

Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. Т. 60, № 5 (2017), с. 470–483
470 Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc. V. 60, No 5 (2017), pp. 470–483

DOI: 10.21122/1029-7448-2017-60-5-470-483

УДК 697:620

Использование воздушных прослоек в ограждениях зданий для энергосбережения при кондиционировании воздуха

С. Н. Осипов¹⁾, С. Л. Данилевский¹⁾, А. В. Захаренко¹⁾

¹⁾ГП «Институт жилища – НИПТИС имени Атаева С. С.» (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2017
Belarusian National Technical University, 2017

Реферат. Поскольку в Беларуси нет крупных природных энергоресурсов, необходимо постоянно помнить об экономии энергии. В связи с этим важна разработка современных способов экономии при кондиционировании воздуха внутри новых зданий с воздушными прослойками в ограждениях, особенно в светопрозрачных. Предложена система вентиляции воздушных прослоек в ограждении здания, при которой движение воздуха происходит за счет гравитационных и аэродинамических сил, что позволяет дополнительно организовать естественный, принудительный или комбинированный воздухообмен. С целью увеличения и упорядочения естественной тяги используются перегородки, разделяющие разные части воздушных прослоек. Для естественного воздухообмена с использованием гравитационных сил применяются отверстия, выполненные в верхней и нижней частях перегородок между смежными зонами воздушных прослоек. Естественный воздухообмен в отверстиях перегородок регулируется подвижными заслонками, жалюзи или иными регулировочными устройствами. Для комбинированного или принудительного воздухообмена между смежными зонами воздушных прослоек используются вентиляторы с прокачкой воздуха из зон воздушных прослоек с более высокой температурой воздуха в зоны воздушных прослоек с более низкой температурой или наоборот. При принудительном воздухообмене для интенсификации проникновения воздуха в зоны воздушных прослоек применяют настилаемые на твердую поверхность струи. Для охлаждения многослойного ограждения здания, при котором естественным, принудительным или комбинированным путем создается движение воздуха между воздушными прослойками, образованными внутренними перегородками, осуществляется подача в эти прослойки части или всего отработанного внутри здания кондиционированного или некондиционированного (но более холодного по сравнению с наружным) воздуха. Комбинированная или принудительная подача отработанного внутри здания воздуха в воздушные прослойки производится посредством воздухопроводов, связанных с выводными каналами кондиционеров. При этом внутренние перегородки оборудуются воздушными клапанными отверстиями.

Ключевые слова: энергосбережение, кондиционирование воздуха, ограждение здания, воздушные прослойки, температура воздуха

Для цитирования: Осипов, С. Н. Использование воздушных прослоек в ограждениях зданий для энергосбережения при кондиционировании воздуха / С. Н. Осипов, С. Л. Данилевский, А. В. Захаренко // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. Т. 60, № 5. С. 470–483. DOI: 10.21122/1029-7448-2017-60-5-470-483

Адрес для переписки

Осипов Сергей Николаевич
ГП «Институт жилища –
НИПТИС имени Атаева С. С.»
ул. Ф. Скорины, 15б,
220114, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 263-81-91
up-niptis@rambler.ru

Address for correspondence

Osipov Sergey N.
UE “Institute of Housing –
NIPTIS named after Ataev S. S.”
15b F. Skoriny str.,
220114, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 263-81-91
up-niptis@rambler.ru

The Use of Air Layers in Building Envelopes for Energy Saving during Air Conditioning

S. N. Osipov¹⁾, S. L. Danilevskiy¹⁾, A. V. Zacharenko¹⁾

¹⁾UE “Institute of Housing – NIPTIS named after Ataev S. S.” (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. Since there are no large natural energy resources in Belarus, energy savings ought to be a point of the special attention. With this regard it is important to develop modern ways of savings during the process of air conditioning inside new buildings with an air layer in the enclosure, especially in translucent ones. The system of ventilation of air layers in the enclosure of a building has been introduced in which air movement is caused by the gravitational and aerodynamic forces. It makes it possible to arrange further ventilation – a natural, forced or a hybrid one. With the purpose of increasing and streamlining natural draught the partitions are used separating the different parts of air layers. For natural ventilation with the use of gravitational forces the holes in the upper and lower parts of the partitions between adjacent air layers are applied. Natural ventilation in the holes of the partitions is regulated by movable shutters, blinds or other adjusting devices. For combined or forced air exchange between adjacent zones of air layers fans are used pumping air from the air layer zones with a higher temperature to zones of air layers with lower temperature and vice versa. When air exchange is forced, in order to intensify the infiltration of air into zones of air layers jets are laid on a hard surface. In order to cool a multi-layered enclosure of a building, where the movement of air between the air layers (that have been formed by internal partitions) is being fulfilled by a natural, forced or combined mode, a part of the air or the total air processed inside the building (i.e. conditioned or non-conditioned air cooler as compared with the outside one) is being sent to these strata. Combined or forced flow of the air processed inside the building into the air layers is done through the ducts associated with the output channels of the air conditioners. The internal partitions are equipped with the air valve hole.

Keywords: energy saving, air conditioning, enclosure of a building, air layers, air temperature

For citation: Osipov S. N., Danilevskiy S. L., Zacharenko A. V. (2017) The Use of Air Layers in Building Envelopes for Energy Saving during Air Conditioning. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 60 (5), 470–483. DOI: 10.21122/1029-7448-2017-60-5-470-483 (in Russian)

Анализ среднегодовых и среднеотопительных температур наружного атмосферного воздуха [1, 2] показывает [3], что за последние 25 лет эти температуры в Беларуси повысились примерно на 2 °С. Одновременно возрастают суточные перепады температур в ночное и дневное время. В летние периоды наблюдается повышение контрастности нагревания солнечных южных и западных сторон зданий, что требует существенного увеличения мощности кондиционеров и расхода электроэнергии.

В течение последних 30–40 лет во всем мире строятся высотные здания с обширным светопрозрачным ограждением, чему примером может служить Национальная библиотека Беларуси, построенная в 2004–2006 гг. в Минске. В таких строениях имеются особые условия кондиционирования воздуха, создаваемые в закрытых помещениях и поддерживаемые с помощью средств автоматического управления искусственного микроклимата [4, с. 218].

В нормативной документации для высотных зданий [5, с. 17–18] приведены особые требования к проектированию ограждающих конструкций,

которые должны отвечать требованиям безопасности, надежности и долговечности и иметь срок службы не менее 50 лет. Согласно ГОСТ 30494–96 «Здания жилые и общественные. Параметры микроклимата в помещениях» и СанПиНам [6–8], наружные светопрозрачные ограждающие конструкции зданий должны обеспечить необходимые параметры микроклимата помещений, что способствует поиску новых конструктивных решений использования воздушных прослоек в ограждениях зданий и наружных светопрозрачных ограждениях [9, 10]. Наиболее известным конструктивным решением является вентилируемая воздушная прослойка [11, с. 179–185], температурно-влажностные параметры воздуха в которой в зависимости от вентиляции за счет гравитационных сил и ветра аналитически описаны с использованием известных физических законов.

Движение воздуха внутри воздушных прослоек и между ними при наличии сообщающихся каналов при естественной вентиляции происходит благодаря гравитационному давлению Δp , возникающему за счет разности плотностей воздуха, которые зависят от температуры [11, с. 184]:

$$\Delta p = (\rho_1 - \rho_2)gh = 49 \cdot 10^{-3}(t_2 - t_1)gh, \quad (1)$$

где Δp – гравитационное (так называемый естественный напор) давление, Па; ρ_1, ρ_2 – плотность воздуха при температурах t_1, t_2 , кг/м³; g – ускорение силы тяжести, м/с²; h – разность высот столбов воздуха с различной температурой или разность высот отверстий входа воздуха в прослойку и выхода из нее, м.

Как видно из (1), величина гравитационного давления прямо пропорциональна разности температур воздуха, которые являются основным фактором гравитационного (естественного) давления воздуха. Поэтому преимущество данного способа – это возможность использования расчета гравитационного режима вентиляции воздушных прослоек. Недостаток – отсутствие рассмотрения и анализа возможности организации и применения воздухообмена между отдельными воздушными прослойками с целью перекачки тепловой энергии с избыточных зон в дефицитные.

Известна теплоизоляция стен здания [12] в виде набора воздушных слоев, образованных натянутыми пленками, выполненными в виде полос, установленных подобно черепице, зазор между которыми обеспечен распорными элементами. Зазор между полотнами создается вертикальными вставками в виде реек толщиной 7–15 мм, а распорные элементы выполняются из капронового шнура диаметром 3–7 мм. Основным недостатком этого способа при определенных условиях является отсутствие теплообмена посредством воздухообмена между отдельными воздушными полостями.

Задача разработанного авторами статьи способа – экономия тепловых ресурсов и уменьшение неравномерности тепловых режимов с разных сторон здания в зависимости от интенсивности солнечного облучения и параметров ветра, а также устранение влияния неравномерности темпера-

тур различных участков наружной оболочки на прочностную надежность конструкций и целостность оболочки здания. Решается она достижением технического результата посредством вентиляции воздушных прослоек в ограждениях здания, при которой движение воздуха в прослойке осуществляется за счет гравитационных и аэродинамических сил. Также дополнительно организуется естественный, принудительный или комбинированный воздухообмен между, по меньшей мере, двумя зонами с отличающейся средней температурой воздуха в одной или в разных воздушных прослойках или между любой из упомянутых зон с окружающей атмосферой.

С целью обеспечения возрастания величины и упорядочения действия естественной тяги используются перегородки, разделяющие разные части воздушных прослоек. При организации естественного, принудительного или комбинированного воздухообмена в воздушных прослойках толщиной менее 0,05 м обеспечивается ламинарный режим движения воздуха в прослойках.

Для организации естественного воздухообмена с использованием гравитационных сил используются отверстия, достаточные для обеспечения необходимого естественного воздухообмена, выполненные в верхней и нижней частях перегородок между смежными зонами воздушных прослоек. Регулирование естественного воздухообмена в отверстиях перегородок осуществляется подвижными заслонками, жалюзи или иными регулируемыми устройствами.

При комбинированном или принудительном воздухообмене между смежными зонами воздушных прослоек применяются вентиляторы с прокачкой воздуха из зон воздушных прослоек с более высокой температурой воздуха в зоны воздушных прослоек с более низкой температурой или наоборот. В случае принудительного воздухообмена для интенсификации проникновения воздуха в зоны воздушных прослоек используются настильные струи на твердые поверхности.

Сущность предлагаемого способа вентиляции воздушных прослоек в ограждениях зданий заключается в том, что подвижность воздуха в прослойке, которая обычно происходит за счет гравитационных сил, возникающих под действием разности температур и, следовательно, плотностей воздуха в прослойке и на том же уровне за ее пределами в столбе воздуха высотой, равной вертикальному расстоянию между уровнями сообщающихся сосудов, используется для воздухообмена между различными зонами – частями воздушных прослоек ограждений здания или с окружающей атмосферой с разными температурами воздуха. При этом для сглаживания неравномерности тепловых режимов в различных частях воздушных прослоек (на солнце и в тени) можно использовать как естественную тягу, так и принудительную вентиляцию с применением вентиляционных установок, а также комбинированный воздухообмен с одновременной естественной и механической тягой. Такой обмен воздушными массами с различной температурой позволяет значительную часть солнечного тепла, ассимили-

рованного воздухом прослойки на солнечной стороне здания, использовать для повышения температуры воздуха в прослойке на теневой стороне.

Для вентиляции воздушных прослоек в ограждениях зданий предпочтительна организация воздухообмена, основанного на разности температуры внутри прослоек в таких ограждениях и окружающей атмосферы. В качестве примера различия температур в воздушных прослойках на солнечной и теневой сторонах здания можно взять результаты натурных измерений в ограждающих конструкциях здания Национальной библиотеки Беларуси в октябре 2005 г. На юго-западной стороне на расстоянии примерно 10 м по вертикали от начала вертикальной поверхности стекла и на расстоянии 10 м от ребра между южной и юго-западной вертикальными гранями книгохранилища 11–12 октября 2005 г. при температуре наружного воздуха $T_n \approx (15–16)^\circ\text{C}$ температура воздуха в середине воздушной прослойки достигала $T_{vp1} \approx 22^\circ\text{C}$, а температуры ограждающих поверхностей воздушной прослойки $T_1(T_2) \approx (30–37)^\circ\text{C}$ (рис. 1).

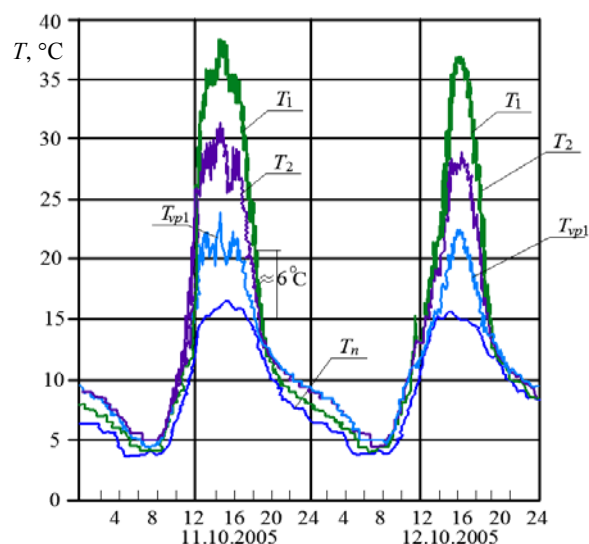


Рис. 1. Зависимости температур воздуха и поверхностей ограждения на юго-западной стороне книгохранилища библиотеки от времени суток за период 11–12 октября 2005 г.: T_n – температура наружного воздуха; T_1 – температура внутренней поверхности стекла; T_2 – температура наружной поверхности листа алюминия; T_{vp1} – температура воздуха между стеклом и алюминиевой стенкой на высоте 10 м от входа воздуха

Fig. 1. Dependencies of the temperatures of the air and surfaces of the enclosure at the southwest side of the book depository on the time of day and night during the period of October 11–12, 2005: T_n – ambient air temperature; T_1 – temperature of the inner glass surface; T_2 – temperature of the outer surface of the aluminum plate; T_{vp1} – temperature of air between the glass and the aluminum wall at a height of 10 m from the intake of air

Такое уменьшение температуры воздуха в середине воздушной прослойки по сравнению с ограждающими поверхностями явилось следствием интенсивной вентиляции воздушной прослойки со средней скоростью 0,5 м/с

за счет естественной тяги, образовавшейся вследствие разности температур наружного воздуха T_n и внутри воздушной прослойки T_{vp1} при свободном доступе из-за неполного остекления наружной поверхности здания в смежных частях. Однако даже при такой достаточно интенсивной вентиляции разница в температурах в воздушных прослойках на уровне 10 м по вертикали от начала вертикальной поверхности стекла на солнечной стороне и в тени составила $22 - 16 \approx 6$ °С, а температура алюминиевой стенки достигала 30 °С. С учетом градиента роста температуры в воздушной прослойке около 0,6 °С/м возможная температура воздуха у верхней границы воздушной прослойки составит примерно 30 °С, а температура алюминиевой стенки может превысить 35 °С, что потребует кондиционирования воздуха в коридоре, окружающем книгохранилище. В это самое время температура внутренней поверхности всей многослойной наружной стены с теневой стороны опустилась до 15 °С, что является нижним допустимым пределом для предотвращения конденсации влаги.

В случае прекращения интенсивной вентиляции воздушной прослойки разница температур алюминиевой перегородки на солнечной T_{2c} и теневой T_{2t} сторонах может достигать $45 - 15 \approx 30$ °С, что при протяженности периметра около 150 м способно дать деформацию около $(30/2) \cdot 0,238 \cdot 10^{-4} \cdot 150 \approx 0,054$ м $\approx 5,4$ см. Хотя такая деформация значительно меньше разрушающей, она может сказаться на состоянии технологических отверстий и других элементов конструкции. Поэтому дополнительная организация воздухообмена между различными частями воздушных прослоек или с окружающей атмосферой с разными температурами воздуха позволяет при определенных условиях не только уменьшить затраты на отопление и кондиционирование воздуха, но и снизить неравномерность температурных деформаций различных частей здания.

Для организации воздухообмена между различными частями воздушных прослоек и использования эффекта естественной тяги, что позволяет обойтись без специальных вентиляторов и экономить энергоресурсы, в определенных (расчетных) местах воздушных прослоек необходимо устраивать преимущественно вертикальные воздухопроницаемые перегородки, разделяющие зоны с отличающейся средней температурой воздуха. При этом вследствие организации процессов теплообмена происходит возрастание величины и упорядочение действия естественной тяги [13, 14].

Для повышения интенсивности воздухообмена между различными частями воздушных прослоек большое значение имеет режим движения воздуха как в самих прослойках, так и между ними, в том числе и между зонами с разной температурой воздуха. Как известно, при ламинарном режиме движения воздуха его расход (дебит) прямо пропорционален величине перепада давлений, который при естественном конвективном движении также прямо пропорционален перепаду температур. В случае турбулентного режима движения воздуха в прослойке расход воздуха в поперечном сечении пропорционален лишь корню квадратному из перепада давле-

ний. Для создания ламинарного режима движения в полости нужно не только обеспечивать общую величину критерия Рейнольдса $Re < 2300$, но и ламинарный режим возможной свободной конвекции в прослойке, для чего можно использовать рекомендации, приведенные в [15, 16]. При ламинарной свободной конвекции в прослойке, заполненной воздухом (критерий Прандтля $Pr = 0,71$), при $H/B = 1,25-20,0$ (H, B – высота и толщина прослойки) и критерии Релея $Ra_B = (1,94 \cdot 10^3)-(2,3 \cdot 10^5)$ максимальная температура в центре изменяется по линейному закону. Ламинарный режим в прослойке с линейным распределением температуры между нагретыми стенками имеет место при $Ra_B < 5 \cdot 10^3$. С учетом $Ra = Gr \cdot Pr$ (Gr – критерий Грасгофа) можно рассчитать условия соблюдения ламинарного режима.

Как показывают расчеты, ламинарный режим достаточно быстрого движения воздуха ($v \approx 0,35$ м/с), обеспечивающий существенный теплообмен с нагретыми поверхностями стенок [11], наступает при $B \leq 0,05$ м. При увеличении толщины прослойки и $Re \leq 2300$ теплообмен уменьшается, а вероятность турбулизации потока увеличивается.

Учитывая прямую пропорциональность величины естественной тяги от перепада уровней расположения нижнего и верхнего краев отдельных отверстий, через которые сообщаются различные зоны воздушных прослоек с разными средними температурами воздуха, эти отверстия устраивают таким образом, чтобы перепад уровней действия естественной тяги был наибольшим, что позволяет обеспечить максимально возможный в данных условиях воздухообмен. Для регулирования величины воздухообмена специальные отверстия необходимо оборудовать подвижными воздушными заслонками, жалюзийными или иными устройствами, так как параметры воздуха в различных прослойках могут сильно изменяться (рис. 1).

Зачастую для обеспечения нужного объема воздухообмена между различными прослойками только естественной тяги бывает недостаточно, и тогда специальные отверстия следует оборудовать низконапорными (обычно не более 100 Па) вентиляторами. Однако необходимая производительность таких вентиляторов может оказаться достаточно большой. Так, для обеспечения средней скорости движения воздуха 0,5 м/с в условиях описанной ранее воздушной прослойки вокруг книгохранилища Национальной библиотеки Беларуси расход воздуха через эту прослойку должен составлять $Q = 1,2 \cdot 20 \cdot 0,5 = 12$ м³/с = 43200 м³/ч. При организации воздухообмена через две боковые перегородки прослойки производительность каждого вентилятора должна быть около 22000 м³/ч, что, например, характерно для вентилятора типа ВРКА-ВДУ-3 с двигателем 112МВ8, потребляющим мощность 3 кВт. Установочные размеры вентилятора, смонтированного в квадратной монтажной обечайке 970×970 мм, позволяют разместить его в перегородке шириной 1200 мм.

При наличии весьма протяженных воздушных прослоек для организации активного принудительного или комбинированного воздухообмена

в пределах отдельных участков прослоек необходимо применять воздуховоды для обеспечения направленности и предельного увеличения дальности создаваемых вентиляторами воздушных струй. В этом случае представляется целесообразным использовать поверхностный эффект (эффект Коанды) своеобразного «прилипания» настилаемой на твердую поверхность струи, в результате чего дальность увеличивается примерно в 1,4 раза.

Для рассматриваемого примера (Национальная библиотека, 11.10.2005) в доказательство возможной технико-экономической эффективности с использованием вышеуказанных средств (в любом их сочетании) посредством перекачки воздуха с 12:00 до 18:00 ч был организован воздухообмен из зоны с более нагретым воздухом в прослойке на солнечной стороне библиотеки в зону более холодного воздуха в прослойке на теневой стороне – около $2,5 \cdot 10^6$ кДж теплоты. Исходными данными для расчета указанного количества теплоты при такой перекачке воздуха были (рис. 1): перепад температур воздуха в соответствующих зонах воздушных прослоек $\Delta t = 26 - 16 \approx 10$ °С; скорость движения воздуха в прослойке $v \approx 0,4$ м/с; площадь поперечного сечения прослойки $S = 20 \cdot 1,2 = 24$ м²; плотность воздуха $\rho = 1,2$ кг/м³; удельная теплоемкость воздуха $c_p = 1$ кДж/(кг·град.). Тогда количество теплоты q , переносимой воздухом за время $\tau = 6$ ч (с 12:00 до 18:00 ч), или 21600 с, составит $q = \rho c_p \Delta t v \tau S = 1,2 \cdot 1 \cdot 10 \cdot 0,4 \times 21600 \cdot 24 \approx 2,5 \cdot 10^6$ кДж $\approx 6 \cdot 10^5$ ккал, а это достаточно большое значение. Возможная максимальная часовая перекачка количества теплоты q_{\max} с нагретым воздухом при $\Delta t = 12$ °С и $v = 0,5$ м/с составит: $q_{\max} = 1,2 \cdot 1 \times 12 \cdot 0,5 \cdot 3600 \cdot 24 \approx 6,2 \cdot 10^5$ кДж/ч $\approx 1,7 \cdot 10^5$ Вт/ч ≈ 170 кВт/ч. При этом не следует забывать, что исходные данные являются экспериментальными, которые получены в г. Минске 11 октября 2005 г.

Для варианта охлаждения многослойного ограждения здания для сравнения выбрали способ [9] с дополнительно организуемым естественным, принудительным или комбинированным воздухообменом, по меньшей мере, между двумя зонами (с отличающейся средней температурой воздуха в одной или разных воздушных прослойках или между любой из упомянутых зон) с окружающей атмосферой. Недостатком этого способа является использование только разницы температур воздуха между воздушными прослойками в ограждении здания или в любой из воздушных прослоек и окружающей атмосферой, что для целей кондиционирования здания пригодно лишь частично в случае температуры используемого воздуха не выше нормативной (до $t_n = 25$ °С) [14]. При $t_n > 25$ °С использование наружного воздуха может оказаться рациональным только для частичного охлаждения солнечной стороны здания, что ограничивает применение этого способа.

Задачи предлагаемого варианта охлаждения – это экономия электроэнергии, расходуемой на кондиционирование воздуха, и уменьшение неравномерности тепловых режимов ограждения здания, влияющих на прочностную надежность его конструкций и целостность оболочки. Решается

она достигнута техническим результатом посредством предлагаемого способа, при котором происходит движение воздуха в промежутках между слоями ограждения здания за счет гравитационных и аэродинамических сил с управляемым воздухообменом между, по меньшей мере, двумя зонами и (или) наружной атмосферой. Согласно выбранной методике, в воздушные прослойки в ограждении здания естественным, принудительным или комбинированным путем подается часть или весь отработанный внутри здания более холодный внутренний воздух, температура которого ниже температуры наружного атмосферного воздуха.

Для организации комбинированной или принудительной подачи отработанного внутри здания воздуха в воздушные прослойки используют превышение давления воздуха внутри здания за счет принудительной подачи кондиционированного воздуха. При смешивании в прослойках воздуха из внутренних помещений с наружным атмосферным воздухом подача воздушной смеси в прослойку осуществляется в соотношении, обеспечивающем такие температуры смеси $T_{см}$ отработанного внутреннего и наружного воздуха в прослойке и T_3 на поверхности прилегающей стены, что их соотношение к T_k (температура воздуха в объеме воздушной прослойки и поверхности стены, при которой начинается конденсация влаги) в соответствии со средней влажностью воздуха исключает конденсатообразование в промежутках между слоями ограждения здания. Внутренние перегородки между воздушной прослойкой и кондиционируемым объемом оборудуются воздушными клапанными отверстиями.

Вертикальный разрез ограждающих конструкций здания с нанесенными точками измерений температур приведен на рис. 2. Подобный разрез имеет верхняя главная часть здания Национальной библиотеки Беларуси.

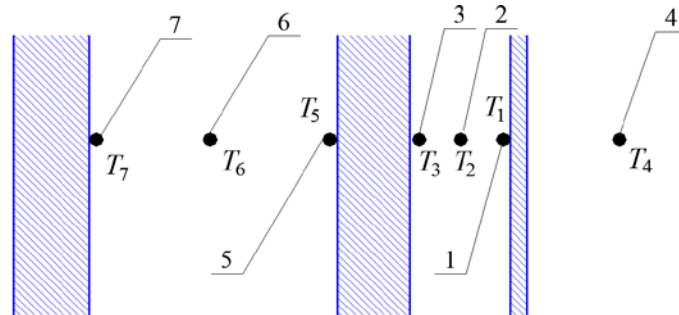


Рис. 2. Вертикальный разрез ограждающих конструкций здания: T_1 – T_7 – температура; 1 – внутренняя поверхность наружного стекла с T_1 ; 2 – воздушная прослойка (с T_2 воздуха) между наружным стеклом и наружной стеной; 3 – наружная поверхность (с T_3) наружной стены; 4 – наружный атмосферный воздух с T_4 ; 5 – внутренняя поверхность (с T_5) наружной стены; 6 – внутренний воздух помещения с T_6 ; 7 – поверхность внутренней стены с T_7

Fig. 2. Vertical section of the building envelope: T_1 – T_7 – temperature; 1 – inner surface of the outer glass with T_1 ; 2 – air layer (with T_2 of air) between the outer glass and the outer wall; 3 – outer surface (with T_3) of the outer wall; 4 – outer atmospheric air with T_4 ; 5 – inner surface (with T_5) exterior walls; 6 – indoor air with T_6 ; 7 – internal surface of the wall with T_7

Суть излагаемого способа охлаждения заключается в том, что в воздушные прослойки в ограждении здания естественным, принудительным или комбинированным путем из внутренних помещений подается часть или весь отработанный внутри здания, кондиционированный или нет (но более холодный по сравнению с наружной атмосферой) внутренний воздух. Принудительная подача отработанного кондиционированного воздуха (за счет некоторого превышения его давления) из помещений внутри здания в воздушные прослойки (через специально оборудованные в них клапанные отверстия) производится посредством воздухопроводов, связанных с выводными каналами кондиционеров. При этом соблюдается условие $T_6 < T_4$.

Обустройство клапанных отверстий возможно любым известным технически приемлемым способом. Конструкция воздушных прослоек в ограждении здания может обеспечивать принудительное либо естественное поступление наружного воздуха в прослойку из атмосферы по заданным проектом условиям.

В случае одновременной подачи в воздушные прослойки из помещений внутри здания отработанного кондиционированного относительно холодного воздуха температурой T_6 и наружного теплого влажного воздуха температурой T_4 результирующая температура подаваемой в прослойку воздушной смеси может оказаться ниже температуры начала конденсации влаги в объеме воздушной прослойки T_2 и температуры на наружной поверхности прилегающей наружной стены T_3 , что может привести к выпадению влаги и повышенной коррозии. Поэтому необходимо регулировать интенсивность поступления в воздушные прослойки влажного атмосферного воздуха.

Подачу воздушной смеси в прослойку осуществляют в соотношении, обеспечивающем температуры смеси $T_{см}$ отработанного внутреннего и наружного воздуха в прослойке и T_3 на поверхности прилегающей стены выше температуры конденсации влаги T_k в соответствии со средней влажностью по зависимости $T_{см} > T_k$. Температуры начала конденсации влаги T_k определяются по диаграмме $i-d$ по относительной влажности воздуха.

Для охлаждения ограждений здания за счет перемещения отработанного кондиционированного воздуха из внутренних помещений в воздушные прослойки предпочтительна организация воздухообмена, основанного на разнице температур внутри здания и в воздушных промежутках его ограждений от температуры окружающей атмосферы. В качестве примера суточной динамики температур (в течение трех летних суток) в местах, обозначенных на рис. 2, приведем результаты натурных измерений в зоне вертикального ограждения верхней части Национальной библиотеки Беларуси (рис. 3).

Как видно из рис. 3, в климатических условиях Беларуси в летний период суточные колебания температуры атмосферного наружного воздуха T_4 достигают 15 °С, при этом колебания температуры внутренней поверхности наружного специального стекла на солнечной стороне достигают 30 °С (от 13 до 43 °С). Температура воздуха в промежутке между

стеклом и стеной T_2 (в воздушной прослойке) может достичь $40\text{ }^\circ\text{C}$, а температура поверхности стены $T_3 - 35\text{ }^\circ\text{C}$. Температура наружного воздуха T_4 за время наблюдений к 12–14 часам каждого суток достигала $26\text{--}27\text{ }^\circ\text{C}$, что выше принятого верхнего нормативного температурного предела ($25\text{ }^\circ\text{C}$). Поэтому температура воздуха и стен помещений внутри здания без значительных теплоступлений может поддерживаться при $(T_5 - T_7) < 25\text{ }^\circ\text{C}$ за счет аккумуляции холода в ночной и утренний периоды, когда температура наружного воздуха $T_4 < 25\text{ }^\circ\text{C}$. Для уменьшения нагревания ограждающих конструкций от солнечного излучения для температурных условий, приведенных на рис. 3, достаточно пропускать наружный воздух с $T_4 = (25\text{--}27)\text{ }^\circ\text{C}$ через воздушный промежуток с $T_2 = 40\text{ }^\circ\text{C}$ без вентиляции. В этом случае при достаточно интенсивном воздухообмене температура воздуха T_2 и поверхности стены T_3 может опуститься до $30\text{--}35\text{ }^\circ\text{C}$, что снизит предельную температуру внутри здания $(T_5 - T_7)$ до $23\text{--}24\text{ }^\circ\text{C}$ и создаст вполне нормальные условия.

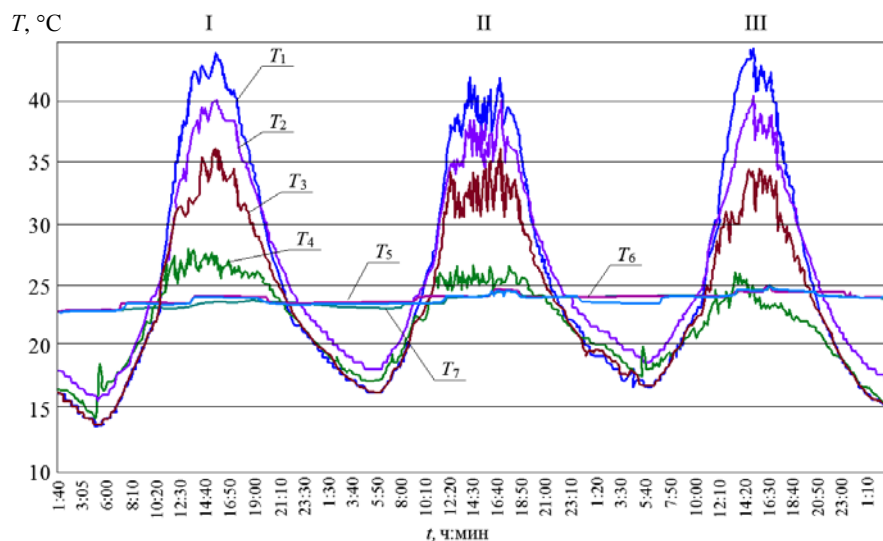


Рис. 3. Результаты натурных измерений температур в точках, указанных на рис. 2, в зоне вертикального ограждения верхней части Национальной библиотеки в летнее время

Fig. 3. The results of field measurements of temperatures at points shown in fig. 2, in the area of the vertical walls of the upper part of the National library in the summer

Однако подача внутреннего воздуха при $T_6 = (23\text{--}24)\text{ }^\circ\text{C}$ в воздушную прослойку позволяет уменьшить T_2 и T_3 до $27\text{--}30\text{ }^\circ\text{C}$, что дает возможность снизить T_6 до $22\text{--}23\text{ }^\circ\text{C}$ и соответствует комфортным условиям для работы. Этот эффект подачи отработанного кондиционированного воздуха из внутренних помещений в воздушные прослойки для их охлаждения особенно заметен при $T_4 > 35\text{ }^\circ\text{C}$ в дневное и $T_4 > 25\text{ }^\circ\text{C}$ в ночное время суток, что исключает достаточное естественное охлаждение здания ночью. Использование наружного воздуха в дневное время приводит к недостаточному охлаждению освещенных солнцем воздушных прослоек. Как показывают

расчеты, аналогичные приведенным в [4], использование подачи внутреннего отработанного кондиционированного воздуха температурой $T_6 = (23-24)^\circ\text{C}$ в воздушные промежутки солнечной стороны с последующим выбросом в атмосферу позволяет существенно снизить температуру (например, с 50 до 30 $^\circ\text{C}$) поверхности наружной стены T_5 и уменьшить расход холода на кондиционирование здания до 20 %.

Необходимо заметить, что последние результаты исследований Л. В. Боруховой и А. С. Шибeko [17] дают возможность уточнить расчеты тепловых и аэродинамических режимов воздушных прослоек в светопрозрачных ограждениях зданий.

ВЫВОДЫ

1. Предложена система вентиляции воздушных прослоек в ограждении здания, при которой создается движение воздуха в прослойках за счет гравитационных и аэродинамических сил, что позволяет дополнительно организовать естественный, принудительный или комбинированный воздухообмен между, по меньшей мере, двумя зонами (с отличающейся средней температурой воздуха в одной или разных воздушных прослойках или между любой из упомянутых зон) с окружающей атмосферой. При этом для обеспечения возрастания величины и упорядочения действия естественной тяги используются перегородки, разделяющие разные части воздушных прослоек.

2. В случае естественного, принудительного или комбинированного воздухообмена в воздушных прослойках толщиной менее 0,05 м в них обеспечивается ламинарный режим движения воздуха. Для организации естественного воздухообмена с использованием гравитационных сил используются отверстия, достаточные для необходимого естественного воздухообмена, выполненные в верхней и нижней частях перегородок между смежными зонами воздушных прослоек.

3. Естественный воздухообмен в отверстиях перегородок регулируется подвижными заслонками, жалюзи или иными регулировочными устройствами, а для комбинированного или принудительного воздухообмена между смежными зонами воздушных прослоек применяются вентиляторы с прокачкой воздуха из зон воздушных прослоек с более высокой температурой воздуха в зоны воздушных прослоек с более низкой температурой или наоборот.

4. При организации принудительного воздухообмена для интенсификации проникновения воздуха в зоны воздушных прослоек используются настилаемые на твердые поверхности струи.

5. Для охлаждения многослойного ограждения здания, при котором естественным, принудительным или комбинированным путем организуется движение воздуха между, по меньшей мере, двумя воздушными прослойками (образованными внутренними перегородками многослойного

ограждения здания), осуществляется подача в воздушные прослойки части или всего отработанного внутри здания кондиционированного или некондиционированного (но более холодного по сравнению с наружным воздухом) воздуха.

6. Комбинированная или принудительная подача отработанного внутри здания воздуха в воздушные прослойки осуществляется также посредством воздуховодов, связанных с выводящими каналами кондиционеров здания. При этом внутренние перегородки оборудуют воздушными клапанными отверстиями.

ЛИТЕРАТУРА

1. Строительная климатология / Научно-исследовательский институт строительной физики (НИИСФ). М.: Стройиздат, 1990. 89 с. (Справочное пособие к СНиП).
2. Строительная климатология: СНБ 2.04.02–2000 (изм. № 1). Введ. 01.07.2001. Минск: Минстройархитектуры, 2007. 35 с.
3. Осипов, С. Н. О некоторых особенностях энергоснабжения жилых зданий в отопительный период / С. Н. Осипов, В. М. Пилипенко // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2017. Т. 60, № 1. С. 77–96. DOI: 10.21122/1029-7448-2017-60-1-77-96.
4. Большой строительный терминологический словарь-справочник: официальные и неофициальные термины и определения в строительстве, архитектуре, градостроительстве и строительной технике / Составители: В. Д. Наумов [и др.]; под ред. Ю. В. Феофилова. Минск: Минсктиппроект, 2008. 811 с.
5. Высотные здания. Строительные нормы проектирования: ТКП 45-3.02-108–2008 (02250). Введ. 01.12.2008. Минск: Минстройархитектуры, 2008. 89 с.
6. Гигиенические требования к устройству, оборудованию и содержанию жилых домов [Электронный ресурс]: Санитарные нормы, правила и гигиенические нормативы: утв. М-вом здравоохранения Респ. Беларусь 20.08.2015, № 95. Режим доступа: <http://rcheprh.by/dokumenty/sanitarnye-normy-i-pravila/kommunalnaya-gigiena/5644.html>. Дата доступа: 01.03.2017.
7. Гигиенические требования к проектированию, содержанию и эксплуатации производственных предприятий [Электронный ресурс]: СанПиН 2.2.1.13-5–2006: утв. Гл. гос. санитар. врачом Респ. Беларусь 03.04.2006, № 40. Режим доступа: <https://refdb.ru/look/1574181.html>. Дата доступа: 01.03.2017.
8. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений: СанПиН 9–80 РБ 98: утв. Гл. гос. санитар. врачом Респ. Беларусь 25.03.99: взамен СанПиН РБ № 11-13–94: введ. 25.03.99 // Гигиена труда. Вып. 1. Минск, 2008. С. 3–18.
9. Способ вентиляции воздушных прослоек в ограждениях зданий: Евразийский пат. № 012719/ С. Н. Осипов, С. Л. Данилевский. Опубл. 30.12.2009.
10. Способ охлаждения многослойного ограждения здания: пат. 18617 Респ. Беларусь / С. Н. Осипов, С. Л. Данилевский; дата публ.: 30.10.2014.
11. Богословский, В. Н. Строительная теплофизика / В. Н. Богословский. М.: Высш. шк., 1982. 416 с.
12. Теплоизоляция стен здания: пат. 2176708 Рос. Федерации / Р. Н. Яковлев; дата публ.: 10.12.2001.
13. Остроумов, Г. А. Свободная конвекция в условиях внутренней задачи / Г. А. Остроумов. Л.-М.: Гос. изд. техн.-теорет. лит., 1952. 256 с.
14. Джалурия, Й. Естественная конвекция: тепло- и массообмен / Й. Джалурия, пер. с англ. С. Л. Вишневецкого; под ред. В. И. Полежаева. М.: Мир, 1983. 399 с.
15. Мартыненко, О. Г. Свободно-конвективный теплообмен: справочник / О. Г. Мартыненко, Ю. А. Соковишин. Минск: Наука и техника, 1982. 398 с.

16. Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха: СНБ 4.02.01–03. Введ. 01.01.2005. Минск: Минстройархитектуры, 2015. 81 с.
17. Борухова, Л. В. Совершенствование методики расчета теплопоступлений через светопрозрачные конструкции и рекомендации по их уменьшению / Л. В. Борухова, А. С. Шибекко // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2016. Т. 59, № 1. С. 65–78. DOI:10.21122/1029-7448-2016-59-1-65-78

Поступила 12.01.2017 Подписана в печать 17.03.2017 Опубликовано онлайн 29.09.2017

REFERENCES

1. Research Institute for Building Physics (1990) Building Climatology. Handbook to the SNiP. Moscow, Stroyizdat. 89 (in Russian).
2. Alteration No 1 of Building Code 2.04.02–2000. Civil Engineering Climatology. Minsk, Ministry of Architecture and Construction, 2007. 35 (in Russian).
3. Osipov S. N., Pilipenko V. M. (2017) Some Features of the Power Supply of Residential Buildings during the Heating Season. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 60 (1), 77–96 (in Russian). DOI: 10.21122/1029-7448-2017-60-1-77-96.
4. Naumov V. D., Alyavdina T. I., Bedula N. V., Zholud' A. S., Zholud' T. V., Poslova T. G., Feofilova Yu. Yu., Frolova T. S. (2008) *Large Construction Terminology Dictionary: Official and Unofficial Terms and Definitions in Construction, Architecture, Urban Planning and Construction Technology*. Minsk, Minsktipproekt. 811 (in Russian).
5. TCP 45-3.02-108–2008 (02250). High-Rise Buildings: Building Design Standards (2008). Minsk: Ministry of Architecture and Construction. 89 (in Russian).
6. Sanitary Regulations and Norms of the Republic of Belarus. Hygienic Requirements to the Device, Equipment and Maintenance of Houses. Available at: <http://rcheph.by/dokumenty/sanitarnye-normy-i-pravila/kommunalnaya-gigiena/5644.html>. (Accessed 1 March 2017) (in Russian).
7. SanPiN (Sanitary Regulations and Norms) of the Republic of Belarus 2.2.1.13-5–2006. Hygiene Requirements for the Design, Maintenance and Operation of Industrial Enterprises. Available at: <https://refdb.ru/look/1574181.html>. (Accessing 1 March 2017) (in Russian).
8. SanPiN (Sanitary Regulations and Norms) of the Republic of Belarus No 11-13–94. Sanitary Regulations of Microclimate of Industrial Premises. *Occupational Health. Issue 1*. Minsk, 2008. 3–18 (in Russian).
9. Osipov S. N., Danilevsky S. L. (2009) *The Method of Ventilation of Air Layers in the Building Envelopes*. Eurasian Patent No 012719 (in Russian).
10. Osipov S. N., Danilevsky S. L. (2014) *Method of Cooling Multilayer Fencing of the Building*. Patent Republic of Belarus No 18617 (in Russian).
11. Bogoslovski V. N. (1982) *Civil Engineering Thermophysics*. Moscow, Vysshaya Shkola Publ. 416 (in Russian).
12. Yakovlev R. N. (2001) *Thermal Insulation of Walls of the Building*. Patent Russia No 2176708 (in Russian).
13. Ostroumov G. A. (1952) *Free Convection in an Internal Task*. Leningrad-Moscow: State Publ. of Scientific-and-Theoretical Literature. 256 (in Russian).
14. Jaluria Y. (1980) *Natural Convection: Heat and Mass Transfer*. NY, Pergamon Press (Russ. ed.: *Estestvennaya Konvektsiya: Teplo- i Massoobmen*. Moscow, Mir Publ. 399).
15. Martynenko O. G., Sokovishin Yu. A. (1982) *Free-Convective Heat Transfer*. Minsk, Nauka i Tekhnika Publ. 398 (in Russian).
16. Building Code 4.02.01–03. Heating, Ventilation and Air Conditioning. Minsk, Ministry of Architecture and Construction, 2015. 81 (in Russian).
17. Boroukhova L. V., Shybeka A. S. (2016) Improvement of Calculation Methods of Heat Input Through Translucent Structures and Recommendations for their Reduction. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 59 (1), 65–78 (in Russian). DOI:10.21122/1029-7448-2016-59-1-65-78.

Received: 12 January 2017 Accepted: 17 March 2017 Published online: 28 September 2017