

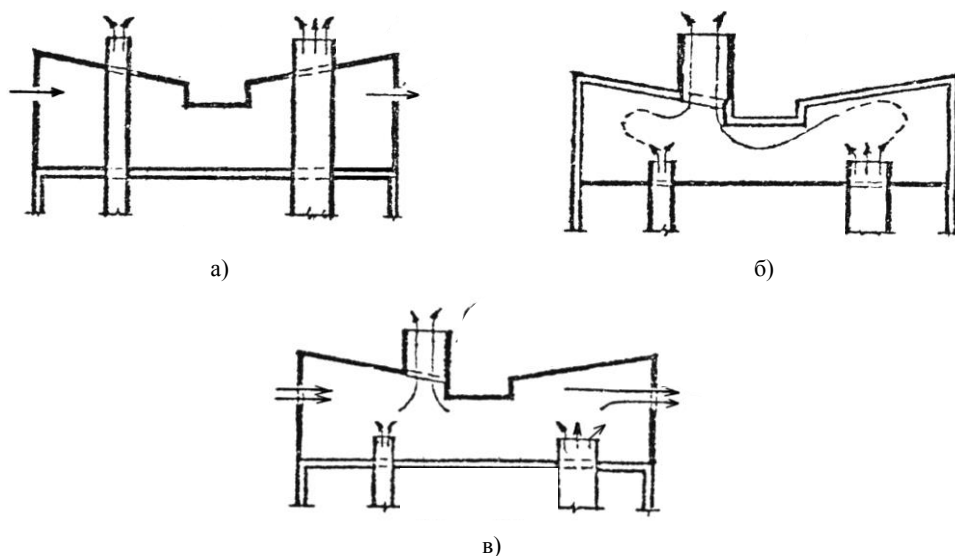
УДК 697:721.011.25

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДИКИ ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКОГО РАСЧЕТА
ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ**

*канд. техн. наук, доц. В.И. ЛИПКО
(Полоцкий государственный университет)*

Проведен теплотехнический расчет ограждающих конструкций теплого чердака с учетом исключения конденсации влаги на их внутренних поверхностях для определения конструкций наружных стен и покрытия таким образом, чтобы температура на внутренних поверхностях в условиях эксплуатации не снижалась ниже температуры точки росы, которую определяют по $J-d$ диаграмме для воздуха, поступающего в пространство теплого чердака из каналов вытяжных вентиляционных систем.

Чердак, ограждения, теплообмен, конденсация, воздухообмен, нормализация, эксплуатация. Крыши с чердаками являются основным решением при проектировании сборных железобетонных крыш жилых и общественных зданий. Специальным письмом Госстроя СССР № МК-3-4106 от 12.12.84 г. применение бесчердачных крыш на жилых зданиях любой этажности строго запрещено. Взамен крыш с холодными чердаками (рис., а) для холодных климатических районов рекомендованы крыши с теплыми чердаками (рис., б), а для южных регионов – крыши с открытыми чердаками (рис., в).



Примеры исполнения крыш с чердачным объемом:
а – холодный чердак; б – теплый чердак; в – открытый чердак

В крышах с холодным чердаком (см. рис., а) утеплитель укладывается по полу чердака, а боковые ограждения и кровля утеплителя не имеют, из-за чего атмосферная влага из воздуха конденсируется на их внутренних поверхностях и попадает на утеплитель, снижая его теплозащитные свойства и увлажняя верхнюю часть здания с соответствующими негативными последствиями.

В крышах с открытым чердаком (см. рис., в) утеплитель также укладывается по полу чердака, но, в отличие от холодного чердака, оголовки вытяжных вентиляционных блоков открываются в объем чердака, из которого предусмотрена только одна вытяжная шахта в пределах одной секции здания, и при этом чердак отапливается по схеме воздушного отопления, совмещенного с вытяжной вентиляцией.

Поскольку температура удаляемого вытяжными системами вентиляционного воздуха ($t_{уд}$) составляет 18...20 °С, то конденсации влаги на внутренних поверхностях не будет из-за активного проветривания чердачного объема через увеличенные площади сечений боковых вентилирующих отверстий. Недостатками крыш с открытыми чердаками являются:

- интенсивное проветривание объема чердака приводит к переохлаждению покрытий верхних этажей и повышенному расходу утеплителя;
- из-за разрыва потока вытяжного воздуха, удаляемого из верхних этажей через отдельные ответвления вытяжных вентиляционных блоков, естественного гравитационного давления оказывается не

достаточно для преодоления аэродинамического сопротивления, что вызывает явление «опрокидывание циркуляции», когда через вытяжные решетки отработанный загрязненный воздух из объема чердака выдавливается в жилые помещения, что приводит к дискомфорту микроклимата;

- для зданий с наружными ограждениями повышенной герметичности доступ свежего наружного воздуха за счет инфильтрации ограничен, и создание нормируемых воздухообменов в жилых помещениях только за счет вытяжной вентиляции становится весьма проблематичным, а зачастую приводит к накоплению бытовой влаги во внутреннем воздухе и повышенной загазованности, снижающих санитарно-гигиенические параметры микроклимата.

Аналогичные недостатки присущи и для крыш с теплыми чердаками (см. рис., б), так как при таком конструктивном решении вытяжные каналы, открывающиеся через оголовки в объем чердака, расположены на различном расстоянии от вытяжной шахты и поэтому одинаковых аэродинамических условий их работы обеспечить невозможно, что приводит к нарушению воздушного режима здания в целом, а также к конденсации влаги на охлаждаемых внутренних поверхностях наружных ограждений теплого чердака.

В соответствии с рекомендациями [2] высота теплого чердака принята переменной от 1,6 до 1,7 м. Таким образом, объем теплого чердака одинаковый для зданий любой этажности, тогда как расход вытяжного воздуха, выходящий через оголовки вентиляционных блоков в объем чердака, пропорционален количеству этажей здания, что оказывает существенное влияние на аэродинамику и эксплуатационные характеристики систем естественной вентиляции.

Для вентиляционного воздуха, удаляемого из жилых и вспомогательных помещений по условиям комфортности и санитарных норм при температуре $t_{уд} = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $\Phi_v = 60\%$, температура точки росы, при которой возможна конденсация влаги, составляет $t_{m.p.} = 12,5\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Таким образом, в целях исключения конденсации влаги из воздуха, его температура в теплом чердаке не должна снижаться ниже температуры точки росы и не контактировать с поверхностями наружных ограждений, имеющих более низкую температуру, т.е. должно выдерживаться первое условие

$$t_{в.н.м.ч} \geq t_{m.p.} > 12,5\text{ }^{\circ}\text{C}. \quad (1)$$

По условиям воздушного отопления, работающего в режиме рециркуляции, количество теплоты, которое возможно использовать для отопления теплого чердака в соответствии с первым условием исключения конденсации влаги, определится из выражения

$$Q_{в.о.} = L\phi c_v (t_n - t_{в.м.ч}), \quad (2)$$

где $L\phi$ – суммарный воздухообмен изолированной части (секции) теплого чердака, $\text{м}^3/\text{ч}$; c_v – объемная теплоемкость воздуха, $\text{Вт}/\text{м}^3$; t_n – температура воздуха, поступающего из вытяжных каналов в пространство теплого чердака, $t_n = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$; $t_{в.м.ч}$ – температура внутреннего воздуха теплого чердака $t_{в.м.ч} = 12,5\text{ }^{\circ}\text{C}$.

По условиям теплового баланса для обеспечения внутренней температуры $t_{в.м.ч} = 12,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ вся поступающая теплота $Q_{в.о.}$ должна расходоваться на компенсацию теплопотерь через наружные ограждающие конструкции теплого чердака, включая теплопотери через наружные стены $Q_{н.с.}$ и теплопотери через покрытие Q_n , т.е. должно выдерживаться равенство:

$$Q_{в.о.} = Q_{н.с.} + Q_n. \quad (3)$$

В развернутом виде уравнение (3) запишется в виде

$$Q_{в.о.} = \kappa_{н.с.} F_{н.с.} (t_{в.м.ч} - t_n) + \kappa_n F_n (t_{в.м.ч} - t_n)$$

или после преобразований получим:

$$Q_{в.о.} = (\kappa_{н.с.} F_{н.с.} + \kappa_n F_n) \cdot (t_{в.м.ч} - t_n); \quad (4)$$

$$\frac{Q_{в.о.}}{t_{в.м.ч} - t_n} = \frac{F_{н.с.}}{R_{н.с.}} + \frac{F_n}{R_n}. \quad (5)$$

Уравнение (4) описывает математически процессы тепломассообмена, протекающие в пространственном объеме теплого чердака при прохождении через него вентиляционного воздуха. Это уравнение,

где неизвестными величинами являются значения термических сопротивлений наружных ограждений покрытия R_n и наружных стен $R_{н.с}$, решается методом подбора конструкций наружных стен и покрытия таким образом, чтобы удовлетворялось условие (1).

Поскольку по условиям эксплуатации зданий с теплыми чердаками наружные стены чердака должны быть такими же по конструктивному исполнению, как и наружные стены жилых помещений, для которых согласно СНБ 2.01.01-93 термическое сопротивление ($R_{н.с}$) принимается равным $2,5 \text{ м}^2 \cdot \text{°C/Вт}$, то значения термического сопротивления для покрытия теплого чердака также должно быть не менее $R_{н.с} = R_n$, и тогда уравнение (5) после подстановки значений $R_{н.с} = R_n = 2,5 \text{ м}^2 \cdot \text{°C/Вт}$ выглядит следующим образом:

$$\frac{Q_{в.о.}}{t_{в.м.ч} - t_n} = \frac{F_{н.с} + F_n}{2,5},$$

а после подстановки значений $t_{в.м.ч}$ и t_n получим:

$$\frac{Q_{в.о.}}{12,5 - (-25)} = \frac{F_{н.с} + F_n}{2,5};$$

и далее

$$Q_{в.о.} = 15(F_{н.с} + F_n). \quad (6)$$

Записав левую часть уравнения (6) в виде (2), получим

$$L\phi c_{\phi}(t_n - t_{в.м.ч}) = 15(F_{н.с} + F_n). \quad (7)$$

Подставив в выражение (7) известные величины

$$L\phi 1,01(20 - 12,5) = 15(F_{н.с} + F_n),$$

запишем его решение относительно $L\phi$:

$$L\phi = 2(F_{н.с} + F_n). \quad (8)$$

Зависимость (8) характеризует соотношения аэродинамических характеристик с конструктивными параметрами теплых чердаков в многоэтажных зданиях, обеспечивающих тепломассообменные процессы, формирующие естественную вентиляцию здания, исключаящие конденсацию влаги на внутренних поверхностях наружных ограждающих конструкций теплых чердаков.

Анализируя полученную формулу (8), можно сделать вывод, что оптимальный воздухообмен должен равняться удвоенной площади наружных ограждений пространственного объема части (секции) теплого чердака.

Решение обратной задачи по подбору суммарной площади наружных ограждений при известных значениях $L\phi$ определится из выражения:

$$(F_{н.с} + F_n) = 0,5L\phi. \quad (9)$$

Для определения зависимости величины сопротивления теплопередачи R для наружных стен и покрытия теплого чердака при переменных значениях количества теплого вытяжного воздуха L_{ϕ} , проходящего через объем секции теплого чердака, перепишем уравнение теплового баланса в виде:

$$L\phi c_{\phi}(t_n - t_{в.м.ч.}) = \frac{F_{н.с} + F_n}{R}(t_{в.м.ч.} - t_n)$$

или после подстановки известных и принятых величин имеем

$$L\phi(20 - 12,5) = \frac{F_{н.с} + F_n}{R} \cdot [12,5 - (-25)],$$

а после преобразований получим в окончательном виде:

$$R = 5 \frac{F_{н.с} + F_n}{L\phi}. \quad (10)$$

Исключить конденсацию влаги на внутренних поверхностях секционного объема теплого чердака для зданий различной этажности при переменной величине объема вытяжного воздуха L_{ϕ} возможно двумя способами:

- первый способ предполагает в соответствии с действующей нормативной базой, предусматривающей равные условия теплозащиты наружных ограждений здания и объема теплого чердака, повышение объема за счет высоты теплого чердака при повышении этажности здания;
- второй способ сохраняет объем и конструктивные размеры теплого чердака, но изменяет теплозащитные характеристики наружных ограждений стен и покрытия теплого чердака при повышении этажности здания, что потребует корректировки нормативной базы.

Таким образом, получена формула (10) для определения значения величины термического сопротивления ограждающих конструкций покрытия и наружных стен при равных конструктивных решениях теплого чердака, заданных величинах воздухообменов (L_{ϕ}) и этажности зданий, исключающих повышение температуры проходящего транзитом через объем теплого чердака вытяжного воздуха, вызывающее конденсацию водяных паров на внутренних поверхностях наружных ограждений, что не учитывается при новом строительстве и тепловой реабилитации реконструируемых зданий действующей нормативной базой.

Снижение безвозвратных трансмиссионных потерь теплоты зданием в современном градостроительстве осуществляется за счет устройства дополнительной теплозащиты наружных ограждений. Для этой цели при реконструкции зданий устраивается, как правило, так называемая «термошуба», состоящая из прикрепляемого к стене утеплителя и защитно-декоративного слоя по всему зданию, либо локально в зонах переохлаждения, например, на торцевых фасадах.

Такое «латание дыр» в виде дорогостоящих «термошуб» не всегда оправданно, так как выравнивание теплозащитных характеристик целесообразнее выполнять расчетным путем на стадии проектирования здания.

С учетом этих тенденций методика теплотехнического расчета ограждающих конструкций для систем воздушного отопления герметичных зданий должна базироваться на основе теплового баланса по критерию энергоресурсосбережения в следующем виде.

При теплотехническом расчете с целью определения тепловой мощности системы отопления здания составляется тепловой баланс, в котором теплонедостатки определяются как разность суммарных теплопотерь и теплопоступлений:

$$Q_{co} = \sum Q_{nom} - \sum Q_{пост}, \quad (11)$$

где Q_{co} – теплонедостаток, т.е. расчетная мощность системы отопления, Вт; $\sum Q_{nom}$ – суммарные тепловые потери помещениями, Вт; $\sum Q_{пост}$ – суммарные теплопоступления в помещения, Вт.

Для жилых зданий с неорганизованным притоком наружного воздуха за счет инфильтрации тепловая мощность системы отопления равна

$$Q_{co} = Q_{огр} + Q_u - Q_{быт},$$

где $Q_{огр}$ – теплопотери через ограждающие конструкции, Вт; Q_u – теплотраты на нагревание инфильтрующегося наружного воздуха, Вт; $Q_{быт}$ – бытовые тепловыделения, Вт.

Для жилых зданий с воздушным отоплением тепловой баланс запишется в виде:

$$Q_{в.о.} = Q_{огр} + Q_v - Q_{быт}. \quad (12)$$

Это уравнение перепишем иначе:

$$Q_{в.о.} + Q_{быт} = Q_{огр} + Q_v. \quad (13)$$

Если задаться начальным условием:

$$Q_{во} = Q_v, \quad (14)$$

то тогда из (13) очевидно, что

$$Q_{огр} = Q_{быт}. \quad (15)$$

Запишем уравнение (15) в развернутом виде для помещения промежуточного этажа:

$$\left(\frac{F_{нс}}{R_{нс}} + \frac{F_{ок}}{R_{ок}} \right) \cdot (t_v - t_n) = 21F_n, \quad (16)$$

$$R_{nc} = \frac{F_{nc}}{\frac{21F_n}{t_g - t_n} - \frac{F_{ок}}{R_{ок}}}.$$

откуда

В развернутом виде значение величины R_{nc} , например, для бетонной стены с эффективным слоем утеплителя, можно записать в виде:

$$R_{nc} = \frac{1}{\alpha_g} + \frac{\delta_b}{\lambda_b} + \frac{\delta_{ym}}{\lambda_{ym}} + \frac{1}{\alpha_n}.$$

Толщина наружного и внутреннего слоев бетона принимается конструктивно из условий прочности, и тогда искомая величина промежуточного эффективного слоя утеплителя определится из выражения:

$$\delta_{ym} = \lambda_{ym} \left[R_{nc} - \left(\frac{1}{\alpha_g} + \frac{\delta_b}{\lambda_b} + \frac{1}{\alpha_n} \right) \right]. \quad (17)$$

Для помещения верхнего этажа бесчердачного здания формула (16) запишется в виде:

$$\left(\frac{F_{nc}}{R_{nc}} + \frac{F_{ок}}{R_{ок}} + \frac{F_{пол}}{R_{пол}} \right) \cdot (t_g - t_n) = 21 \cdot F_n,$$

$$R_{nc} = \frac{F_{nc}}{\frac{21 \cdot F_n}{t_g - t_n} - \left(\frac{F_{ок}}{R_{ок}} + \frac{F_{пол}}{R_{пол}} \right)}. \quad (18)$$

откуда

При теплотехническом расчете конструктивного исполнения наружной стены для помещений первого этажа зданий с неотапливаемым подвалом формула (16) переписывается в виде:

$$\left(\frac{F_{nc}}{R_{nc}} + \frac{F_{ок}}{R_{ок}} + \frac{F_{нок}}{R_{нок}} \right) \cdot (t_g - t_n) = 21 F_n,$$

тогда значение R_{nc} определится из выражения:

$$R_{nc} = \frac{F_{nc}}{\frac{21 \cdot F_n}{t_g - t_n} - \left(\frac{F_{ок}}{R_{ок}} + \frac{F_{нок}}{R_{нок}} \right)}.$$

Таким образом, изначально принятые условия равенства (15) позволяют за счет незначительных изменений толщины эффективного слоя утеплителя (δ_{yt}), определяемого по формуле (17) при подборе конструкции наружной стены на основании теплотехнического расчета, получить выровненный тепловой режим эксплуатации для всех помещений, включая нижние, верхние, промежуточные и даже угловые помещения.

Равные условия обеспечения теплового режима эксплуатации всех помещений, вне зависимости от их расположения в здании, позволяют создать условия выполнения второго равенства (14) из уравнения теплового баланса (13), при которых во все помещения системой воздушного обогрева здания подается приточный воздух с одинаковой температурой t_n , равной температуре внутреннего воздуха t_g .

Если в приточном центре наружный воздух подогревается до температуры t_g и распределяется по приточным каналам или воздуховодам без дополнительного или местного подогрева, то эксплуатация такой системы значительно упрощается и удешевляется, так как исключаются транзитные потери теплоты из-за отсутствия перепада температур и необходимости установки местных устройств автоматики и подогревателей.

Количество приточного воздуха L_n , м³/ч, определится по рекомендациям [5, прил. 19]:

$$L_n = 3F_n,$$

а расход теплоты Q_{np} на подогрев наружного воздуха в приточном центре от t_n до $t_g = t_n$ определится из выражения:

$$Q_{г.о.} = Q_g = Q_{np} = 0,28 L_n \rho_n C (t_g - t_n^B),$$

$$Q_{np} = 0,84 F_n \rho_n C (t_g - t_n^B),$$

или

где F_n – суммарная площадь пола жилых помещений, обслуживаемых системой воздушного отопления, м²; ρ_n – плотность наружного воздуха, кг/м³; C – теплоемкость воздуха, кДж/м³ °С; t_g – температура внутреннего воздуха, °С; t_n^B – расчетная наружная температура, принимается по параметрам B [5, прил. 8].

Для оценки теплотехнических показателей принятого конструктивно-планировочного решения расчет теплопотребления проектируемого здания обычно заканчивают определением удельной тепловой характеристики $q_{y\partial}$ по формуле:

$$q_{y\partial} = \frac{Q_{6.0}}{V_n(t_g - t_n^B)}, \text{ Вт/м}^3 \cdot \text{°С},$$

которую сравнивают со средними показателями для аналогичных зданий, принимаемых по [5, прил. 2].

Для зданий массовой жилой застройки там же предложена формула для определения удельной тепловой характеристики:

$$q_{y\partial} = 1,163 \left(0,37 + \frac{1}{H} \right), \quad (19)$$

где H – высота здания, м.

Из уравнения (19) очевидно, что величина $q_{y\partial}$ уменьшается с увеличением этажности и высоты здания.

Для жилых зданий, включая гостиницы и общежития, удельная тепловая характеристика здания

для населенных пунктов с расчетной наружной температурой $t_n^B = -30$ °С в зависимости от объема зданий V_n (3; 5; 10; 15; 20 тыс. м³) изменяет среднестатистические значения $q_{y\partial}$ (0,49; 0,44; 0,39; 0,36; 0,34 Вт/м³ °С).

Для других климатических условий вводится поправочный коэффициент (α), определяемый по [5, прил. 2] и для местных климатических условий Республики Беларусь этот коэффициент в расчетах можно усреднено принимать равным 1,08.

Однако приводимые в справочной литературе значения удельной тепловой характеристики для гражданских зданий, эксплуатируемых в режиме инфильтрации, значительно занижены, так как количество инфильтрующегося воздуха постоянно изменяется в переменных условиях отопительного периода (изменении барометрического и ветрового давлений, температуры наружного воздуха и т.п.), что приводит к переохлаждению зданий, и как следствие, повышению удельной тепловой характеристики.

Заключение

Создана методическая база для теплотехнического расчета ограждающих конструкций на основе составления воздушного и теплового балансов для каждого помещения в отдельности, а не для всего здания в целом, как это практикуется в настоящее время. При современном уровне компьютеризации такая детализация инженерных расчетов конструктивного исполнения каждого отдельного элемента наружной стены не является громоздкой, но дает значительные преимущества для применения энергоресурсоэффективной системы воздушного обогрева зданий, совмещенной с централизованным воздухообменом каждого помещения в соответствии с повышенными требованиями комфортности микроклимата [6 – 8].

ЛИТЕРАТУРА

1. СНБ 2.04.01-97. Строительная теплотехника. Мин-во архит. и строит. Респ. Беларусь. – Мн., 1998. – 32 с.
2. Беляев В.С., Хохлова Л.П. Проектирование энергоэкономичных зданий: Учеб. пособие для студ. вузов по спец. «Промышленное и гражданское строительство». – М.: Высш. шк., 1991. – 255 с.
3. Липко В.И. Вентиляция герметизированных зданий: В 2 т. – Новополоцк: Полоцкий гос. ун-т, 2000. – Т. 1: Теория расчета и реформирование вентиляции герметизированных помещений. – 300 с.; Т. 2: Сб. метод. материалов по энергосберегающей технологии вентиляции с примерами расчета и конструирования. – 246 с.
4. СНиП 2.04.05-91. Отопление, вентиляция и кондиционирование / Госстрой СССР. – М.: АПП ЦИТП, 1992. – 64 с.
5. Отопление и вентиляция жилых и гражданских зданий: Проектирование: Справочник / Г.В. Русланов, М.Я. Розкин, Э.Л. Ямпольский. – Киев: Будівельник, 1983. – 272 с.
6. Липко В.И. Методика расчета ограждающих конструкций теплого чердака с учетом исключения конденсации влаги // Строительство и архитектура. Перспективы развития новых технологий в стро-

- ительстве и подготовке инженерных кадров Респ. Беларусь: Материалы науч.-метод. межвуз. семинара / Брест. гос. техн. ун-т. – Брест, 2004. – С. 157 – 159.
7. Липко В.И. Совершенствование методов теплотехнического расчета наружных ограждающих конструкций // Строительство и архитектура. Перспективы развития новых технологий в строительстве и подготовке инженерных кадров Респ. Беларусь: Материалы науч.-метод. межвуз. семинара / Брест. гос. техн. ун-т. – Брест, 2004. – С. 160 – 164.
 8. Липко В.И. Энергоресурсоэффективное тепловоздухоснабжение гражданских зданий: В 2-х т. Т. 1. – Новополоцк: Полоцкий гос. ун-т, 2004. – 412 с.