

УДК 697.9

МЕТОДИКА РАСЧЁТА СИСТЕМ ВОЗДУШНОГО ОТОПЛЕНИЯ

канд. техн. наук, доц. В.И. ЛИПКО; С.В. ЛАНКОВИЧ
(Полоцкий государственный университет)

На основе действующей нормативной базы показано построение методики расчёта систем воздушного отопления зданий повышенной теплозащиты и герметичности наружных ограждающих конструкций с выполнением теплотехнического расчёта. Методика расчёта базируется на основных положениях теории аэродинамики и тепломассообмена, а также воздухообмена по нормативным параметрам с осреднением в пределах допустимых погрешностей для определения температуры приточного воздуха в помещениях и суммарного расхода тепловой энергии для систем воздушного отопления, совмещённого с активной вентиляцией.

Ключевые слова: воздушное отопление, теплопотери, теплопоступления, тепломассообменные процессы, воздухообмен, наружное ограждение, теплотехнический расчёт, утеплитель.

Введение. Последние научные разработки в области эффективного домостроения позволяют осуществить несложный переход к более энергоэкономичным системам воздушного отопления зданий, совмещённого с активной вентиляцией, что продуктивно в условиях постоянного увеличения в градостроительной практике использования абсолютно непроницаемых для воздуха материалов, таких как бетон, стекло, металл, пластмассы, клеи, герметики, мастики, гидро- и пароизоляционные материалы, исключающие возможность использования технологии естественной вентиляции, основанной на инфильтрации наружного воздуха через неплотности наружных ограждающих конструкций.

Широко применяемые в настоящее время в домостроении водяные системы отопления должны компенсировать не только теплопотери зданий через наружные ограждения, но ещё в большей степени нагревать воздух, поступающий неорганизованным путём в отапливаемые помещения, за счёт инфильтрации, что значительно увеличивает металлоёмкость и энергопотребление в процессе строительства и эксплуатации зданий в условиях длительного, свыше 200 суток отопительного периода для Республики Беларусь, при том, что и металл, и энергоресурсы импортного происхождения влияют на стоимость единицы национального валового продукта.

Основная часть. В соответствии с действующей нормативной базой [1–3] для систем водяного отопления суммарные теплопотери здания Q , Вт определяются по формуле:

$$Q_{\Sigma} = Q_m + Q_i - Q_b, \quad (1)$$

где Q_m – трансмиссионные основные и добавочные теплопотери наружных ограждающих конструкций здания, Вт; Q_i – расход теплоты на нагрев наружного воздуха за счёт инфильтрации, Вт; Q_b – бытовые теплопоступления жилых помещений и кухонь, Вт;

Трансмиссионные основные и добавочные теплопотери наружных ограждающих конструкций здания определяются по формуле

$$Q_m = Q_{НС} + Q_{ОК} + Q_{ПОЛ} + Q_{ПОКР}. \quad (2)$$

Здесь $Q_{НС} = \frac{F_{НС}}{R_{НС}}(t_g - t_n) \cdot (1 + \sum \beta) \cdot n$ – трансмиссионные основные и добавочные теплопотери через наружные стены, Вт;

$Q_{ОК} = \frac{F_{ОК}}{R_{ОК}}(t_g - t_n) \cdot (1 + \sum \beta) \cdot n$ – трансмиссионные основные и добавочные теплопотери через окна, Вт;

$Q_{ПОЛ} = \frac{F_{ПОЛ}}{R_{ПОЛ}}(t_g - t_n) \cdot n$ – трансмиссионные теплопотери через полы нижнего этажа или

перекрытие над подвалом неотапливаемого подвала, Вт; $Q_{ПОКР} = \frac{F_{ПОКР}}{R_{ПОКР}}(t_g - t_n) \cdot n$ – трансмиссионные теплопотери через верхнее покрытие или перекрытие верхнего этажа потолка, Вт;

$F_{НС}, F_{ОК}, F_{ПОЛ}, F_{ПОКР}$ – расчётная площадь охлаждаемых поверхностей наружных ограждений: стен, окон, пола нижнего этажа и потолка верхнего этажа, м²; $R_{НС}, R_{ОК}, R_{ПОЛ}, R_{ПОКР}$ – термическое сопротивление теплопередаче наружных ограждений: стен, окон, пола нижнего этажа и потолка верхнего этажа, м²·°С/Вт; t_g, t_n – расчётные нормативные внутренняя и наружная температуры воздуха соответственно, °С; β – коэффициент процентного отношения добавочных теплопотерь; n – коэффициент учёта расположения наружного ограждения.

Расход теплоты на нагрев наружного воздуха за счёт инфильтрации, Вт, определяемый из следующего выражения:

$$Q_i = 0,28 \cdot L_{np} \cdot \rho_n \cdot c \cdot (t_e - t_n) \cdot K, \text{ Вт}, \quad (3)$$

где $L_{np} = 3 \cdot F_n$ – расход наружного воздуха, поступающего в жилые помещения и кухню за счёт инфильтрации, м³/ч; $F_n = F_{жс} + F_{к}$ – расчётная площадь пола жилых помещений и кухни, м²; $\rho_n = \frac{353}{273 + t_n}$ – плотность наружного воздуха как функция от t_n , кг/м³; c – теплоёмкость воздуха, кДж/кг; K – коэффициент учёта влияния встречного теплового потока в конструкциях наружных ограждений.

Бытовые тепlopоступления согласно изменениям № 4 СНБ 4.02.01-03 определяются по формуле:

$$Q_{\sigma} = Q_h \cdot (1 - \eta), \text{ Вт}. \quad (4)$$

Здесь $Q_h = 9 \text{ Вт/м}^2$ – бытовые тепlopоступления для жилых зданий; η – коэффициент, зависящий от способа регулирования системы отопления здания.

Приведенное сопротивление теплопередаче R_0 теплотехнически ограждающей конструкции с последовательно расположенными однородными слоями [2, табл. 5.9 и 5.10]:

$$R_0 = r \cdot \left(\frac{1}{\alpha_e} + \sum \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_n} \right), \text{ м}^2 \cdot \text{°C/Вт}, \quad (5)$$

где r – расчетный коэффициент, учитывающий нарушения теплотехнической однородности ограждающей конструкции (коэффициент теплотехнической однородности); α_e – коэффициент теплоотдачи, принимается согласно [1, таблица 5.4]; δ_i – толщина слоя, м; λ_i – расчетный коэффициент теплопроводности материала слоя, многослойной наружной конструкции [2, таблица 4.2]; α_n – коэффициент теплоотдачи наружной поверхности, ограждающей конструкции для зимних условий, Вт/м²·°C.

Для расчёта толщины утеплителя δ_{ym} при равномерном утеплении ограждающих конструкций рассмотрим бесчердачное здание с плоской кровлей и неотапливаемым подвалом, представленное схематично на рисунке 1.

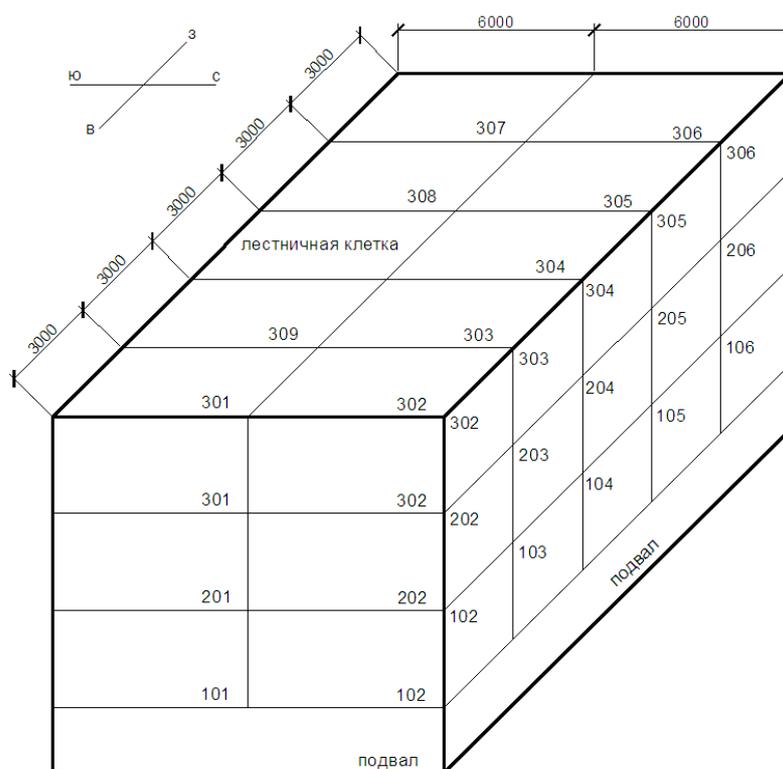


Рисунок 1. – Схема расположения жилых помещений и лестничной клетки в объёме здания

Планировка квартир представлена на рисунке 2, конструкции ограждений – на рисунках 3–5. Географический район строительства – город Минск. Ориентация здания показана на схеме (см. рисунок 1).

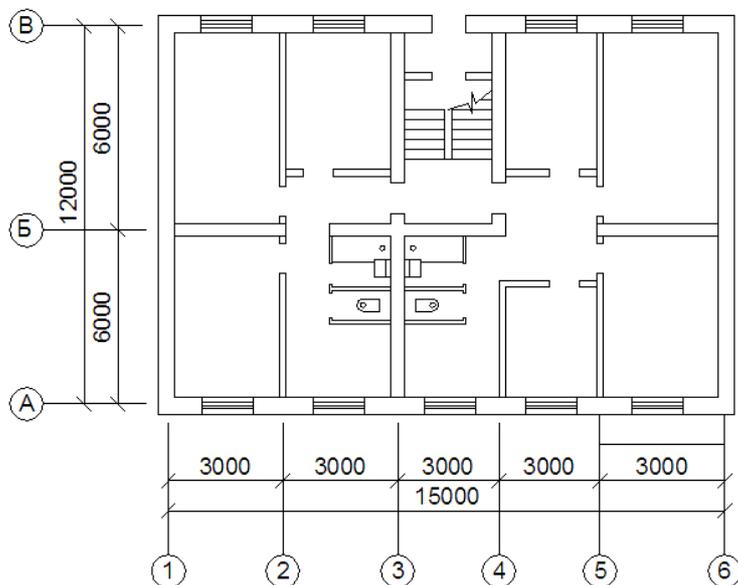
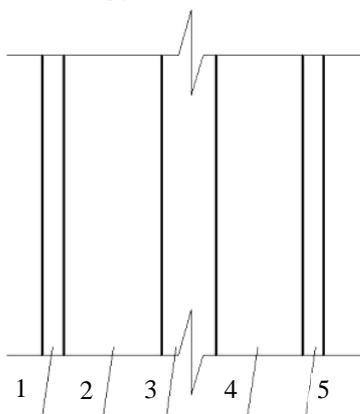


Рисунок 2. – Планировка квартир жилого дома

Конструктивно стеновая панель (рисунок 3) состоит из 5-ти слоев:



1 – слой наружной цементно-песчаной штукатурки

$\delta_1 = 0,02$ м, $\lambda_1 = 0,93$ Вт / м · °С, $s_1 = 11,09$ Вт / м² · °С;

2 – слой железобетона

$\delta_2 = 0,09$ м, $\lambda_2 = 2,04$ Вт / м · °С, $s_2 = 19,7$ Вт / м² · °С;

3 – слой утеплителя из плит пенополистирольных

$\delta_3 = 0,02$ м, $\lambda_3 = 0,05$ Вт / м · °С, $s_3 = 0,48$ Вт / м² · °С;

4 – слой железобетона

$\delta_4 = 0,06$ м, $\lambda_4 = 2,04$ Вт / м² · °С, $s_4 = 19,7$ Вт / м² · °С;

5 – слой внутренней известково-песчаной штукатурки

$\delta_5 = 0,02$ м, $\lambda_5 = 0,81$ Вт / м · °С, $s_5 = 9,76$ Вт / м² · °С

Рисунок 3. – Конструкция наружного ограждения

Запишем формулу (4) в развёрнутом виде для конструкции принятой к рассмотрению стеновой панели:

$$R_m = r \left(\frac{1}{\alpha_{\text{в}}} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3} + \frac{\delta_4}{\lambda_4} + \frac{\delta_5}{\lambda_5} + \frac{1}{\alpha_{\text{н}}} \right); \quad (6)$$

$$R_m = 0,8 \left(\frac{1}{8,7} + \frac{0,02}{0,93} + \frac{0,09}{2,04} + \frac{0,2}{0,05} + \frac{0,06}{2,04} + \frac{0,02}{0,81} + \frac{1}{23} \right) = 3,4 \text{ м}^2 \cdot \text{°С} / \text{Вт}.$$

Нормативное сопротивление теплопередаче наружной стены здания согласно [2, таблица 5.1] принимается равным $R_{m \text{ норм}} = 3,2 \text{ м}^2 \cdot \text{°С} / \text{Вт}$.

Таким образом, на основании выполненного теплотехнического расчета в соответствии с действующей нормативной базой для здания, принятого к рассмотрению, толщина эффективного слоя утепления стеновых панелей всех помещений будет одинаковой и составит 0,2 м.

Для определения величины расчетной наружной температуры t_n определим значение величины тепловой инерции принятой к рассмотрению стеновой панели согласно [1, п. 5.3] по формуле

$$D = \sum R_i \cdot s_i = R_1 \cdot s_1 + R_2 \cdot s_2 + R_3 \cdot s_3 + R_4 \cdot s_4 + R_5 \cdot s_5 = \frac{\delta_1}{\lambda_1} \cdot s_1 + \frac{\delta_2}{\lambda_2} \cdot s_2 + \frac{\delta_3}{\lambda_3} \cdot s_3 + \frac{\delta_4}{\lambda_4} \cdot s_4 + \frac{\delta_5}{\lambda_5} \cdot s_5; \quad (7)$$

$$D = \frac{0,02}{0,93} \cdot 11,09 + \frac{0,09}{2,04} \cdot 19,7 + \frac{0,2}{0,05} \cdot 0,48 + \frac{0,06}{2,04} \cdot 19,7 + \frac{0,02}{0,81} \cdot 9,76 =$$

$$= 0,238 + 0,869 + 1,92 + 0,579 + 0,241 = 3,847 < 4.$$

Применяем в расчетах в качестве температуры наружного воздуха среднюю температуру наиболее холодных суток обеспеченностью 0,92 $t_{ext} = -28^\circ\text{C}$ для города Минска.

Конструктивно покрытие над неотапливаемым подвалом (рисунок 4) состоит из 4-х слоев:



Рисунок 4. – Конструкция покрытия над неотапливаемым подвалом

Для конструкции покрытия над неотапливаемым подвалом сопротивление теплопередачи определяется по формуле (6):

$$R_m = 0,9 \left(\frac{1}{8,7} + \frac{0,22}{2,04} + \frac{0,1}{0,05} + \frac{0,015}{0,81} + \frac{0,05}{0,38} + \frac{1}{23} \right) = 2,2 \text{ м}^2 \cdot ^\circ\text{C/Вт}.$$

Конструктивно чердачное покрытие (рисунок 5) состоит из 5-ти слоев:



Рисунок 5. – Конструкция чердачного покрытия

Для конструкции чердачного покрытия сопротивление теплопередачи определим по формуле (6):

$$R_m = 0,9 \left(\frac{1}{8,7} + \frac{0,22}{2,04} + \frac{0,06}{0,17} + \frac{0,2}{0,05} + \frac{0,7}{0,93} + \frac{0,3}{0,17} + \frac{1}{12} \right) = 6,5 \text{ м}^2 \cdot ^\circ\text{C/Вт}.$$

Нормативное сопротивление теплопередаче чердачного покрытия здания согласно [2, табл. 5.1] принимается равным $R_{m \text{ норм}} = 6,0 \text{ м}^2 \cdot ^\circ\text{C/Вт}$.

Для зданий с системами водяного отопления при естественной вентиляции путём неорганизованного притока наружного воздуха за счёт инфильтрации его нагревание непосредственно в помещении от расчетной температуры наружного воздуха t_n до температуры внутреннего воздуха t_a осуществляется системой отопления.

Для систем воздушного отопления здания, совмещённого с активной вентиляцией, в строгом соответствии с тепловым и воздушным балансом, необходимо равенство приточного и удаляемого воздуха для каждого помещения в объёме нормативного воздухообмена и полной компенсацией сбалансированных теплопотерь и теплопоступлений, что обеспечивается за счёт перегрева централизованно обработанного приточного вентиляционного воздуха и подачи его в жилые помещения и кухню с температурой t_{np}

$$t_{np} = t_g + \Delta t, \quad (8)$$

где $\Delta t = \frac{Q_{\Sigma}}{0,28 \cdot \rho \cdot c \cdot L_{np}}$ – перегрев приточного воздуха для компенсации суммарных теплопотерь и теплопоступлений, °С.

Перепишем выражение для Δt в развёрнутом виде с подстановкой нормативных значений входящих величин и после преобразований получим

$$\Delta t = \frac{Q_{\Sigma}}{0,28 \cdot 1,4 \cdot 1,3 \cdot F_n} = \frac{Q_{\Sigma}}{1,176 \cdot F_n} \text{ °С.} \quad (9)$$

Разложив Q_{Σ} на составляющие, получим

$$\begin{aligned} \Delta t &= \frac{Q_{\Sigma}}{1,176 \cdot F_n} = \frac{Q_{НС}}{1,176 \cdot F_n} + \frac{Q_{ОК}}{1,176 \cdot F_n} + \frac{Q_{ПОЛ}}{1,176 \cdot F_n} + \frac{Q_{ПОКР}}{1,176 \cdot F_n} + \frac{Q_i}{1,176 \cdot F_n} - \frac{Q_b}{1,176 \cdot F_n} = \\ &= \frac{F_{НС} \cdot (t_g - t_n) \cdot (1 + \Sigma\beta) \cdot n}{1,176 \cdot R_{НС} \cdot F_n} + \frac{F_{ОК} \cdot (t_g - t_n) \cdot (1 + \Sigma\beta) \cdot n}{1,176 \cdot R_{ОК} \cdot F_n} + \frac{F_{ПОЛ} \cdot (t_g - t_n) \cdot n}{1,176 \cdot R_{ПОЛ} \cdot F_n} + \frac{F_{ПОКР} \cdot (t_g - t_n) \cdot n}{1,176 \cdot R_{ПОКР} \cdot F_n} + \\ &+ \frac{0,28 \cdot \rho \cdot c \cdot 3 \cdot F_n \cdot K}{1,176 \cdot F_n} - \frac{9 \cdot F_n \cdot (1 - 0,2)}{1,176 \cdot F_n} = \frac{F_{НС} \cdot (19 + 28) \cdot 1,15 \cdot 1}{1,176 \cdot 3,4 \cdot F_n} + \frac{F_{ОК} \cdot (19 + 28) \cdot 1,15 \cdot 1}{1,176 \cdot 1 \cdot F_n} + \\ &+ \frac{F_{ПОЛ} \cdot (19 + 28) \cdot 0,6}{1,176 \cdot 2,2 \cdot F_n} + \frac{F_{ПОКР} \cdot (19 + 28) \cdot 1}{1,176 \cdot 6,5 \cdot F_n} + \frac{0,28 \cdot 1,4 \cdot 1,3 \cdot F_n \cdot 0,7}{1,176 \cdot F_n} - \frac{9 \cdot F_n \cdot (1 - 0,2)}{1,176 \cdot F_n} = \\ &= \frac{13,5 \cdot F_{НС}}{F_n} + \frac{46 \cdot F_{ОК}}{F_n} + \frac{10,9 \cdot F_{ПОЛ}}{F_n} + \frac{6,1 \cdot F_{ПОКР}}{F_n} + 0,7 - 6,1 = \\ &= \frac{(13,5 \cdot F_{НС} + 46 \cdot F_{ОК} + 10,9 \cdot F_{ПОЛ} + 6,1 \cdot F_{ПОКР})}{F_n} - 5,4, \text{ °С.} \end{aligned} \quad (10)$$

Приняв за среднее значение $t_g = \frac{18 + 20}{2} = 19 \text{ °С}$, в соответствии с формулой (10) температура приточного воздуха для систем воздушного отопления здания определится из выражения

$$\begin{aligned} t_{np} &= 19 + \frac{13,5 \cdot F_{НС} + 46 \cdot F_{ОК} + 10,9 \cdot F_{ПОЛ} + 6,1 \cdot F_{ПОКР}}{F_n} - 5,4 = \\ &= 13,6 + \frac{13,5 \cdot F_{НС} + 46 \cdot F_{ОК} + 10,9 \cdot F_{ПОЛ} + 6,1 \cdot F_{ПОКР}}{F_n}. \end{aligned} \quad (11)$$

Таким образом, для любого здания по конструктивным размерам можно быстро и легко по формуле (10) определить температуру t_{np} приточного воздуха и суммарный расход теплоты на отопление и вентиляцию здания при воздушном отоплении по формуле

$$Q_{e.o} = 0,28 \cdot L_{np} \cdot \rho_n \cdot c \cdot (t_{np} - t_n), \text{ Вт.} \quad (12)$$

Заключение. Результаты исследований в области создания энергоэффективных систем воздушного отопления в обогреваемых зданиях с наружными ограждающими конструкциями повышенной теплозащиты и герметичности свидетельствуют о том, что формированию комфортных параметров микроклимата в помещениях наиболее полно удовлетворяют системы воздушного отопления, совмещённые с активной вентиляцией [4].

Построение вышеизложенной методики расчёта температуры приточного воздуха t_{np} (11) и суммарного расхода тепловой энергии $Q_{e.o}$ (12) для систем воздушного отопления, совмещённого с активной вентиляцией, базируется на основных положениях теории аэродинамики и теплообмена, на определении воздухообмена по нормативным параметрам и осреднении в пределах допустимых погрешностей.

Для систем воздушного отопления, совмещённых с активной вентиляцией, при которой в каждое вентилируемое помещение поступает тёплый воздух из единого приточного центра с одинаковой температурой t_{np} и в количестве, соответствующем нормативному воздухообмену с одновременной компенсацией всех теплопотерь без дополнительной установки кондиционеров-доводчиков, важным является разработка неоднородной системы утепления наружных стен каждого отапливаемого помещения с различной толщиной эффективного слоя утеплителя с целью выравнивания удельных теплопотерь, что ляжет в основу дальнейших научных исследований по минимизации энергопотребления от внешних источников за счёт более широкого использования вторичных и природных энергоресурсов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха : СНБ 4.02.01-03. – Минск : Минстройархитектуры Респ. Беларусь, 2003.
2. Технический кодекс установившейся практики : ТКП 45-2.04-43-2006 (02250). Строительная теплотехника. Строительные нормы проектирования – Минск : Минстройархитектуры Респ. Беларусь, 2007. – 32 с.
3. Жилые здания. Минстройархитектуры : СНБ 3.02.04-03 Респ. Беларусь. – Минск, 2003.
4. Липко, В.И. Вентиляция герметизированных зданий / В.И. Липко. Т. 1. – Новополоцк : Полоц. гос. ун-т, 2000. – 300 с.
5. Липко, В.И. Вентиляция герметизированных зданий / В.И. Липко. Т. 2. – Новополоцк : Полоц. гос. ун-т, 2000. – 246 с.
6. Липко, В.И. Энергоресурсоэффективное тепловоздухоснабжение гражданских зданий : в 2-х т. / В.И. Липко. Т. 1. – Новополоцк : Полоц. гос. ун-т, 2004. – 212 с.
7. Липко В.И. Энергоресурсоэффективное тепловоздухоснабжение гражданских зданий : в 2-х т. / В.И. Липко. Т. 2. – Новополоцк : Полоц. гос. ун-т, 2004. – 392 с.
8. Технологический чердак здания : пат. ВУ 9618 / В.И. Липко, Е.С. Добросольцева, С.В. Липко, С.В. Ланкович. – Оpubл. 30.10.2013.
9. Рекуперативное устройство приточно-вытяжной вентиляции здания : пат. ВУ 8381 / В.И. Липко, С.В. Липко. – Оpubл. 04.03.2012.
10. Здание с утепляющей оболочкой : пат. ВУ 008576 / Л.Н. Данилевский, В.М. Пилипенко, В.А. Потерщук. – Оpubл. 06.09.2007.
11. Отопительно-вентиляционная система здания : пат. ВУ 1134 / В.И. Липко, В.А. Борванов. – Оpubл. 01.08.2003.
12. Липко, В.И. Энергоресурсоэффективное устройство тепловой вентиляции здания с технологическим чердаком с использованием вторичных и природных энергоисточников / С.В. Ланкович, В.И. Липко // Устойчивое развитие: региональные аспекты : междунар. науч.-практ. конф. молодых учёных, Брест, 20–21 апреля 2017 г. – Брест, 2017.
13. Широкова, О.Н. Экологически и экономически эффективные системы тепловоздухоснабжения индивидуально отапливаемых и активно вентилируемых малоэтажных зданий / О.Н. Широкова, В.И. Липко // Материалы докл. 50-й междунар. науч.-техн. конф. преподавателей и студентов, посвящ. году науки : в 2-х т. – Минск, 2017. – С. 319–322.
14. Липко, В.И. Энергоресурсоэффективные системы тепловоздухоснабжения жилых зданий повышенной теплозащиты / В.И. Липко, О.Н. Широкова, А.С. Лапезо // Новое в технике и технологии в текстильной и легкой промышленности : материалы докл. междунар. науч.-техн. конф. ; Витеб. гос. технол. ун-т. – Витебск, 2015. – С. 285–287.

Поступила 08.12.2017

THE METHOD OF CALCULATION OF AIR HEATING SYSTEMS

V. LIPKO, S. LANKOVICH

Based on the functional of the statutory framework shows the development of methodology for calculation of air heating systems of buildings with advanced thermal protection and tightness of enclosing structures with the thermotechnical calculation. The method of calculation is based on the basic theory of aerodynamics and heat and mass transfer and air exchange on regulatory parameters with averaging within the tolerance band to determine supply air temperature in the premises and the total consumption of thermal energy for air heating systems, combined with active ventilation.

Keyword: air heating, heat losses, heat input, air temperature, heat-and-mass transfer processes, air change, outer shell, thermotechnical calculation, heater warmer, heat-transfer resistance.