можно принять среднюю температуру соответствующего слоя

$$T = 0,5 \cdot (T_1 + T_2) \quad (2.8)$$



where  $T_1, T_2$  – температура на границах слоя, °C.

Коэффициент влажностной поправки для расчета влажностной поправки коэффициента теплопроводности  $f_w = 4 \text{ м}^3/\text{м}^3$  [6].

### 2.3. Прогноз выпадения конденсата

В пункте 25 Латвийского строительного норматива LBN 002-01 [4] сказано: **«В строительном элементе, который не состоит из однородного материала, необходимо обеспечить, чтобы общий эквивалент сопротивления слоев воздушной диффузии паров воды, находящихся в теплой стороне его теплоизоляционного материала,  $s_d$  был по крайней мере в пять раз больше общего эквивалента сопротивления материалов воздушной диффузии паров воды, прилегающих к холодной стороне теплоизоляции  $s_d''$ ».**

В свою очередь, в пункте 31 сказано: **«Отступления от требований пункта 25 этого строительного норматива должны быть обоснованы расчетом, гарантирующим, что годовое накопление конденсата не будет иметь положительного баланса и не повредит конструкции. Появление конденсата в деревянных строительных элементах недопустимо».**

Расчет конденсата основан на решении уравнения диффузии. Диффузию влаги в общем случае описывает нестационарное уравнение диффузии<sup>1)</sup>. Методика расчетов приведена в стандарте LVS EN ISO 13788. Плотность потока водяного пара рассчитывают по формуле:

$$g = \delta_0 \frac{p_i - p_e}{s_d} \quad (2.9)$$

где  $g$  – диффузионный поток влаги,  $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ ;

$\delta_0$  – коэффициент,  $2 \cdot 10^{-10} \text{ кг}/(\text{м} \cdot \text{с} \cdot \text{Па}) = 2 \cdot 10^{-10} \text{ с}$ ;

$p_i$  – давление ненасыщенного пара внутри здания, Па;

$p_e$  – давление ненасыщенного пара снаружи здания, Па;

$s_d$  – эквивалент диффузии водяного пара, м.

Для многослойных строительных элементов эквивалент диффузии водяного пара рассчитывают по формуле:

$$s_d = \sum_{j=1}^N d_j \mu_j \quad (2.10)$$

где  $d_j$  – толщина  $j$ -го слоя строительного элемента, м;

$\mu_j$  – фактор сопротивления паропрооницанию  $j$ -го слоя строительного элемента.

Отображая графически давление ненасыщенного водяного пара в зависимости от эквивалента диффузии водяного пара  $p=f(s_d)$ , получают прямые. Отображая в этих же координатах и зависимость давления насыщенного водяного пара от  $s_d$  при соответствующей температуре, можно выполнить анализ выделения влаги в ограждающих конструкциях зданий. Если обе линии не пересекаются, то конденсат не выделяется (рис. 2.1).

Если обе кривые пересекаются (рис. 2.2; прерывистая и точечная линия), в ограждающих конструкциях зданий наблюдается выделение конденсата. Так как большее давление паров воды, чем давление насыщенного пара невозможно, на кривой ненасыщенного пара (непрерывная линия) образуется излом у той поверхности, на которой выделяется конденсат (выделение конденсата только на одной пограничной поверхности).

Диффузионный поток влаги направлен из внутреннего пространства к месту образования конденсата. Его величина рассчитывается по формуле:

$$g_i = \delta_0 \frac{p_i - p_c}{s_{d i}} \quad (2.11)$$

<sup>1)</sup> Более подробное теоретическое рассмотрение приведено в литературе [9].

где  $g_i$  – поток влаги из помещения к месту конденсации, кг/(м<sup>2</sup>·с);  
 $p_i$  – давление ненасыщенного пара в помещении, Па;  
 $p_c$  – давление насыщенного пара на поверхность конденсации, Па;  
 $s_{d i}$  – эквивалент диффузии паров воды (внутреннее пространство : поверхность конденсации), м.

Дальше диффузионный поток влаги продолжает движение от места конденсации наружу. Его величину рассчитывают по формуле:

$$g_e = \delta_0 \frac{p_c - p_e}{s_{d e}} \quad (2.12)$$

где  $g_e$  – поток влаги от места конденсации наружу, кг/(м<sup>2</sup>·с);  
 $p_e$  – давление ненасыщенного пара снаружи, Па;  
 $p_c$  – давление насыщенного пара на поверхность конденсации, Па;  
 $s_{d e}$  – эквивалент диффузии водяного пара (поверхность конденсации : наружная часть), м.

Скорость накопления конденсата  $g_c$ , кг/(м<sup>2</sup>·с):

$$g_c = g_i - g_e = \delta_0 \left( \frac{p_i - p_c}{s_{d i}} - \frac{p_c - p_e}{s_{d e}} \right) \quad (2.13)$$

Общее количество накопившегося конденсата  $M_a$  в соответствии со стандартом [3] рассчитывают, умножая скорость накопления конденсата каждого месяца на продолжительность каждого месяца и суммируя полученные количества конденсата:

$$M_a = g_c \cdot t_m \quad (2.14)$$

где  $M_a$  – количество конденсата, накопившегося за месяц, кг/м<sup>2</sup>;  
 $t_m$  – продолжительность месяца, с.

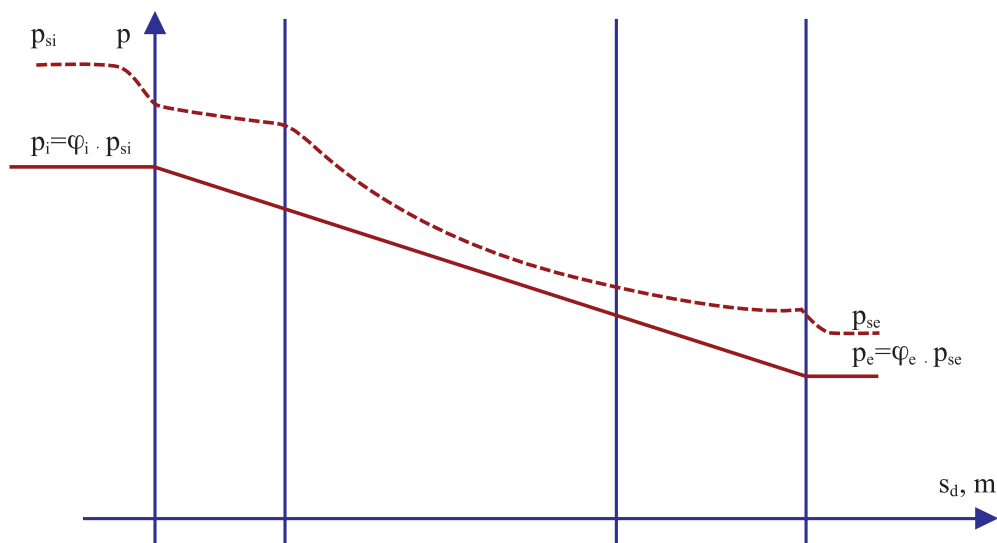


Рис. 2.1. Схематическая зависимость давления насыщенного (прерывистая линия) и ненасыщенного (непрерывная линия) водяного пара от эквивалента диффузии водяного пара  $s_d$  ( $p_{si}$ ,  $p_{se}$  – давление насыщенного водяного пара в помещении и снаружи;  $p_i$ ,  $p_e$  – давление ненасыщенного пара в помещении и снаружи;  $\varphi_i$ ,  $\varphi_e$  – относительная влажность воздуха в помещении и снаружи)

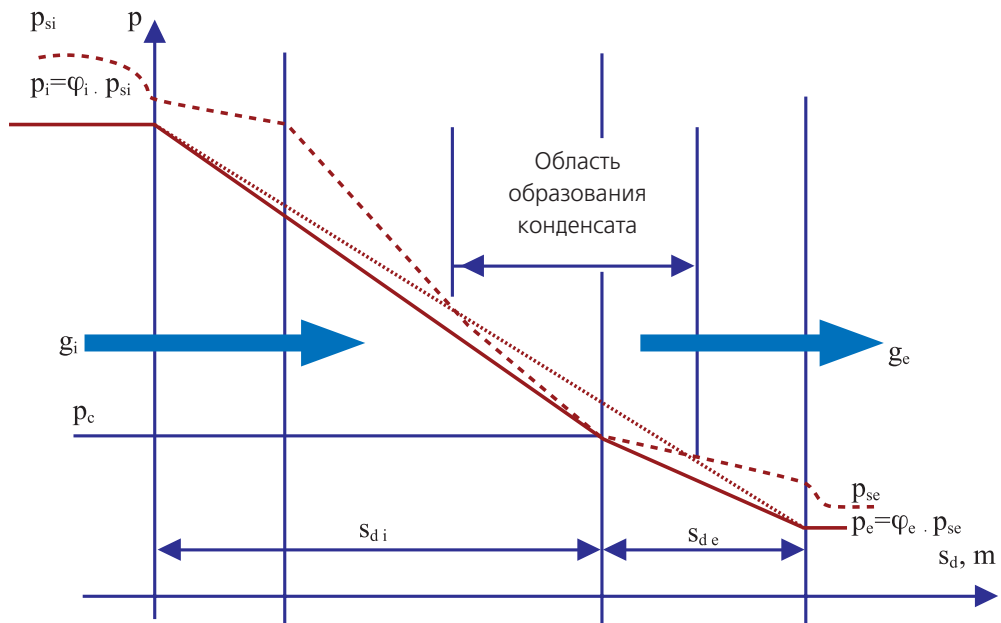


Рис. 2.2. Схематическая зависимость давления насыщенного (прерывистая линия) и ненасыщенного (непрерывная линия) водяного пара от эквивалента диффузии водяного пара  $s_d$ . Штрихпунктирная линия показывает, что происходит образование конденсата ( $p_{si}$ ,  $p_{se}$  – давление насыщенного водяного пара в помещении и снаружи;  $p_i$ ,  $p_e$  – давление ненасыщенного водяного пара в помещении и снаружи;  $\varphi_i$ ,  $\varphi_e$  – относительная влажность воздуха в помещении и снаружи;  $p_c$  – давление насыщенного пара конденсата воды;  $s_{di}$ ,  $s_{de}$  – соответственно эквивалент диффузии водяного пара между местом образования конденсата и внутренней или наружной стороной;  $g_i$ ,  $g_e$  – потоки диффузии паров воды)

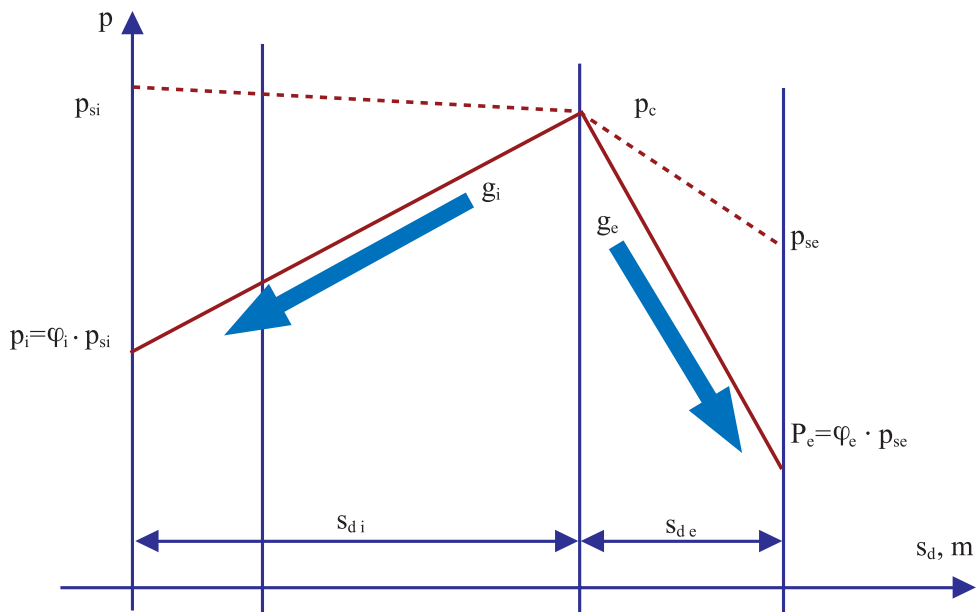


Рис. 2.3. Схематическая зависимость давления насыщенного (прерывистая линия) и ненасыщенного (непрерывная линия) водяного пара от эквивалента диффузии водяного пара  $s_d$  ( $p_{se}$ ,  $p_{se}$  – давление насыщенного водяного пара в помещении и снаружи;  $p_i$ ,  $p_e$  – давление ненасыщенного водяного пара в помещении и снаружи;  $\varphi_i$ ,  $\varphi_e$  – относительная влажность воздуха в помещении и снаружи;  $p_c$  – давление насыщенного пара конденсата воды;  $s_{di}$ ,  $s_{de}$  – соответственно эквивалент диффузии водяного пара между местом образования конденсата и внутренней или наружной стороной;  $g_i$ ,  $g_e$  – соответственно потоки влаги от места образования конденсата внутрь или наружу)

### 2.3.1. Высыхание конденсата в стенах зданий

Методику расчета высыхания конденсата в летний период определяет стандарт [3]. Из области образования конденсата влага диффундирует к внутренней (поток  $g_i$ ) и наружной (поток  $g_e$ ) поверхности стены здания (рис. 2.3).

Графически представляя давление ненасыщенных паров воды зависимостью от эквивалента диффузии водяного пара  $p=f(s_d)$ , получаем ломанную линию (рис. 2.3; непрерывная линия). Отобразив в этих же координатах и зависимость давления насыщенного водяного пара от  $s_d$  (прерывистая линия), можно выполнить анализ высыхания конденсата в стенах зданий. От поверхности, на которой во время выделения конденсата собирается влага, она в период высыхания перемещается к поверхностям стен зданий. Потоки влаги  $g_i$  и  $g_e$  рассчитывают по формулам (2.11, 2.12;  $g_i$  здесь принимает положительное значение). В общем количестве (балансе) конденсата количество высыхающей влаги суммируется с отрицательным значением. Если общий годовой баланс конденсата не положителен, то конденсат в летний период высыхает.

### 2.3.2. Высыхание конструкций крыши

При высыхании кровельных конструкций, в которых нет вентиляционной воздушной прослойки, как правило образуется ситуация, при которой влага изначально диффундирует к другому месту в конструкции, где она снова конденсируется. Только после повторной (или многократной) конденсации начинается сам процесс высыхания, который схематично представлен на рисунке 2.4.

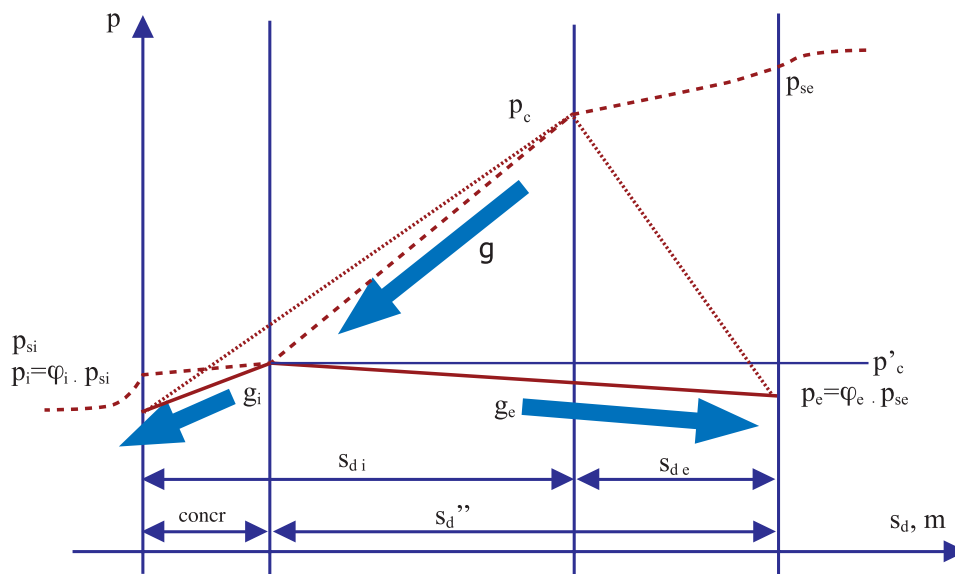


Рис. 2.4. Схематическая зависимость давления насыщенного (прерывистая линия) и ненасыщенного (непрерывная линия) водяного пара от эквивалента диффузии водяного пара  $s_d$  ( $p_{si}$ ,  $p_{se}$  – давление насыщенного водяного пара в помещении и снаружи;  $p_i$ ,  $p_e$  – давление ненасыщенного пара в помещении и снаружи;  $\varphi_i$ ,  $\varphi_e$  – относительная влажность воздуха в помещении и снаружи;  $p_c$ ,  $p'_c$  – соответственно давление конденсата и насыщенного водяного пара нового конденсата;  $s_{di}$ ,  $s_{de}$  – соответственно эквивалент диффузии водяного пара между местом образования конденсата и внутренней или наружной стороной;  $s'_d$ ,  $s''_d$  – соответственно эквивалент диффузии водяного пара между местом образования нового конденсата и внутренней или наружной стороной;  $g$  – поток влаги к новому месту конденсации;  $g_i$ ,  $g_e$  – соответственно потоки влаги от нового места образования конденсата внутрь или наружу)

Высыхание с дополнительной конденсацией возникает, если линия насыщенного пара (прерывистая линия) находится ниже линии ненасыщенного пара (пунктирная линия). В этом случае влага сначала будет диффундировать к этой новой поверхности конденсации (поток  $g$ ), и только затем наружу из конструкции. Такой механизм диффузии называют высыханием с препятствием. После диффузии влаги процесс высыхания происходит уже значительно медленнее, так

как давление насыщенных паров конденсата уменьшилось с  $p_c$  до  $p'_c$ . Потоки в направлении внутрь конструкции и наружу можно рассчитать по формулам (2.11, 2.12), применяя их к новым местам образования конденсата в строительной конструкции:

$$g_i = \delta_0 \frac{p'_c - p_i}{s_d'} \quad (2.15)$$

где  $g_i$  – поток влаги от места конденсации внутрь помещения, кг/(м<sup>2</sup>·с);

$p_i$  – давление ненасыщенного пара в помещении, Па;

$p'_c$  – давление насыщенного пара на поверхности конденсации, Па;

$s_d'$  – эквивалент диффузии водяного пара (внутреннее пространство : поверхность конденсации), м.

Второй диффузионный поток влаги – от места конденсации наружу – рассчитывается по формуле:

$$g_e = \delta_0 \frac{p'_c - p_e}{s_d''} \quad (2.16)$$

где  $g_e$  – поток влаги от места конденсации наружу, кг/(м<sup>2</sup>·с);

$p_e$  – давление ненасыщенного пара снаружи, Па;

$p'_c$  – давление насыщенного пара на поверхности конденсации, Па;

$s_d''$  – эквивалент диффузии водяного пара (поверхность конденсации : наружная часть), м.

Количество конденсата в месяц рассчитывают, умножая продолжительность месяца в секундах на сумму потоков (2.15) и (2.16). Общий годовой баланс конденсата равен сумме всех количеств конденсата за 12 месяцев, в которую включают высохший конденсат с отрицательным значением.

Если годовой баланс конденсата не положительный, то конструкция в летний период высыхает.

## 2.4. Пример расчета системы несъемной опалубки Dobeles panelis

Предположим, что при помощи системы несъемной опалубки Dobeles panelis создана строительная конструкция наружной стены, состоящая из следующих слоев (считая с внутренней стороны; таблица 2.3), где для теплоизоляции теплопроводность приведена в соответствии с таблицей 2.2<sup>2</sup>. Значения, выделенные в таблице 2.3 цветом, в дальнейшем будут использоваться в таблицах 2.7 и 2.8.

Таблица 2.3

**Конструкция наружной стены системы несъемной опалубки Dobeles panelis**

№	Слой	Толщина, м	Теплопроводность, Вт/(м·К)	Фактор сопротивления паропрооницанию
1.	Гипсокартон	0,013	0,25	10
2.	Воздушная прослойка <sup>3</sup>	0,002	0,036	1
3.	EPS 200	0,05	0,0345	60
4.	Железобетон	0,15	2	100
5.	EPS 200	0,05	0,0345	60
6.	Наружная отделка	0,015	0,87	15

<sup>2</sup>) Для анализа выбран самый плохой возможный случай – плоский наружный слой теплоизоляции (0,05 м).

<sup>3</sup>) В соответствии со стандартом [1] невентилируемые или слабевентилируемые воздушные прослойки создают дополнительное тепловое сопротивление.

Температура послойно в этой строительной конструкции в климатических условиях Риги в январе, при температура внутри помещения 20 °С, показана на рисунке 2.5.

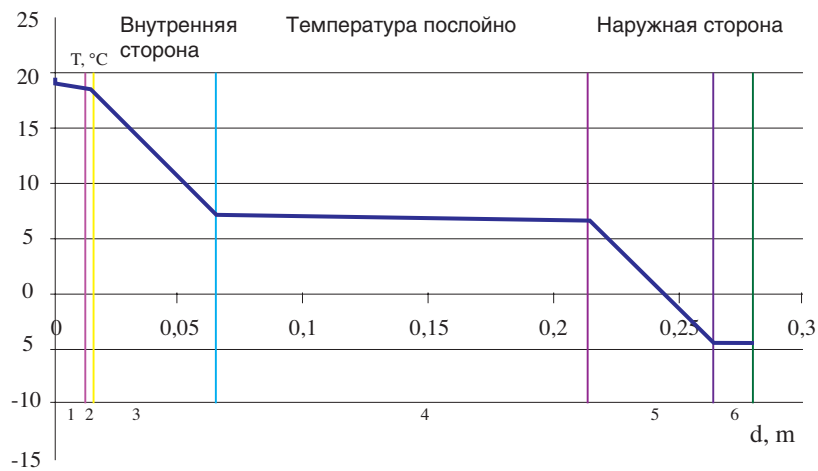


Рис. 2.5. Температура послойно в строительной конструкции в климатических условиях Риги в январе в соответствии с таблицей 2.3, отсчёт с внутренней стороны. Температура внутри помещения 20°С; нумерация слоев (1-6) соответствует таблице 2.3

Как видно из рисунка 2.5, рабочая температура внутреннего слоя пенополистирола (3) конструкции в среднем составляет 12,7°С. Таким образом, это дает слою (3) приращение теплопроводности (пояснение к формуле 2.6.):

$$\Delta\lambda_T = \lambda_{10} \cdot f_t \cdot (T_2 - T_1) = 0,0345 + 0,0035 \cdot (12,7 - 10) = 0,000326 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}.$$

Для слоя (5) рабочая температура равна 1,2°С, что, соответственно, дает отрицательное приращение теплопроводности: -0,0010 Вт/(м·К).

Коэффициент теплопередачи U для этой конструкции, рассчитанный по формуле (2.1), и теплопередаче слоев (3) и (5) 10°С, составляет 0,306 Вт/(м²·К). При перерасчёте его, учитывая температурную коррекцию теплопроводности, получаем 0,303 Вт/(м²·К). Коррекция коэффициента теплопередачи отрицательная: -0,003 Вт/(м²·К).

Чтобы в ограждающей конструкции здания в соответствии со стандартом [3] можно было прогнозировать риск образования конденсата, необходимо знать влажностные условия эксплуатации здания. Стандартом [3] предусмотрены пять классов эксплуатационной влажности зданий, краткое описание которых дано в таблице 2.4.

Классы эксплуатационной влажности зданий в соответствии со стандартом [3]

Классы эксплуатационной влажности зданий	Описание
1.	Складские помещения (низкий уровень влажности)
2.	Офисы, магазины
3.	Здания с низким уровнем заселения. Одноэтажные жилые дома
4.	Здания с высоким уровнем заселения. Многоэтажные жилые дома, спортзалы, кухни, столовые
5.	Специальные влажные здания: прачечные, пивоварни, плавательные бассейны и т. д.

Расчет образования конденсата для конструкции, данной в таблице 2.3, в январе в климатических условиях Риги для здания 4-го класса эксплуатационной влажности показан на рисунке 2.6.

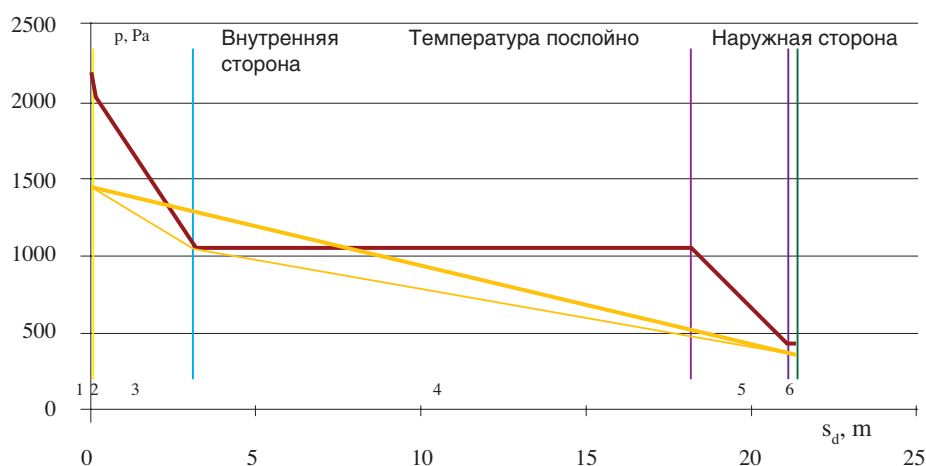


Рис. 2.6. Влажность в строительной конструкции в климатических условиях Риги в январе по слоям в соответствии с таблицей 2.3, отсчёт с внутренней стороны. Температура внутри помещения 20°C; нумерация слоев (1-6) соответствует таблице 2.3 (желтая ломаная линия – давление ненасыщенного пара; красная линия – давление насыщенного пара)

Как следует из рисунка 2.6, в конструкции образуется конденсат, абсолютная величина которого, рассчитанная в соответствии со стандартом [3], составляет 0,217 кг/м<sup>2</sup>. В летний период конденсат высыхает. Таким образом, слой (3) в зимний период подвержен воздействию влаги. Рассчитаем для этого слоя влажностную поправку теплопроводности (пояснение к формуле 2.6.):

$$\Delta\lambda_m = \lambda_{10} \cdot f_w \cdot (\omega_2 - \omega_1) = 0,0345 \cdot 4 \cdot 0,217 \cdot 10^{-3} / 0,05 = 0,0006 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$$

Здесь влага  $\omega$  должна быть пересчитана м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup> (объем одного квадратного метра слоя (3) равен 0,05 м<sup>3</sup>; конденсат занимает 0,217·10<sup>-3</sup> м<sup>3</sup>). При перерасчёте коэффициента теплопередачи  $U$ , с учетом влажностной коррекции теплопроводности, получаем 0,3062 Вт/(м<sup>2</sup>·К). Коррекция положительная : 0,0002 Вт/(м<sup>2</sup>·К).

Температурная и влажностная коррекция коэффициента теплопередачи с противоположным знаком и их абсолютные значения относительно небольшие: -0,003 и 0,0002 Вт/(м<sup>2</sup>·К). Поэтому эти коррекции в дальнейшем расчете системы Dobeles panelis можно не учитывать.

Если увеличивают толщину наружного слоя теплоизоляции до 0,1 м, то абсолютное количество конденсата, в зданиях 4-го класса эксплуатационной влажности в слое (3), уменьшится до 0,002 кг/м<sup>2</sup>. Поэтому использовать конструкцию, для которой наружный слой теплоизоляции составляет 0,05 м, не рекомендуется. В зданиях 3-го класса эксплуатационной влажности конденсат не образуется.

На рисунках 2.7 и 2.8 показана температура послойно и давление водяного пара соответственно в ограждающих конструкциях зданий 4 и 3 класса эксплуатационной влажности, которые даны в таблице 2.3, если наружный слой теплоизоляции (5) равен 0,1 м. Метеорологические условия соответствуют климатическим условиям Риги в январе [5].

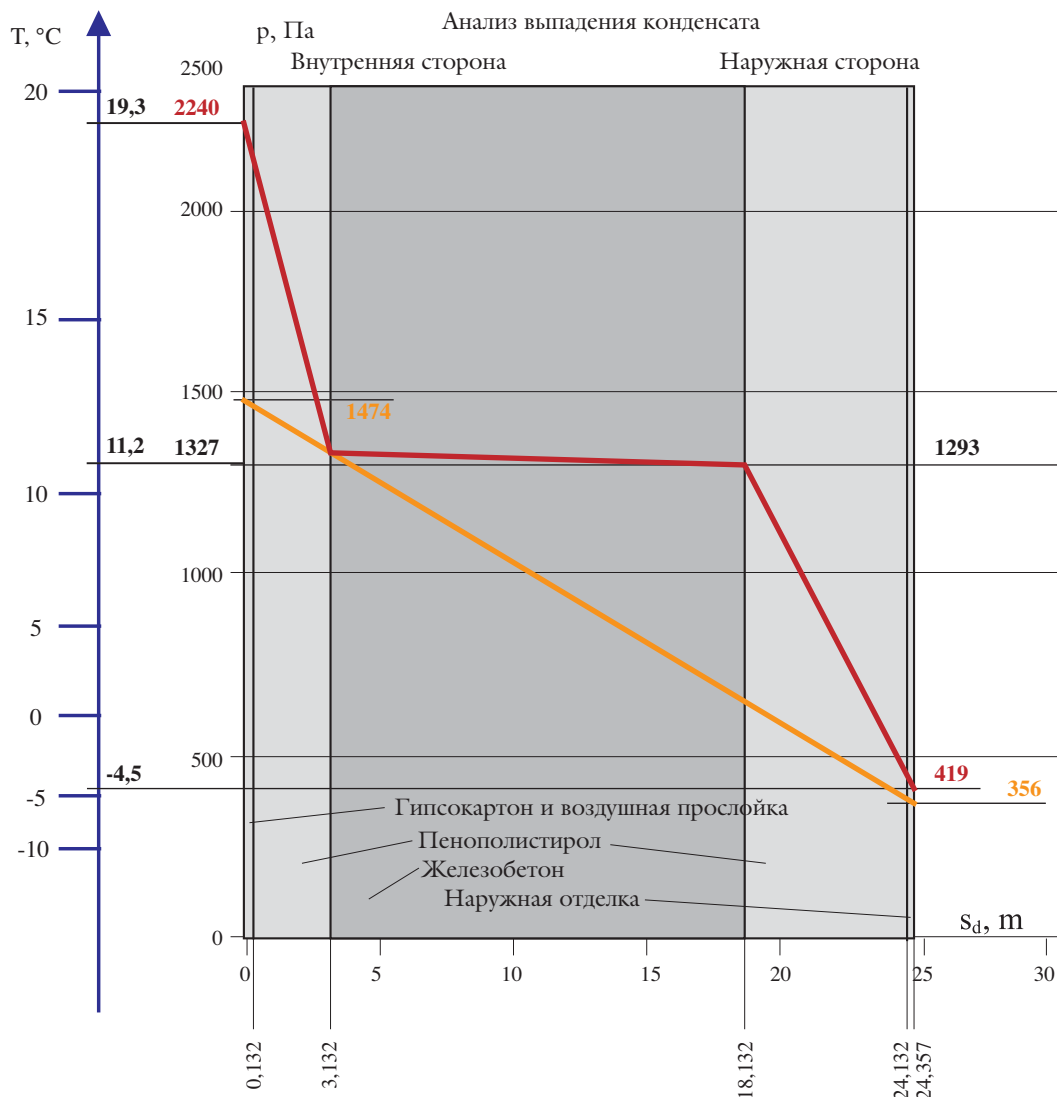


Рис. 2.7. Температура послойно и давление водяного пара в ограждающей конструкции (таблица 2.3; толщина наружного слоя пенополистирола (5) – 0,1 м) для зданий 4-го класса эксплуатационной влажности (желтая линия – распределение давления ненасыщенного водяного пара; красная линия – распределение давления насыщенного водяного пара и одновременно температуры)

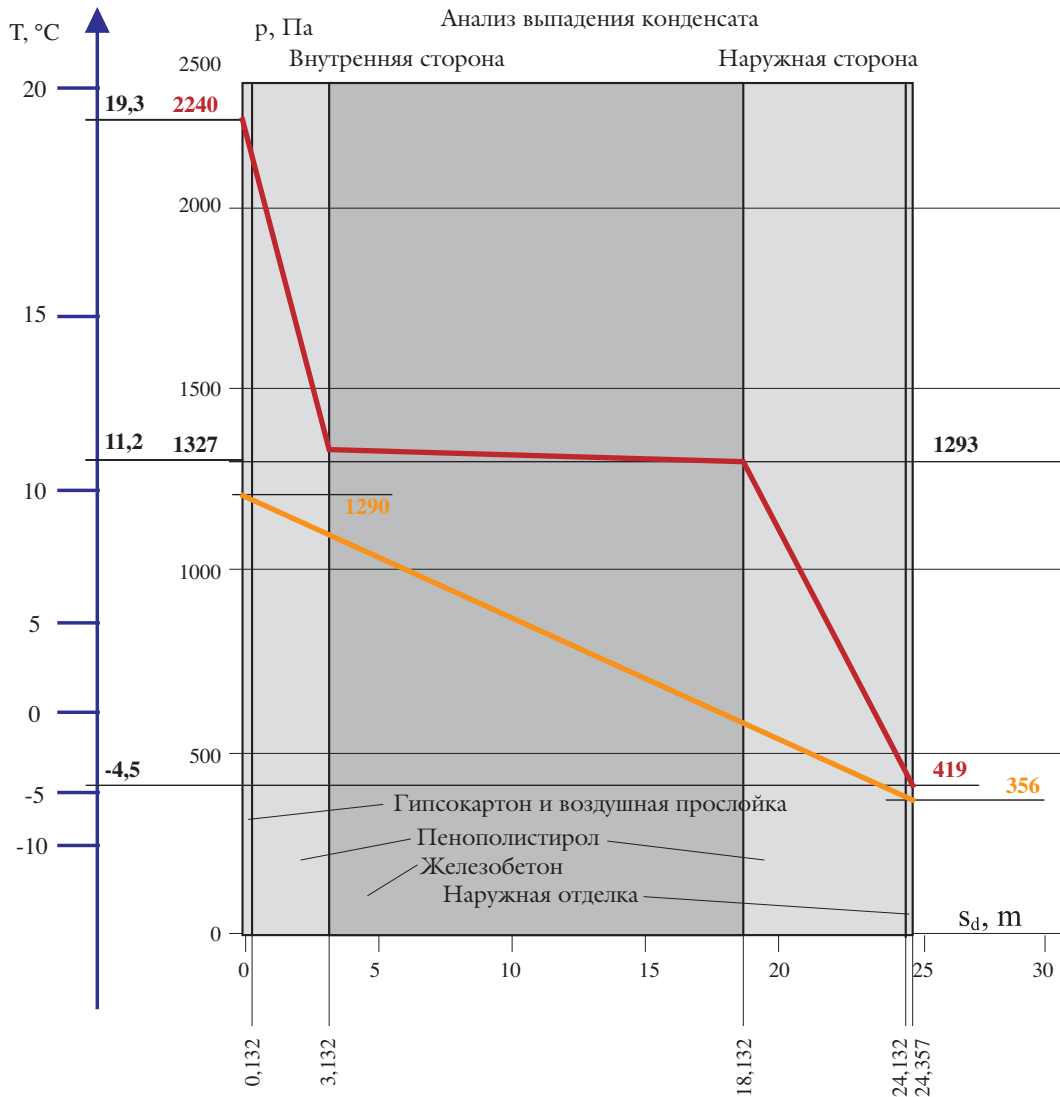


Рис. 2.8. Температура послойно и давление водяного пара в ограждающей конструкции (таблица 2.3; толщина наружного слоя пенополистирола (5) – 0,1 м) для зданий 3-го класса эксплуатационной влажности (желтая линия – давление ненасыщенного водяного пара; красная линия – давление насыщенного водяного пара и одновременно температуры)

## 2.5. Влияние крепежных винтов на теплопередачу ограждающей конструкции

### 2.5.1. Поправочный коэффициент теплопередачи для крепежных винтов

Сквозные крепежные винты в конструкции (сталь  $\lambda=50$  Вт/(м·К);  $\varnothing 5,2$  мм) дают дополнительное увеличение коэффициента теплопередачи конструкции, зависящее от числа винтов на единицу поверхности. В таблице 2.5 дано увеличение коэффициента теплопередачи, рассчитанное на один винт на  $1 \text{ м}^2$  в зависимости от его длины.

Таблица 2.5

Поправки коэффициента  $U_s$  на один крепежный винт на  $1 \text{ м}^2$ 

Длина винта, м	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50	0,55
$\Delta U_s$ , Вт/(м <sup>2</sup> ·К)	0,0042	0,0035	0,0030	0,0027	0,0024	0,0021	0,0019

Создаваемое винтами увеличение (поправку) общего коэффициента теплопередачи конструкции можно рассчитать по формуле:

$$\Delta U_{ks} = \frac{N}{A} \Delta U_s \quad (2.17)$$

где  $N$  – количество винтов на площади  $A$ ;

$A$  – площадь, м<sup>2</sup> (если расстояние между винтами 0,2 м, то  $N/A=25$ );

$\Delta U_s$  – поправка коэффициента теплопередачи для одного винта (таблица 2.5), Вт/(м<sup>2</sup>·К).

Учитывая поправку на винты, коэффициент теплопроводности в строительных конструкциях стены системы Dobeles panelis можно рассчитать по формуле:

$$U = U_{10} + \Delta U_{ks} \quad (2.18)$$

где  $U_{10}$  – коэффициент теплопередачи панели при 10°C, который определяют по формуле (2.1);

$\Delta U_{ks}$  – поправка коэффициента теплопередачи на винты (2.17), Вт/(м<sup>2</sup>·К).

## 2.5.2. Влияние крепежных винтов на температуру внутренней стены

Актуальным вопросом является: «Не будет ли с внутренней стороны строительной конструкции вблизи головок крепежных винтов в зимний период образоваться область пониженной температуры, в которой может возникнуть зона риска с точки зрения образования плесени, или там может происходить образование конденсата?»

Ответ на этот вопрос могут дать только расчеты такого мостика холода, которые были выполнены (рис. 2.9), но из-за их большого объема и сложности в этой работе не показаны. Для расчетов использована система Dobeles panelis со следующей толщиной слоев: внутри EPS 100, 0,05 м (рис. 2.9; слева); железобетон, 0,15 м; EPS 100 снаружи, 0,05 м. Наружная температура: -25°C, внутри +20°C. Линии 1 и 3 дают температуру на поверхности соединяющего винта: 3 – при несоблюдении взаимодействия между винтом и окружающей его средой, 1 – при соблюдении взаимодействия, 2 – температура среды, окружающей винт. Как видно, первоначальная разница температуры винта и окружающей среды быстро выравнивается (графики 1 и 2 совпадают), если диаметр винта небольшой (в расчетах принят 5,2 мм). В случае винта большого диаметра этого уже не произойдет. Это означает, что локальное понижение температуры поверхности внутренней стены в районе головки винта (координата  $d=0$ ; рис. 2.9) не ожидается. Однако эти винты действуют как мостики холода и вызывают равномерное понижение температуры на внутренней стене. В расчетах принимается, что в конструкции 25 винтов на 1 м<sup>2</sup>, понижение температуры составляет приблизительно 0,5°C (от 18,5°C, что может быть прогнозируемо, если не действует этот мостик холода, на 18°C).

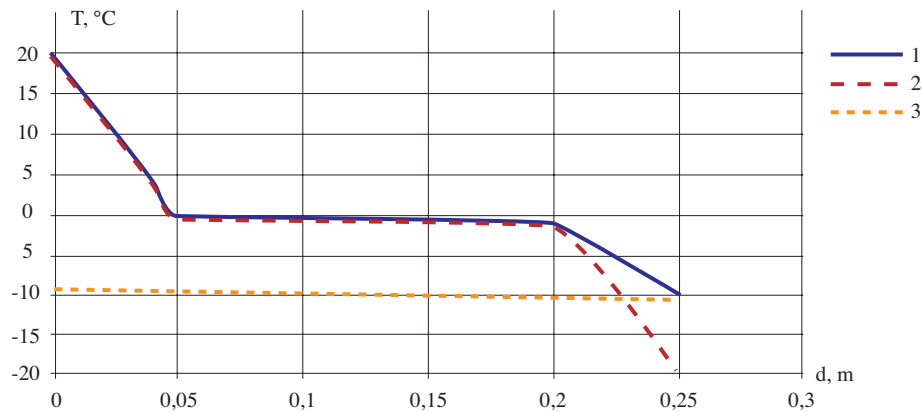


Рис. 2.9. Сквозные винты системы Dobeles panelis и температура окружающей их среды:

1 – температура окружающей среды; 2 – температура поверхности винта, с учетом взаимодействия между винтом и средой; 3 – температура поверхности винта, без учета взаимодействия

## 2.6. Теплопередача конструкций наружных стен системы Dobeles panelis

В таблицах 2.7 и 2.8 даны значения коэффициента теплопередачи  $U$ , Вт/(м<sup>2</sup>·К) наружных стен системы Dobeles panelis и максимальное количество конденсата в зимний период кг/м<sup>2</sup> для зданий 3 и 4 класса эксплуатационной влажности (таблица 2.4), рассчитанное в соответствии со стандартом [3] (3 класс – здания с низким уровнем заселения. Одноэтажные жилые дома; 4 класс – здания с высоким уровнем заселения. Многоэтажные жилые дома, спортивные залы, кухни, столовые и т. д.) В климатических условиях Риги [5], с учетом коррекции для 25 крепежных винтов на 1 м<sup>2</sup> в зависимости от толщины наружного слоя пенополистирола (1 вертикальный столбик) и железобетона. Во всех показанных в таблицах 2.7 и 2.8 случаях параметры прочих слоев наружных стен системы Dobeles panelis соответствуют таблице 2.3. Варьируемые параметры 2.3 в таблице закрашены. Конденсат в летний период высыхает.

Закраска значений  $U$  таблиц 2.7 и 2.8 в соответствии с требованиями таблицы 1 (температурный коэффициент  $k=1$ ) показана в таблице 2.6.

Таблица 2.6

Закраска значений  $U$  в таблицах 2.7 и 2.8

	> 0,60 Вт/(м <sup>2</sup> ·К) – не соответствует нормам	
	0,50–0,60 Вт/(м <sup>2</sup> ·К) – производственные здания	$U_{RN}-U_{RM}$
	0,40–0,50 Вт/(м <sup>2</sup> ·К) – общественные здания	$U_{RN}$ – нормативное значение;
	0,30–0,40 Вт/(м <sup>2</sup> ·К) – жилые дома	$U_{RM}$ – максимальное значение
	В конструкции образуется конденсат, который в летний период высыхает	

Таблица 2.7

**Значение коэффициента теплопередачи U, Вт/(м<sup>2</sup>·К) наружных стен системы Dobeles panelis и максимальное количество конденсата в зимний период кг/м<sup>2</sup> в зависимости от толщины наружного слоя теплоизоляции и железобетона**

Наружная изоляция, EPS 200					Наружная изоляция,							
U, Вт/(м <sup>2</sup> ·К)					3 класс влажности				4 класс влажности			
EPS 200	Толщина железобетона, м				Толщина железобетона, м				Толщина железобетона, м			
d, м	0,15	0,20	0,25	0,30	0,15	0,20	0,25	0,30	0,15	0,20	0,25	0,30
0,05	0,41	0,39	0,38	0,37	0,01	0,02	0,03	0,03	0,23	0,25	0,26	0,26
0,10	0,30	0,29	0,28	0,27	Нет	Нет	Нет	Нет	0,00	0,01	0,02	0,03
0,15	0,24	0,23	0,22	0,21	Нет	Нет	Нет	Нет	Нет	Нет	Нет	Нет
0,20	0,20	0,19	0,18	0,18	Нет	Нет	Нет	Нет	Нет	Нет	Нет	Нет

При изготовлении несъемной опалубки для наружных стен системы Dobeles panelis из пенополистирола с графитными добавками – Неорег EPS 200, плотность которого 25-30 кг/м<sup>3</sup>, а теплопроводность приблизительно 0,03 Вт/(м·К), таблица 2.8 аналогична таблице 2.7.

Таблица 2.8

**Значения коэффициента теплопередачи U, Вт/(м<sup>2</sup>·К) наружных стен системы Dobeles panelis с пенополистиролом Неорег EPS 200 и максимальное количество конденсата в зимний период кг/м<sup>2</sup> в зависимости от толщины наружного слоя теплоизоляции и железобетона**

Наружная изоляция, Неорег EPS 200					Наружная изоляция,							
U, Вт/(м <sup>2</sup> ·К)					3 класс влажности				4 класс влажности			
Неорег EPS 200	Толщина железобетона, м				Толщина железобетона, м				Толщина железобетона, м			
d, м	0,15	0,20	0,25	0,30	0,15	0,20	0,25	0,30	0,15	0,20	0,25	0,30
0,05	0,38	0,36	0,34	0,33	0,02	0,02	0,03	0,04	0,24	0,25	0,25	0,26
0,10	0,27	0,26	0,25	0,24	Нет	Нет	Нет	Нет	0,00	0,01	0,02	0,03
0,15	0,22	0,21	0,20	0,19	Нет	Нет	Нет	Нет	Нет	Нет	Нет	Нет
0,20	0,18	0,17	0,17	0,16	Нет	Нет	Нет	Нет	Нет	Нет	Нет	Нет

## 2.7. Расчет конструкции крыши

Конструкция крыши системы Dobeles panelis схематически показана на рисунке 2.10. Конструкция негомогенная и содержит три среды, для которых коэффициенты теплопроводности будут различными: железобетон, пенополистирол и невентилируемые воздушные прослойки. Толщина слоя пенополистирольной теплоизоляции для промышленно изготовленных кровельных панелей системы Dobeles panelis под железобетонными балками фиксированная – 0,04 м.

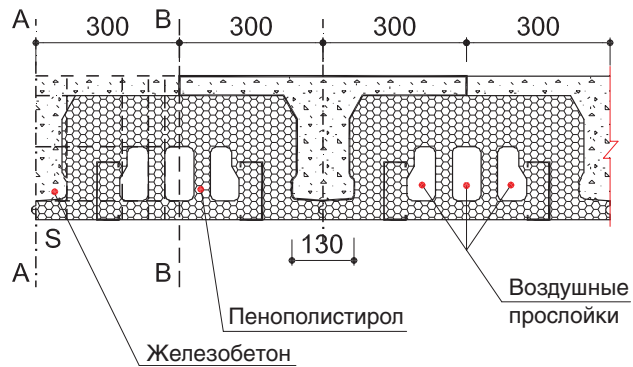


Рис. 2.10. Конструкция крыши системы Dobeles panelis

Расчет коэффициента теплопередачи  $U$  такой конструкции очень сложный. В соответствии со стандартом [1] расчет коэффициентов теплопередачи неомогенных строительных конструкций, при разделении конструкции на слои (перпендикулярно направлению потока тепла) и секции (параллельно направлению потока тепла) так, чтобы каждая отдельная часть конструкции была однородной. Далее по стандарту [1] необходимо рассчитать верхнюю ( $R_T'$ ) и нижнюю ( $R_T''$ ) границу сопротивления теплопередаче строительной конструкции, обратная величина среднего арифметического которых является искомым значением коэффициента теплопередачи. Например, в показанной на рисунке 2.10 конструкции прежде всего необходимо выполнить сечения (штрихпунктирные линии) по плоскостям симметрии плиты (AA, BB и т. д.), и затем часть панели между двумя сечениями, например, AA и BB, необходимо разделить на 4 слоя и 5 секций (всего 20 однородных областей; на рис. 2.10 показаны прерывистыми линиями). Понятно, что окончательный расчет будет с очень большой погрешностью.

Так как у конструкции под несущей балкой будет слой теплоизоляции толщиной только 40 мм, то, очевидно, самой критической поверхностью конструкции является этот стык (пункт S; рис. 2.10). Поэтому проанализируем этот стык максимально корректно, решая стационарное уравнение теплопередачи для этой части конструкции расчетными методами. Воздушные прослойки здесь имеют незначительное значение – они расположены относительно далеко, поэтому их в рассмотрение принимать не будем. Проанализированная часть строительной конструкции показана на рисунке 2.11.

Для расчета были приняты следующие теплотехнические параметры:

- 1) коэффициент теплопроводности пенополистирола –  $0,036 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$ ;
- 2) коэффициент теплопроводности железобетона –  $2 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$  [4];
- 3) сопротивление теплопередаче наружной поверхности ограждающей конструкции –  $0,04 \text{ м}^2 \text{ К}/\text{Вт}$ ;
- 4) сопротивление теплопередаче внутренней поверхности ограждающей конструкции –  $0,10 \text{ м}^2 \text{ К}/\text{Вт}$ ;
- 5) температура воздуха снаружи –  $-4,7 \text{ }^\circ\text{C}$  (средняя январская температура в Риге [5]);
- 6) температура воздуха внутри –  $+20 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Математически конструкция рассчитывается при помощи прямоугольной сетки, фрагмент которой показан на рисунке 2.11. По оси X выделяются 16 точек деления, а по оси Y – 23. Шаг сетки составляет 0,01 м. Таким образом, в целом образуется  $16 \times 23 = 368$  узловых точек. Решение проблемы сводится, в конечном результате, к системе линейных алгебраических уравнений, в которой столько уравнений, сколько узловых точек в решетке. Решив эту систему из 368 линейных алгебраических уравнений, получаем температуру в 368 точках. По рассчитанным температурам можно сконструировать группу изотермических кривых, показанных на рисунке 2.12.

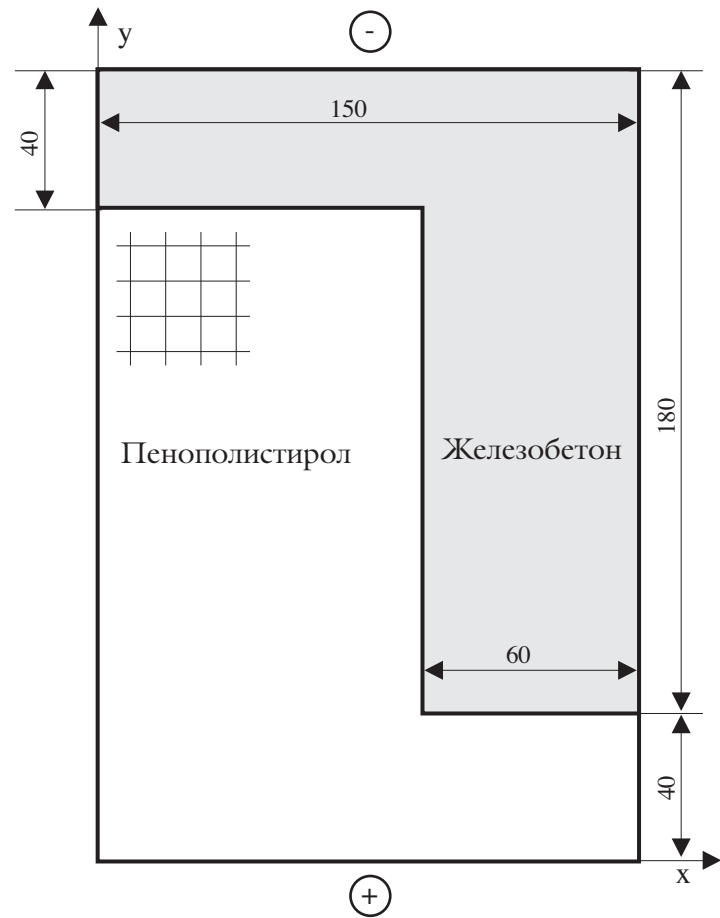


Рис. 2.11. Схема расчета кровли

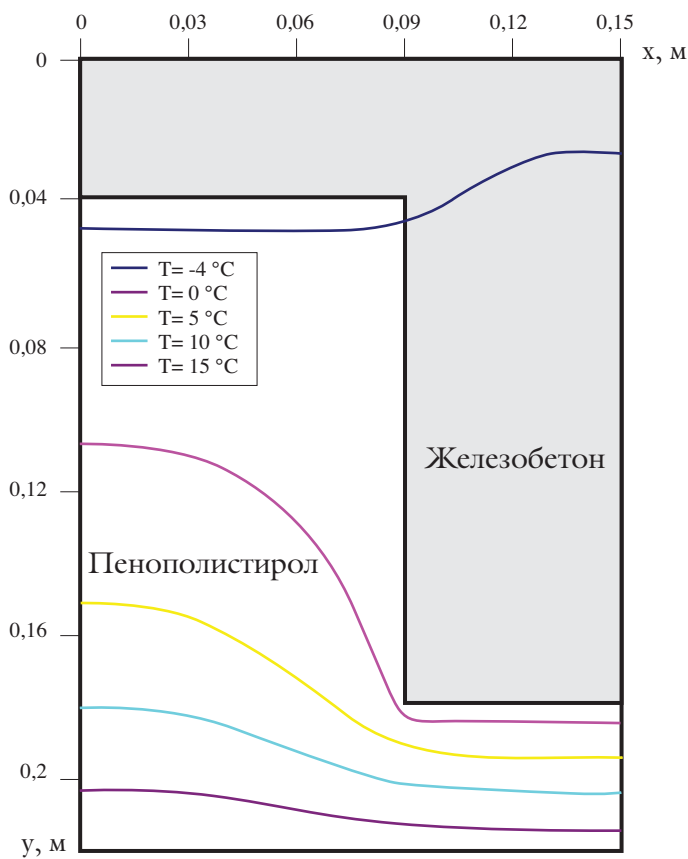


Рис. 2.12. Группа изотермических кривых элемента кровли

Как видно из группы изотерм, изотермическая кривая 15 °С приближается к внутренней поверхности около железобетонной балки. Это говорит о том, что под железобетонной балкой температура поверхности понижается. Температура внутренней и наружной поверхности панели в зависимости от координаты  $x$ , если температура воздуха снаружи равна  $-4,7$  °С (средняя январская температура в Риге [5]), показана на рисунке 2.13.

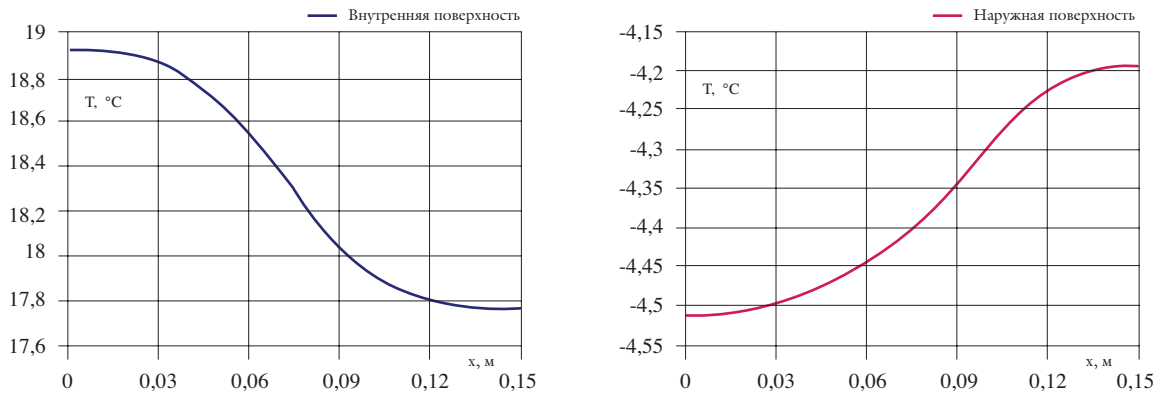


Рис. 2.13. Изменение температуры внутренней и наружной поверхности конструкции

Как видно, температура внутренней поверхности под балкой  $17,8$  °С, что на  $1,1$  °С ниже, чем дальше от нее. При этой температуре относительная влажность воздуха в помещении от  $0,66$  (4 класс влажности) на поверхности под балкой увеличивается до  $0,79$ , что близко к границе риска возникновения плесени **0,8** [3]. Тогда как в зданиях 3 класса эксплуатационной влажности соответственно относительная влажность воздуха от  $0,53$  в помещении увеличивается до  $0,61$  на поверхности под балкой. Если наружная температура воздуха в декабре или январе достаточно долгое время сохраняется на уровне  $-20$  °С, что в климатических условиях Латвии вполне возможно, относительная влажность воздуха на поверхности под балкой увеличивается до  $0,88$  (4 класс влажности) или  $0,77$  (3 класс влажности). В соответствии со стандартом [3] при длительном сохранении относительной влажности воздуха на уровне более  $0,8$  возникает риск образования плесени. При увеличении толщины слоя пенополистирольной изоляции в районе балки до  $0,06$  м, максимальная относительная влажность воздуха на поверхности под балкой в декабре-январе уменьшается до **0,82-0,80** (4 класс влажности) или **0,67** (3 класс влажности). Это означает, что в зданиях с 4 классом эксплуатационной влажности общая толщина теплоизоляции в конструкции крыши в районе балки должна быть не менее  $0,06$  м. Так как в промышленно изготовленных кровельных панелях, которые показаны на рисунке 2.10, толщина теплоизоляционного слоя под железобетонной балкой составляет  $0,04$  м, необходимо принять меры по дополнительному утеплению, чтобы общий слой теплоизоляции увеличить по крайней мере до  $0,06$  м. Дополнительный слой теплоизоляции может быть размещен и под панелью, и над ней. Эти дополнительные меры в зимние месяцы уменьшат риск образования плесени в зонах под несущими железобетонными балками.

На рисунке 2.11 видно, что значение коэффициента теплопередачи конструкции, полученное по данным численного решения, равно  $0,58$  Вт/(м<sup>2</sup>·К), а рассчитывая его по стандарту [1], деля строительный элемент на 3 слоя и 2 секции, получаем  $0,52$  Вт/(м<sup>2</sup>·К). Если сопротивление теплопередаче строительного элемента рассчитывать по формуле:

$$R_T = \frac{R_T' + 2R_T''}{3} \quad (2.19)$$

которая применялась до принятия [7] стандарта [1], используя подобным образом верхнее  $R_T'$  и нижнее  $R_T''$  значения

сопротивления теплопередаче, получим  $0,57 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$ , что намного ближе к точному расчету. В целом, необходимо сделать вывод, что при расчете коэффициента теплопередачи такой неомогенной строительной конструкции по методу, предусмотренному стандартом [1], погрешность составляет 15-20 %.

Количество образовавшегося конденсата под балкой, рассчитанное по методу решетки и обычным расчетом для гомогенных слоев по метеорологическим данным на январь для Риги, дает соответственно  $0,19 \text{ кг}/\text{м}^2$  и  $0,18 \text{ кг}/\text{м}^2$ , что существенно не отличается. Таким образом можно предположить, что расчет количества конденсата даст значительно меньшую ошибку, чем расчет коэффициента теплопередачи.

Однако конденсат весной не высыхает. Это означает, что конструкция крыши может эксплуатироваться только в том случае, если внутренняя поверхность конструкции покрыта слоем пароизоляции, с эквивалентом сопротивления диффузии паров воды  $sd > 75 \text{ м}$ , аналогичной непроницающей водяной пар покраске или штукатурке с соответствующими непроницающими водяной пар добавками.

В таблице 2.10 даны значения теплопередачи конструкции крыши, рассчитанные в соответствии с методикой стандарта [1] для неомогенных конструкций в зависимости от толщины  $H$  конструкции (рис. 2.14), которая включает в себя слой пенополистирола толщиной  $0,04 \text{ м}$  с внутренней стороны плюс переменную толщину железобетонной балки – от  $0,14$ – $0,28 \text{ м}$ . При расчете значения  $U$  конструкции также учтен наружный железобетонный слой толщиной  $0,04 \text{ м}$ , который в таблице 2.10 в толщине  $H$  не учтен. Закраска значений  $U$  таблицы в соответствии с требованиями таблицы 2.1 (температурный коэффициент  $k=1$ ) показана в таблице 2.9.

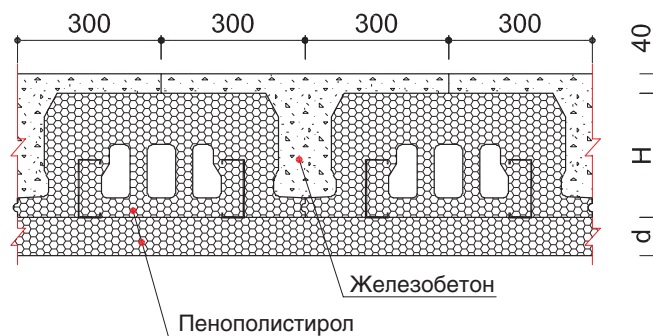


Рис. 2.14. Кровельная панель со слоем дополнительной теплоизоляции.

Таблица 2.9

**Закраска значений  $U$  конструкций крыши**

	$> 0,50 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$ – не соответствует нормам	$U_{RN}-U_{RM}$ $U_{RN}$ – нормативное значение; $U_{RM}$ – максимальное значение
	$0,35-0,50 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$ – промышленные здания	
	$0,25-0,35 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$ – общественные здания	
	$0,20-0,25 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$ – жилые здания	

**Значения коэффициента теплопередачи U, Вт/(м<sup>2</sup>·К) конструкции крыши системы Dobeles panelis с пенополистиролом EPS 150 в зависимости от общей толщины конструкции и дополнительной теплоизоляции**

H, cm d, cm	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32
0	0,47	0,45	0,44	0,42	0,41	0,40	0,39	0,38	0,37	0,36	0,35	0,35	0,34	0,33	0,33
1	0,41	0,39	0,38	0,37	0,36	0,35	0,34	0,33	0,32	0,32	0,31	0,30	0,30	0,29	0,29
2	0,36	0,35	0,34	0,33	0,32	0,31	0,30	0,30	0,29	0,28	0,28	0,27	0,27	0,26	0,26
3	0,32	0,31	0,30	0,30	0,29	0,28	0,28	0,27	0,26	0,26	0,25	0,25	0,24	0,24	0,24
4	0,29	0,29	0,28	0,27	0,26	0,26	0,25	0,25	0,24	0,24	0,23	0,23	0,22	0,22	0,22
5	0,27	0,26	0,26	0,25	0,24	0,24	0,23	0,23	0,22	0,22	0,22	0,21	0,21	0,21	0,20
6	0,25	0,24	0,24	0,23	0,23	0,22	0,22	0,21	0,21	0,20	0,20	0,20	0,19	0,19	0,19
7	0,23	0,23	0,22	0,22	0,21	0,21	0,20	0,20	0,20	0,19	0,19	0,19	0,18	0,18	0,18
8	0,22	0,21	0,21	0,20	0,20	0,19	0,19	0,19	0,18	0,18	0,18	0,18	0,17	0,17	0,17

Чтобы теплоизоляция конструкции крыши была достаточной, как видно из таблиц 2.10 и 2.1, необходим еще дополнительный слой теплоизоляции, который на рисунке 2.14 и в таблице 2.10 отмечен буквой «d».

Например, если температура в помещениях жилого дома 20 °С, то температурный коэффициент k, который рассчитывают по формуле (2.3), равен 0,95 (для Риги T<sub>e</sub>=0 °С [5]). При расчете нормативного значения коэффициента теплопередачи (таблица 2.1) U<sub>RN</sub>=0,25·k=0,25·0,95=0,2375≈0,24 Вт/(м<sup>2</sup>·К). Предположим, что конструкция крыши состоит из кровельных панелей системы Dobeles panelis толщиной H=24 см (рис. 2.14). Как видно из таблицы 2.10, для достижения нормативного коэффициента теплопередачи необходим еще дополнительный слой теплоизоляции толщиной 5 см.

Понятно, что, выполняя дополнительное утепление конструкции крыши в соответствии с таблицей 2.10, риск образования плесени в зданиях в зонах под железобетонными балками будет устранен (рис. 2.10).

В отношении общественных и производственных зданий, особенно если в помещениях производственных зданий пониженная температура (при уменьшении T<sub>i</sub> в формуле 2.3 понижаются требования к коэффициенту теплопроводности; таблица 2.1), может оказаться, что дополнительная теплоизоляция в соответствии с таблицей 2.10 не нужна, однако риск образования плесени остается. Это одновременно определяют несколько переменных факторов: коэффициент теплопроводности, температура и относительная влажность воздуха в помещении, которые в различных условиях эксплуатации здания могут меняться в достаточно широких пределах. Поэтому риск образования плесени на внутренней поверхности кровельной панели в этих случаях следует анализировать во время проектирования зданий, учитывая конкретные теплотехнические параметры эксплуатации здания. При возникновении риска образования плесени, его можно устранить, принимая помимо требований таблицы 2.10 дополнительные меры.

В заключение, рассмотрим еще вопрос о массивности (тепловой инерции) конструкции крыши. Небольшая массивность (тепловая инерция) конструкции приводит к тому, что в весеннее время при падении на конструкцию крыши прямых солнечных лучей, тепло относительно быстро попадает в помещения верхнего этажа здания, где температура может повышаться, нарушая благоприятный для жизни людей микроклимат. Решение задачи о колебании температуры в материале в течение некоего цикла (года, суток) известно [8]. Время задержки (сдвига) изменения температуры через определенный слой материала можно рассчитать по формуле:

$$\tau = d \sqrt{\frac{t_{\text{dien}}}{4\pi a}} = 82,92 \cdot \frac{d}{\sqrt{a}} \quad (\text{s}) = \frac{82,92}{3600} \cdot \frac{d}{\sqrt{a}} = 0,023 \cdot \frac{d}{\sqrt{a}} \quad (\text{h}) \quad (2.20)$$

где  $d$  – толщина слоя, м;  
 $t_{\text{dien}}$  – продолжительность суток, с;  
 $a$  – коэффициент изменения температуры материала, м<sup>2</sup>/с.

Коэффициент изменения температуры рассчитывают по формуле:

$$a = \frac{\lambda}{c\rho} \quad (2.21)$$

где  $\lambda$  – теплопроводность материала, Вт/(м·К) [EPS ~ 0,035 Вт/(м·К)];  
 $c$  – теплоемкость материала, Дж/(кг·К) [EPS ~ 1450 Дж/(кг·К)] [4];  
 $\rho$  – плотность материала, кг/м<sup>3</sup> (EPS ~ 30 кг/м<sup>3</sup>).

При этих значениях мы получаем  $a=8 \cdot 10^{-7}$  м<sup>2</sup>/с, а при меньшей толщине пенополистирола (0,14 м)  $\tau=3,6$  час. Прибавляя к этому времени еще время задержки изменения температуры конструкции с 4 см бетонным слоем снаружи  $\tau_{\text{betona}} = 0,92$  часа, рассчитанное по формуле (2.20), получаем 4,5 часа. Это время в отдельных случаях может оказаться недостаточным.

Если выполнено дополнительное утепление кровельной панели в соответствии с данными таблицы 2.10, например, чтобы достичь нормативного значения коэффициента теплопередачи URN, то смещение времени достигает 9-11,5 часов, что в помещениях верхнего этажа обеспечит приятный микроклимат и позволит избежать перегрева помещений летом.

При невыполнении дополнительного утепления, по выбору клиента, чтобы максимально избежать температурных колебаний в помещениях верхнего этажа здания, рекомендуются следующие меры:

- использовать в панели по-возможности увеличенной толщины слой пенополистирола (это улучшило бы и теплоизоляционные свойства панели);
- создавать конструкцию крыши с массивными деталями, например, черепицей;
- создавать конструкцию крыши с вентилируемым чердачным помещением;
- разместить над панелью металлическую фольгу для отражения радиации;

Однако необходимо понимать, что только использование металлической фольги без принятия других упомянутых решений в полной мере может не дать необходимый эффект, так как будет задействован только один механизм передачи тепла – радиация, но на изменение тепла это существенно не повлияет.

#### Литература

1. Стандарт LVS EN ISO 6946:2000. Ēku daļas un elementi. Termiskā pretestība un siltuma caurlaidība. Aprēķina metode.
2. Стандарт EN 13163. Wärmedämmstoffe für Gebäude – Werkmäßig hergestellte produkte aus expandiertem Polystyrol (EPS) – Spezifikation.
3. Стандарт: LVS EN ISO 13788. Hygrothermal performance of buildings components and building elements – Estimation of internal surface temperature to avoid critical surface humidity and assessment of the risk of interstitial condensation.
4. Латвийский строительный норматив LBN 002-01 «Ēku norobežojošo konstrukciju siltumtehnika». Утвержден Кабинетом министров правилами № 495 от 27 ноября 2001 г..
5. Латвийский строительный норматив LBN 003-01 «Būvklimatoloģija». Утвержден Кабинетом министров правилами № 376 от 23 августа 2001 г..
6. Стандарт LVS EN ISO 10456. Būvmateriāli un to izstrādājumi. Deklarēto un projektēto termisko lielumu noteikšanas procedūras.
7. O. Belindževa-Korkla. Norobežojošo konstrukciju siltumtehnikas aprēķini. Metodiskie norādījumi LBN 002-01 izmantošanai. – Rīga, RTU izdevniecība, 2002. – 166 lpp.
8. E. Riekstiņš. Matemātiskās fizikas metodes. – Rīga, Zvaigzne, 1969. – 629 lpp.
9. U. Iljins, J. Skujāns, S. Štrausa, A. Vulāns. Tenapors. Metodiski norādījumi projektētājiem un būvētājiem. – Dobeles, Jelgava, 2002. – 99 lpp.

## 3. Пожаробезопасность<sup>1</sup>

Все элементы системы Dobeles panelis соответствуют требованиям действующего в Латвии в настоящее время строительного норматива LBN 201-96 «Ugunsdrošības normas» (Нормы пожарной безопасности). В Латвии разрабатываются и на стадии проекта новые нормы пожарной безопасности, в которых учтен опыт других государств Европейского союза, а также правила тестирования конструкций. Однако необходимо учесть, что строительный норматив [1] не изменен и, таким образом, является обязательным.

Главная цель противопожарных мероприятий – не допускать возможности возникновения пожара. Целью является создание условий для безопасности тех людей, которые могут находиться в здании в момент пожара, условий для безопасности сотрудников пожарно-спасательной службы, а также уменьшение до минимума причиняемых пожаром материальных потерь и недопущение катастрофических последствий.

Чтобы обеспечить выполнение этих целей, следует указать минимально необходимую огнестойкость здания и строительных конструкций, а также максимально допустимую огнеопасность строительных конструкций здания и материалов.

Используя для строительства здания систему несъемной опалубки Dobeles panelis, **несущие элементы стен и перекрытий здания создаются из монолитного железобетона**. Эти конструкции негорючие и их толщина с точки зрения пожарной безопасности должна соответствовать таблицам 2.2, а также таблицам 10 и 11 приложения 4 LBN 201-96 [1]. В таблице 2.2 LBN 201-96 указаны минимальные пределы огнестойкости конструкций (несущих стен, межэтажных перекрытий, соединительных кровельных элементов) и необходимые группы горючести строительных материалов. В таблице 10 и 11 приложения 4 LBN 201-96 указано, какая толщина и защита конструкции обеспечивает необходимый предел огнестойкости в минутах, а группы горючести строительных материалов определяют по таблице 2.1.

В таблице 3.1 показана оценка пределов огнестойкости несущих конструкций системы Dobeles panelis согласно требованиям LBN 201-96. Можно сделать вывод, что несущие стены и межэтажные перекрытия минимальной толщины с минимальным диаметром растянутых стержней несущих ребер обеспечивают требования 1-го (I) уровня пожарной безопасности. Если толщина стен, а также диаметр растянутых стержней несущих ребер межэтажных перекрытий больше, то обеспечивается удовлетворение еще более высоких требований пожарной безопасности.

Таблица 3.1

**Граница огнестойкости несущих конструкций системы Dobeles panelis согласно LBN 201-96**

Уровень пожарной безопасности здания	Несущие стены		Настил межэтажных перекрытий	
	Минимальные пределы огнестойкости в минутах и группы горючести материалов	Толщина железобетонной стены, мм	Минимальные пределы огнестойкости в минутах и группы горючести материалов	Железобетонные плиты с несущими ребрами
	222	150		
1. (I)	150 негорюч.	120	60 негорюч.	С минимальным* диаметром растянутой арматуры несущих ребер Ø12 мм

\*) Чем больше диаметр растянутой арматуры несущих ребер, тем выше предел огнестойкости конструкции.

<sup>1</sup> Требования и расчеты, аналогичные представленным в разделе, должны соответствовать нормативным документам конкретной страны.

Для изготовления несъемной опалубки используется трудновоспламеняемый вспененный пенополистирол. Конструкции такой опалубки необходимо защищать по крайней мере одним слоем негорючей штукатурки толщиной 5-6 мм. Для отделки внутренних стен и потолков для улучшения пожарной безопасности можно использовать обшивку из гипсокартона или другого негорючего листового материала или штукатурку.

При проектировании в системе несъемной опалубки Dobeles panelis малоэтажные жилые дома, многоэтажные многоквартирные жилые дома, общественные здания, а также производственные здания, необходимо учитывать соответствующие требования определенные в действующих в Латвии строительных нормативах LBN 208-00 [2], LBN 211-98 [3], LBN 215-05 [4] и LBN 209-04 [5] пожарной безопасности зданий.

Приложение С «Пожарная безопасность. Минимальные размеры бетонного слоя» директив ETAG 009 (изданы в июне 2002 года) «Ненесущие ограждающие конструкции из пустотных блоков, теплоизоляционных панелей и бетона» Европейской организации по техническим утверждениям (European Organization for Technical Approvals) определяют толщину бетонной конструкции при определенных границах пожарной безопасности (таблица 3.2) [6]. Директивы ETAG 009 также определяют существенные требования по надежности системы Dobeles panelis.

Таблица 3.2

**Минимальная толщина бетонного слоя, при воздействии огня с одной стороны**

	Несущая стена	Ненесущая стена
Предельное состояние огнестойкости	REI	EI
Предел огнестойкости, мин	Минимальная толщина бетонного слоя, мм*	
30	100	90
60	110	90
90	120	100
120	150	120

\*) Класс прочности бетона в пределах от «С16/20» до «С50/60» в соответствии с prEN 206.

Так как минимальная толщина несущих бетонных стен, изготовленных в системе несъемной опалубки Dobeles panelis, составляет 120 мм, согласно директивам Европейской организации по техническим утверждениям ETAG 009 минимальный предел огнестойкости этих стен равен REI 90, а для стены толщиной 150 мм – REI 120.

Строительные конструкции, изготовленные в системе несъемной опалубки Dobeles panelis, пока не испытаны на огнестойкость во всех странах. В настоящее время можно ознакомиться с результатами теста, выполненного для конструкций перекрытия и перегородок, изготовленной в Италии по системе PLASTBAU®, которая аналогична системе Dobeles panelis. Проверка строительных конструкций выполнена в лаборатории CSI (Италия) в соответствии с законодательством и нормативами Италии (таблица 3.3. и 3.4). Проверена огнестойкость перекрытий и перегородки, и определены их пределы огнестойкости.

Таблица 3.3

**Результаты испытаний предела огнестойкости перекрытий, изготовленных в системе несъемной опалубки Dobeles panelis, в соответствии с законодательством и нормативами Италии**

№ п.п.	Название строительной конструкции	Вид отделки	Результаты испытаний	Предел огнестойкости
1.	Конструкция перекрытия	штукатурка толщиной 15 мм	REI 180	REI 180
2.	Конструкция перекрытия	Обшивка гипсокартонными листами толщиной 13 мм	REI 128	REI 120

Таблица 3.4

**Результаты испытаний предела огнестойкости перегородок в соответствии с законодательством и нормативами Италии**

№ п.п.	Название строительной конструкции	Вид отделки	Результаты испытаний	Предел огнестойкости
1.	Перегородка, толщина 100 мм	С каждой стороны раствор штукатурки толщиной 25 мм; общая толщина 150 мм	REI 150 – RE 167	REI 120 – RE 120
2.	Перегородка, толщина 100 мм	С каждой стороны два гипсокартонных листа; общая толщина 156 мм	REI 123 – RE 144	REI 120 – RE 120

**Литература**

1. Латвийский строительный норматив LBN 201-96 «Ugunsdrošības normas».
2. Латвийский строительный норматив LBN 208-00 «Publiskas ēkas un būves».
3. Латвийский строительный норматив LBN 211-98 «Daudzstāvu daudzdzīvokļu dzīvojamie nami».
4. Латвийский строительный норматив LBN 212-05 «Rūpniecības ēkas».
5. Латвийский строительный норматив LBN 209-04 «Mazstāvu ēku projektēšanas normas».
6. ETAG 009 Edition June 2002. Guideline for European Technical Approval of Non load-bearing permanent shuttering kits/systems based on hollow blocks or panels of insulating materials and sometimes concrete.

## 4. Отопление и вентиляция<sup>1</sup>

При проектировании и строительстве системы отопления и вентиляции зданий системы несъемной опалубки Dobeles panelis необходимо учитывать требования латвийских строительных нормативов LBN 211-98 «Daudzstāvu daudzdzīvokļu dzīvojamie nami» [1], LBN 208-00 «Publiskas Xkas и bpves» [2], LBN231-03 «Dzīvojamo un publisko ēku apkure un ventilācija» [3], LBN 201-96 «Ugunsdrošības normas» [4]. Все упомянутые строительные нормативы можно найти и в Интернете [5].

### 4.1. Отопление зданий системы Dobeles panelis

Здания системы Dobeles panelis идеальны для использования разного рода отопительных систем, и единственное отличие состоит в том, что благодаря хорошей теплоизоляции ограждающих конструкций для обеспечения ощущения комфорта в помещениях необходимы менее мощные системы отопления.

У этих зданий высокий класс плотности, что практически исключает чрезмерные (неадекватные) потери тепла зимой из-за инфильтрации холодного наружного воздуха. Со вступлением в силу директивы Парламента и Совета Европы 2002/91/ЕК (16 декабря 2002 года) «О главных энергетических параметрах зданий и их нормах» **здания системы Dobeles panelis будут отвечать всем энергосертификационным требованиям этой директивы [6].**

Система Dobeles panelis позволяет размещать прямые и обратные трубопроводы отопления во внутреннем слое теплоизоляции наружных стен, а также в каналах панелей перекрытия. Одновременно с этим отопительные трубопроводы хорошо теплоизолируются, но, главное, в помещении они не видны и не мешают при создании уютного интерьера помещений.

### 4.2. Вентиляция зданий системы Dobeles panelis

Принимая во внимание воздухопроницаемость (плотность) ограждающих конструкций помещений и используемых в строительстве окон и дверей, не рекомендуется проектировать помещения без вспомогательных вентиляционных устройств, так как в помещениях без надлежащей вентиляции начнет накапливаться загрязненный воздух и влага, что может вызвать явления «синдрома больных зданий» (конденсацию влаги, плесень, размножение вредных бактерий, запахи и т. д.). Рекомендуется проектировать помещения с открываемыми окнами, чтобы можно было выполнять периодическое проветривание помещений, открывая окна. Однако необходимо отметить, что такие способы проветривания помещений имеют ряд недостатков:

- невозможно контролировать объем воздушного обмена, который может вызвать чрезмерно большие потери тепла и переохлаждение помещений;
- в помещения проникает пыль, цветочная пыльца, химические вещества и пр., загрязняющие помещения и способные вызвать аллергическую реакцию у жильцов;
- при открытом окне на помещение негативное влияние оказывает внешний шум;
- если забыли об открытом окне, то при изменении погодных условий, во время дождя или снегопада в помещения может попасть вода в виде осадков;
- открытые окна увеличивают опасность несанкционированного проникновения.

<sup>1</sup> Требования и расчеты, аналогичные представленным в разделе, должны соответствовать нормативным документам конкретной страны.

Частично упомянутые проблемы помогают решить встроенные в оконные рамы вентиляционные щели, которые обеспечивают регулировку притока воздуха, снижают шум, улавливают частицы или даже регулируют открытие щелей при повышении влажности, а также их закрытие в ненастную погоду.

Приток воздуха можно регулировать, добиваясь уменьшения шума и улавливания частиц, также и различными вспомогательными вентиляционными устройствами, встраиваемыми в наружные стены.

Однако необходимо отметить, что все упомянутые способы вентиляции в большой степени зависят от климатических условий наружного воздуха и не всегда они способны обеспечить предусмотренный нормативами воздухообмен в помещениях. LBN 231-03 определяет, что абсолютный минимум подачи свежего воздуха, считая, что люди являются единственным источником загрязнения воздуха в помещении, равен 15 м<sup>3</sup>/час на человека, а LBN 211-98 «Многоэтажные многоквартирные жилые дома» выдвигает особые требования к воздухообмену для отдельных типов помещений: в жилых комнатах и спальнях – не менее 3 м<sup>3</sup>/м<sup>2</sup>, в кухнях – не менее 60 м<sup>3</sup>/час, в ванных комнатах и туалетах – не менее 25 м<sup>3</sup>/час.

Чтобы гарантировать предусмотренный нормативами воздухообмен в зданиях, проектируются системы механической вентиляции. В простейшем случае – в кухнях, ванных комнатах и туалетах – устанавливаются вытяжные вентиляторы загрязненного воздуха, которые в этих помещениях создают разрежение, а приточный воздух проникает в здание через неплотности в ограждающих конструкциях здания, специальные щели в оконных рамах или вспомогательные вентиляционные устройства в наружных стенах.

Однако следует помнить, что механические системы вытяжной вентиляции выбрасывают из здания загрязненный, влажный, теплый воздух, а компенсировать потерянное тепло, необходимое для обогрева входящего снаружи воздуха, должна система отопления, при проектировании которой необходимо предусмотреть резерв соответствующей мощности, и для котла отопления, и радиаторов. Необходимо учесть, что создаваемое механическими вытяжными системами разрежение может помешать работе каминов или печей, если таковые имеются в здании.

Если для помещений предусматривается только система каналов естественной вытяжной вентиляции, необходимо учесть, что и в этом случае система отопления должна компенсировать тепло, потерянное через эти вентиляционные каналы. Необходимо отметить и то, что достаточная или даже чрезмерная тяга в таких вентиляционных каналах наблюдается только в зимнее время, а в весенний/осенний период, и тем более летом, тяга не удовлетворяет нормативам обеспечения соответствующего воздухообмена.

Современным требованиям сохранения окружающей среды и экономии энергии наиболее полно соответствуют механические системы приточной/вытяжной вентиляции, в которых возможна утилизация тепла загрязненного, выходящего из здания воздуха. В этом случае в здании необходимо построить механическую систему приточной/вытяжной вентиляции, необходимо найти в здании место для размещения оборудования обработки вентиляруемого воздуха и необходимо создать систему приточных/вытяжных воздухопроводов.

При выборе любой из упомянутых систем вентиляции необходимо разработать проект этой системы, в котором определяется диаметр и размещение воздухопроводов, воздухораспределительные решетки, мощность вентиляционного оборудования и принципы его управления.

В соответствии с техническим проектом системы вентиляции здания, во время установки несъемной опалубки системы Dobeles panelis в опалубке несущих перегородок и перекрытий между стержнями перед бетонированием размещают предусмотренные проектом воздухопроводы, которые соединяются в общую систему. Воздухопроводы системы вентиляции, также как и трубопроводы отопления, удобно размещать в каналах панелей. Если диаметр воздухопроводов не допускает их размещение в каналах панелей, то после твердения бетона в пенополистироле необходимо создать расширенные каналы, в которых можно встроить воздухопроводы, канализационные и водопроводные трубы увеличенного диаметра.

Диаметр воздухопроводов следует определить посредством аэродинамического расчета системы. Приблизительно можно оценить, что по воздухопроводу диаметра 100 мм могут перемещаться потоки не более 150 м<sup>3</sup>/час в механических системах вентиляции и не более 25 м<sup>3</sup>/час в вертикальном воздухопроводе естественной вентиляции. В свою очередь, если существует геометрический объем для размещения воздухопровода Ø200 мм, появляется возможность перемещать до 600 м<sup>3</sup>/час в механических системах вентиляции и до 100 м<sup>3</sup>/час в каналах естественной вентиляции.

### 4.3. Кондиционирование воздуха зданий системы Dobeles panelis

Здания системы Dobeles panelis идеально подходят для установки систем охлаждения воздуха самых разных конструкций, чтобы в помещениях летом обеспечить комфортные условия.

Желательно перед бетонированием стен и перекрытий в опалубке разместить соответствующие закладные детали, чтобы облегчить установку кондиционеров воздуха на стадии отделочных работ в здании.

Следует помнить, что так называемые оконные кондиционеры воздуха (window air conditioner) удобно встраивать также в наружные стены здания, если в необходимых местах в наружных стенах будут оставлены необходимые для соответствующих кондиционеров отверстия. При таком способе установки оконных кондиционеров воздуха они не закрывают окна и могут успешно использоваться при создании внутреннего интерьера помещений.

Если для охлаждения помещений предусмотрено использование устанавливаемых на полу мобильных или монтируемых на стенах кондиционеров воздуха разделенной системы сплит-систем ??? (split air conditioners), в наружных стенах здания необходимы относительно небольшие отверстия диаметром приблизительно 100 мм. Столь небольшие отверстия в наружных стенах можно создать и после бетонирования, но целесообразно перед началом бетонирования в необходимых местах разместить соответствующие закладные детали (например, отрезки пластмассовой канализационной трубы).

Установку кондиционеров воздуха следует доверить специализированной фирме, которая оценит необходимую мощность охлаждения для каждого помещения и соответственно порекомендует наиболее соответствующую систему кондиционирования или охлаждения воздуха.

#### Sources

1. Латвийский строительный норматив LBN 211-98 «Daudzstāvu daudzdzīvokļu dzīvojamie nami».
2. Латвийский строительный норматив LBN 208-00 «Publiskas ēkas un būves».
3. Латвийский строительный норматив LBN 231-03 «Dzīvojamā un publisko ēku apkure un ventilācija».
4. Латвийский строительный норматив LBN 201-96 «Ugunsdrošības normas».
5. [www.likumi.lv/pdf](http://www.likumi.lv/pdf)
6. Директива Европейского парламента 2002/91/ЕК (6 декабря 2002 г.; на латышском языке – TK.doc; Directive EPB.pdf).

# 5. Строительная акустика<sup>1</sup>

## 5.1. Общие положения

Шум является фактором, который неблагоприятно влияет на человека, понижает его работоспособность и вредит здоровью. Поэтому одна из задач строительной акустики при проектировании зданий различного назначения – оградить людей от повседневных шумов в этих зданиях.

В развитых государствах Европы существуют национальные стандарты, нормы которых обеспечивают защиту людей от определенных шумов. И в Латвии создан такой строительный норматив [2]. В дальнейшей перспективе в Европейском союзе будут созданы более или менее единые стандарты по строительной акустике.

Шумы в зданиях можно разделить по способу их возникновения и распространения.

1. Если шум в здании создается в каком-то помещении и распространяется по воздуху через стены в соседние помещения, то изоляцию такого распространения звука описывают индексом воздушной изоляции звука  $R'_w$ , и его измеряют в децибелах (дБ). Это число, которым оценивают звукоизоляцию внутренних ограждающих конструкций здания, учитывая распространение звука и через ограждающую конструкцию, и через расположенные рядом конструкции – побочные пути. В лабораторных условиях, исключая побочные пути, звукоизоляцию внутренней ограждающей конструкции здания характеризует индекс изоляции звука в воздухе  $R_w$  (дБ).

2. Если шум образуется в результате удара при столкновении каких-либо тел с ограждающими конструкциями здания, его называют ударным шумом, и его изоляцию характеризуют приведенным индексом уровня ударного шума  $L'_{n,w}$  (дБ). Эта величина характеризует изоляцию ударного шума в реальных условиях, учитывая распространение звука и по побочным путям. В лабораторных условиях, исключая побочные пути, получают приведенный индекс уровня ударного шума (ударного звука)  $L_{n,w}$  (дБ).

3. Если шум в здание проникает извне через наружные ограждающие конструкции здания, то его характеризует индекс изоляции звука в воздухе  $R'_{tr,s,w}$  (дБ), который оценивает звукоизоляцию между помещением и внешней средой.

Упомянутые характеристики ограждающих конструкций в большой степени зависят от частоты звуковых колебаний, и эту зависимость можно измерить экспериментально и в конкретном здании, и в лабораторных условиях (в 1 и 2 случае).

## 5.2. Измерение звука

Ухо молодого человека звук воспринимает в диапазоне частот 16-20 000 Гц (с возрастом это интервал сужается) и границы звукового давления от  $2 \cdot 10^{-5}$  до 20 Па. Чувствительнее всего ухо человека к диапазону частот 1000-5000 Гц. Звук, частота которого менее 16 Гц, называют инфразвуком, а звук, частота которого более 20 000 Гц – ультразвуком. Наименьшую интенсивность или давление звука, которое человеческое ухо еще способно уловить, называют порогом слышимости, а максимальное – болевым порогом. Для описания такого диапазона давления или интенсивности звука целесообразно ввести внесистемную единицу измерения децибел (дБ) с формулой:

$$L = 20 \cdot \lg \frac{p}{p_0} = 10 \cdot \lg \frac{I}{I_0} \quad (5.1)$$

где  $p$  – звуковое давление, Па;

$p_0$  – порог слышимости,  $2 \cdot 10^{-5}$  Па, приблизительно при 1000 Гц;

<sup>1</sup> Требования и расчеты, аналогичные представленным в разделе, должны соответствовать нормативным документам конкретной страны.

$I$  – интенсивность звука, Вт/м<sup>2</sup> ( $I = \frac{P^2}{\rho v}$ );

$I_0$  – интенсивность звука нулевого уровня, 10-12 Вт/м<sup>2</sup> ( $I_0 = \frac{P_0^2}{\rho v}$ );

$\rho$  – плотность воздуха, приблизительно 1,2 кг/м<sup>3</sup>;

$v$  – скорость распространения звука в воздухе, 343 м/с.

При определении величины  $L$  учитывается функция слышимости уха человека (зависимость слуха человека от частоты).

При попадании звуковых волн на ограждающие конструкции, звук частично отражается и частично поглощается.

Интенсивность поглощенного звука определяет коэффициент абсорбции поглощения звука  $\alpha$ :

$$\alpha = \frac{I_{\text{abs}}}{I_{\text{krit}}} \quad (5.2)$$

где  $I_{\text{abs}}$  – интенсивность абсорбированного звука;

$I_{\text{krit}}$  – интенсивность падающего на конструкцию звука.

Величина  $\alpha$  может изменяться в пределах от 0 до 1 и в большой степени зависит от частоты звука. Умножая площади поверхности отдельных помещений помещения на коэффициенты звукопоглощения этих материалов, получается эквивалентная площадь абсорбции  $A$  помещения:

$$A = \sum_i \alpha_i \cdot S_i \quad (5.3)$$

где  $S_i$  – площадь поверхности  $i$ -го элемента, м<sup>2</sup>;

Эквивалентная площадь абсорбции равна такой условной площади поверхности, которая поглощает звук полностью на 100%. Если в помещении создан звук, то при выключении источника звука он постепенно прекращается. Время, в течение которого уровень звука уменьшается на 60 дБ, называют временем реверберации ( $T$ ). Между временем реверберации  $T$ , площадью абсорбции  $A$  (м<sup>2</sup>) и объемом помещения  $V$  (м<sup>3</sup>) существует зависимость Сабина:

$$T = 0,16 \frac{V}{A} \quad (5.4)$$

При распространении звука через ограждающую конструкцию из одного помещения в другое звукоизоляция характеризуется индексом звукоизоляции  $R_w$  или  $R_w'$ :

$$R_w = 10 \cdot \lg \frac{I_1}{I_2} \quad (5.5a)$$

$$R'_w = 10 \cdot \lg \frac{I_1}{I_2'} \quad (5.5b)$$

где  $I_1$  – интенсивность падающего на ограждающую конструкцию звука;

$I_2$  – интенсивность проходящего через ограждающую конструкцию звука без побочных путей (в лабораторных условиях);

$I_2'$  – с учетом побочных путей звука через другие конструкции.

Так как интенсивность звука измерить труднее, чем звуковое давление, для измерения индекса звукоизоляции используют измерения уровня звука  $L$ . В одном (первичном) помещении размещают источник звука, а во втором (вторичном) приемник. Измеряя время реверберации вторичного помещения по формуле Сабина можно определить эквивалентную площадь абсорбции ( $A_2$ ) помещения, и тогда индексы звукоизоляции рассчитывают по формулам:

$$R'_{w} = L_1 - L_2' + 10 \cdot \lg \frac{S}{A_2} \quad (5.6a)$$

$$R_w = L_1 - L_2 + 10 \cdot \lg \frac{S}{A_2} \quad (5.6b)$$

где  $L_1, L_2$  – средние уровни звука помещений ( $L_2'$  – с учетом побочных путей);  
 $S$  – площадь ограждающей поверхности, м<sup>2</sup>.

Так как величины  $R'_{w}$  и  $R_w$  зависят от частоты, то в среднем для определения индекса используется стандартизированная частотная характеристика.

Индекс приведенного уровня ударного шума (звука удара) измеряют подобно индексу звукоизоляции. Разница в том, что звук удара создает специальный генератор ударного звука. В этом генераторе пять грузов (масса каждого – 500 г), которые один за другим падают с высоты 4 см на пол 10 раз в секунду, создавая в первичном помещении ударный звук.

Индекс  $L'_{n,w}$  определяют по формуле:

$$L'_{n,w} = L_2 + 10 \cdot \lg \frac{A_2}{A_0} ; A_0 = 10 \text{ м}^2. \quad (5.7)$$

Аналогично для определения величин  $R'_{w}$  и  $R_w$  в среднем, а также для определения  $L'_{n,w}$  используют стандартизированную частотную характеристику.

### 5.3. Звукопоглощение и звукоизоляция

Звукопоглощение различных материалов на практике используют для создания слоев звукоизоляции. В Латвийском строительном нормативе LBN 016-03 «Строительная акустика» [2] нормированными величинами звукоизоляции являются индекс звукоизоляции  $R'_{w}$ , приведенный индекс уровня ударного шума  $L'_{n,w}$  и минимальный индекс звукоизоляции в воздухе  $R'_{tr,s,w}$  в зависимости от уровня внешних шумов. Индекс звукоизоляции в воздухе должен быть не меньше величин, указанных в таблицах приложения 2 и 3 к LBN 016-03, а приведенные индексы уровня ударного шума не должны превышать величины, упомянутые в таблицах. Приведенные в таблицах приложения значения индекса  $R'_{w}$  нормируют требуемую звукоизоляцию между помещениями в вертикальном и горизонтальном направлении. Индекс  $L'_{n,w}$  обозначает необходимую изоляцию ударного шума во всех направлениях (по вертикали, горизонтали, диагонали). Соответствие требованиям изоляции ударного шума определяют для помещений с площадью поверхности пола по крайней мере 2,5 м<sup>2</sup>. Например, в строительном нормативе LBN 016-03 [2] выдвинуто требование, что между жилыми помещениями квартир индекс изоляции звука в воздухе  $R'_{w}$  не должен быть меньше 54 дБ.

В литературе [1] описаны четыре типа ограждающих конструкций, с помощью которых можно достичь необходимой звукоизоляции. В трех из этих типов в качестве уменьшающего звук элемента фигурирует толстая и массивная стена. Звукопроницаемость массивной стены определяет так называемый закон массы, в соответствии с которым в определенном частотном диапазоне индекс звукоизоляции увеличивается при увеличении частоты звуковых колебаний и нормированной к площади массы стены  $m'$  (кг/м<sup>2</sup>):

$$R = 20 \cdot \lg(f \cdot m') - 47; \quad (\text{дБ}) \quad 5.8$$

где  $f$  – частота звука, Гц.

Например, как показано в литературе [1], при частоте 244 Гц и  $m'=410 \text{ кг/м}^2$  индекс звукоизоляции  $R$ , рассчитанный по формуле (5.8), дает 53 дБ. Для конструкции стены системы Dobeles panelis, в которой учтена только звукоизоляция железобетонного слоя (толщина железобетонного слоя 0,15 м; плотность 2400 кг/м<sup>3</sup> [3];  $m'=360 \text{ кг/м}^2$ ), применяя формулу (5.8), получаем 52 дБ. Звукоизоляцию еще дополнительно повышают и слои теплоизоляции из легкого материала (пенополистирола), которые в конструкциях стен системы Dobeles panelis находятся по обеим сторонам массивной железобетонной конструкции. Таким образом, можно ожидать, что конструкции стен системы Dobeles panelis будут обладать хорошим индексом звукоизоляции. С системами, которые аналогичны системе Dobeles panelis и их техническими данными (в том числе и со звукоизоляцией) читатель дополнительно может ознакомиться и в Интернете [4, 5, 6]. Эту теорию для системы Dobeles panelis подтверждают акустические проверки аналогичной конструкции PLASTBAU-3, проведенные в Италии в соответствии с 1 частью стандарта UNI EN ISO 717 1997 года (протокол № 141742). Проверенная строительная конструкция с площадью 11,8 м<sup>2</sup> состоит из железобетонного стенового элемента толщиной 150 мм, с обеих сторон которого расположены слои EPS 200 толщиной 50 мм и плотностью 30 кг/м<sup>3</sup>. С учетом наружных отделочных слоев общая толщина конструкции составляет 320 мм. После выполнения акустических проверок установлено, что индекс изоляции звука в воздухе этой строительной конструкции  $R'_w = 60 \text{ дБ}$ .

### Литература

1. I. Veits. Aizsardzība pret skaņu pārnēsi ēkās un attiecīgie starptautiskie standarti.– Zinātniski praktiskais seminārs: «Ēku norobežojošo konstrukciju siltumtehnikā». – Rīga, 16.–17.03.2000. 18-1 līdz 18-13 lpp.
2. Латвийский строительный норматив LBN 016-03 «Būvakustika».
3. 3. Латвийский строительный норматив LBN 002-01 «Ēku norobežojošo konstrukciju siltumtehnikā». Утвержден Кабинетом министров правилами № 495 от 27 ноября 2001 г.4. <http://www.sstburo.ru>
4. <http://www.sstburo.ru>
5. [http://www.sukiennik.pl/html\\_rus/stropy\\_styropianowe\\_rus.html](http://www.sukiennik.pl/html_rus/stropy_styropianowe_rus.html)
6. <http://www.plastbau-m.ru/topics.php?topicID=25>