

Влияние суточных колебаний наружной температуры на микроклимат помещения

Канд. техн. наук, доц. А. Э. Захаревич¹⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2016
Belarusian National Technical University, 2016

Реферат. С использованием численного моделирования процессов теплообмена в отапливаемом помещении выполнено исследование колебаний температуры внутреннего воздуха в обслуживаемой зоне (зоне обитания), вызванных периодическим изменением температуры наружного воздуха. Разработанная и реализованная в виде программы двумерная физико-математическая модель учитывает нестационарный характер сложного сопряженного теплообмена в ограждениях и воздушном пространстве отапливаемых помещений при использовании различных видов отопительных приборов. Модель включает в себя уравнения лучистого теплообмена между внутренними поверхностями, оконными стеклами и окружающей средой. Рассмотрены два вида нагревателей: радиатор и напольное отопление. Нагрузка приборов задана постоянной во времени в соответствии с тепловым балансом, определенным по традиционной методике. Расчеты выполнены для трех комбинаций теплофизических свойств ограждений. Установлены количественные характеристики индуцированных колебаний температуры внутреннего воздуха в обслуживаемой зоне, определяемые тепловой инерцией ограждений и видом используемого отопительного прибора. Анализ результатов показал, что снижение инерционности остекления приводит к более быстрому проникновению наружной температурной волны в помещение. При этом амплитуда колебаний температуры внутреннего воздуха обслуживаемой зоны остается постоянной по причине неизменной тепловой инерции основных конструкций. При снижении массивности стен и перекрытий наблюдается существенное увеличение амплитуды гармонических изменений температуры внутреннего воздуха в обслуживаемой зоне, тогда как запаздывание относительно колебаний температуры наружного воздуха остается практически постоянным.

Ключевые слова: численное моделирование, теплообмен, помещение, колебания температуры, тепловая инерция

Для цитирования: Захаревич, А. Э. Влияние суточных колебаний наружной температуры на микроклимат помещения / А. Э. Захаревич // *Наука и техника*. 2016. Т. 15, № 6. С. 476–480

Influence of Daily Outside Temperature Fluctuations on Indoor Climate

A. E. Zakharevich¹⁾

¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. The investigation of indoor air temperature fluctuations within the occupied zone (habitable zone) induced by periodic changes in outdoor air temperature has been carried out while using numerical simulation of heat transfer processes in a heated room. The developed and program-implementation two-dimensional physical and mathematical model takes into account unsteady nature of complex conjugate heat transfer in building envelopes and indoor air spaces of heated rooms while using different types of heating devices. The model includes equations of radiative heat transfer between indoor surfaces, windowpanes and outdoor environment. The paper considers two types of heaters: a radiator and underfloor heating. Loading of devices is specified by time-independent quantity according to thermal balance determined with the help of conventional methodology. Calculations have been made for three combinations of heat-transfer properties of building envelopes. Quanti-

Адрес для переписки

Захаревич Алексей Эдуардович
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 150,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 265-97-29
tg_v_fes@bntu.by

Address for correspondence

Zakharevich Aleksey E.
Belarusian National Technical University
150 Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 265-97-29
tg_v_fes@bntu.by

tative characteristics of induced indoor air temperature fluctuations within the occupied zone have been determined while taking into account thermal inertia of building envelopes and type of the used heater. An analysis of results has revealed that reduction in glazing inertance leads to more rapid penetration of outdoor temperature wave into the room. In this case an amplitude of indoor air temperature fluctuations within the occupied zone remains constant due to unchanged thermal inertia of main building structures. Significant increase in the amplitude of harmonic indoor air temperature changes within the occupied zone has been observed when reducing massiveness of walls and slabs whereas delay remains practically invariable with respect to outside air temperature fluctuations.

Keywords: numerical simulation, heat transfer, room, temperature fluctuation, thermal inertia

For citation: Zakharevich A. E. (2016) Influence of Daily Outside Temperature Fluctuations on Indoor Climate. *Science & Technique*. 15 (6), 476–480 (in Russian)

Введение

Вопросам оценки теплоустойчивости ограждений и помещений уделяли внимание такие ученые, как О. Е. Власов [1], С. И. Муромов [2], Л. А. Семенов [3], А. М. Шкловер [4] и др. Наибольшим совершенством обладает инженерная методика оценки влияния нестационарных факторов на тепловой режим помещения, разработанная В. Н. Богословским [5]. Данная методика позволяет учитывать совокупное влияние гармонических и прерывистых поступлений как конвективной, так и лучистой теплоты.

Традиционные методики оценки влияния нестационарных факторов на изменение температуры внутренней среды помещения основаны на представлении об одномерности температурного поля в ограждениях. Не учитывается пространственное распределение параметров микроклимата в помещении. Использование численного моделирования позволяет устранить эти недостатки. В современных исследованиях математическое моделирование на основе дифференциальных уравнений переноса теплоты и массы широко используется для анализа формирования параметров микроклимата в условиях нестационарного характера внешних и внутренних определяющих факторов [6–8].

На основе системного подхода автором статьи проведено исследование* влияния периодического изменения температуры наружного воздуха на температуру обслуживаемой зоны помещения (зоны обитания), представляющей собой пространство высотой 2 м от пола. Использована разработанная и реализованная в виде программы двумерная физико-математическая модель, которая учитывает сопряженность и нестационарность различных видов теплообмена в ограждениях и в свободном пространстве отапливаемых помещений для различных видов отопительных приборов. Учитывались конструктивные особенности огражде-

ний и заполнений световых проемов. Модель включала в себя уравнения лучистого теплообмена между внутренними поверхностями, оконными стеклами и окружающей средой.

Удовлетворительная степень соответствия результатов расчета по двумерной модели реальным трехмерным процессам подтверждена экспериментами. Дифференциальные уравнения, составляющие модель, приведены в [9].

Постановка задачи

Гармонические колебания наружной температуры T_n во времени заданы формулой

$$T_n = T_{n0} + A_n \cos\left(\frac{2\pi}{P} \tau\right), \quad (1)$$

где T_{n0} – среднее значение температуры наружного воздуха; A_n – амплитуда гармонических изменений; P – период; τ – время.

Приняты следующие значения параметров: $T_{n0} = -24$ °С, $P = 24$ ч. Используются три варианта амплитуды колебаний A_n : 6; 9 и 12 °С. Расчетная область представляла собой вертикальный разрез отапливаемого помещения, расположенного на нижнем этаже, по середине окна. Снизу находился подвал с температурой 5 °С. В смежных помещениях задавалась температура воздуха 20 °С. Высота помещения 2,5 м, длина 6,0 м.

Рассмотрены два вида нагревателей: радиатор и напольное отопление. Нагрузка приборов задавалась постоянной во времени в соответствии с тепловым балансом, определенным по традиционной методике. Расчеты выполнены для трех комбинаций теплофизических свойств ограждений.

Комбинация 1. Материал наружного и внутреннего слоев наружной стеновой панели – железобетон, в качестве теплоизоляционного слоя принят пенополистирол. Оконная рама и подоконник – из древесины. Стеклопакет представлен материалом с эквивалентными теплофизическими характеристиками. Материал перекрытий и внутренней стены – железобетон.

* Выполнено под руководством докт. техн. наук, проф. П. И. Дячeka.

Комбинация 2. Отличие от комбинации 1 в том, что для «эквивалентного» материала прозрачной части остекления плотность снижена с 314 до 150 кг/м³.

Комбинация 3. Отличие от комбинации 1 в том, что железобетон по описанной далее причине заменен не существующим в природе материалом, у которого сохранены все теплофизические свойства железобетона, в то время как плотность задана 1000 кг/м³ вместо 2500 кг/м³.

Для комбинаций 2 и 3 теплофизические свойства преднамеренно задавались таким образом, чтобы сохранить неизменным стационарный тепловой баланс и соответственно использовать одинаковую мощность отопления. Снижение в комбинации 2 плотности «эквивалентного» материала стеклопакета привело к пропорциональному снижению в два раза удельной объемной теплоемкости (c_p , Дж/(м³·К)) и общей тепловой аккумулирующей способности данного элемента ограждения (Дж/К). На общую аккумулирующую способность всех ограждений помещения описанная корректировка не оказала существенного влияния.

Железобетон – основной материал ограждений – обладает самой значительной объемной теплоемкостью c_p . Поэтому в комбинации 3 уменьшение в 2,5 раза плотности замещающего материала обеспечило практически пропорциональное снижение общей аккумулирующей способности всех ограждений помещения.

Гармонические изменения температуры наружного воздуха, построенные по формуле (1) в соответствии с заданными параметрами, представлены на рис. 1.

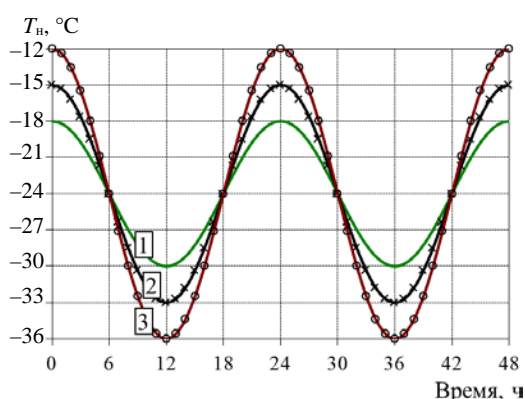


Рис. 1. Гармонические колебания температуры наружного воздуха при ее амплитуде A_n , °C: 1 – 6; 2 – 9; 3 – 12

Fig. 1. Harmonic fluctuations of outside air temperature with its amplitude A_n , °C: 1 – 6; 2 – 9; 3 – 12

Результаты расчетов

Колебания температуры внешней среды порождают гармонические изменения температуры в наружных ограждениях, что, в свою очередь, вызывает колебания температуры внутреннего воздуха, которые влияют на его циркуляцию. Расчетное изменение во времени температуры воздушной среды T_b , осредненной в пределах обслуживаемой зоны, для комбинации 1 теплофизических свойств материалов показано на рис. 2. Наблюдаются гармонические изменения с тем же периодом P , которые можно описать формулой

$$T_b = T_{b0} + A_b \cos\left(\frac{2\pi}{P}(\tau - \tau_3)\right), \quad (2)$$

где T_{b0} – среднее значение температуры за период колебаний; A_b – амплитуда гармонических изменений; τ_3 – время запаздывания относительно колебаний температуры наружного воздуха.

По данным рис. 2 видно, что во всех расчетах с применением радиатора $T_{b0} = 23,8$ °C. При использовании напольного отопления $T_{b0} = 17,2$ °C. Эти показатели найдены и для прочих комбинаций теплофизических свойств материалов. Указанные T_{b0} равны значениям, полученным автором при решении стационарных задач. Обнаружено, что в процессе использования напольного отопления дополнительные потери теплоты через конструкцию пола и перекрытие составляют 20 %, в то время как в условиях применения радиатора только 4,8 % нагрузки непродуктивно затрачивается на перегрев расположенных рядом ограждений [10].

Значения амплитуды A_b и запаздывания τ_3 колебаний T_b , изображенные на рис. 2, приведены в табл. 1. Независимо от вида прибора, A_b прямо пропорциональна амплитуде изменений температуры наружного воздуха A_n , в то время как значение τ_3 не связано с величиной A_n .

Результаты показывают, что амплитуда A_b в случае применения радиатора почти в два раза меньше, чем при напольном отоплении. Запаздывание τ_3 на четверть больше для радиатора. Отметим, что параметры колебаний определяются сложным взаимодействием множества элементов помещения как системы.

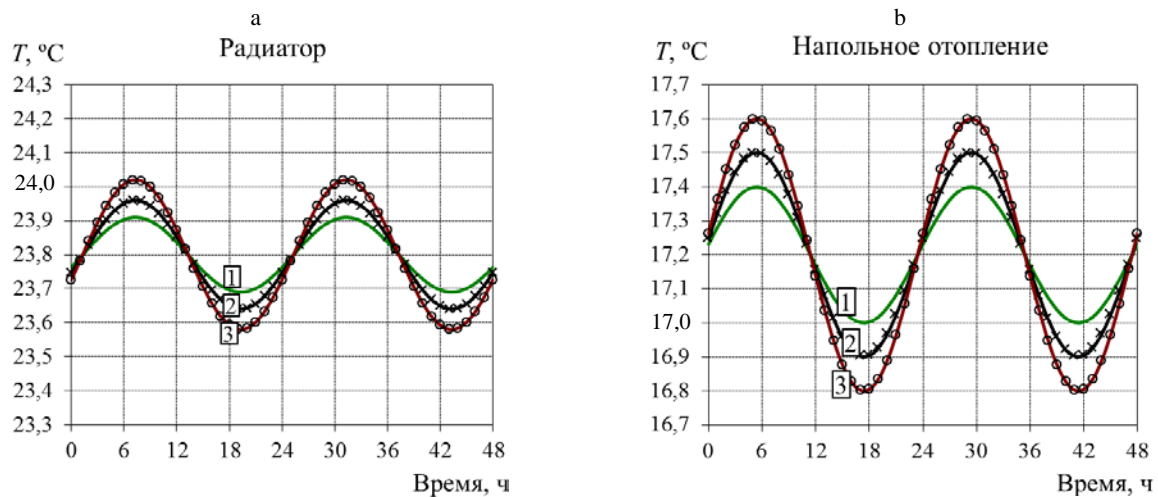


Рис. 2. Колебания средней температуры внутреннего воздуха обслуживаемой зоны для радиатора (а) и напольного отопления (б) (комбинация 1) при амплитуде температуры наружного воздуха A_n , °С: 1 – 6; 2 – 9; 3 – 12

Fig. 2. Fluctuations of average indoor air temperature within occupied zone for radiator (a) and underfloor heating (b) (combination 1) with amplitude of outside air temperature A_n , °С: 1 – 6; 2 – 9; 3 – 12

Таблица 1

Параметры колебаний T_b . Комбинация 1:
обычные свойства материалов ограждений

Parameters of T_b -fluctuations. Combination 1:
general properties of building envelope materials

Вид отопительного прибора	$A_n = 6\text{ °C}$		$A_n = 9\text{ °C}$		$A_n = 12\text{ °C}$	
	A_b , °C	τ_3 , ч	A_b , °C	τ_3 , ч	A_b , °C	τ_3 , ч
Радиатор	0,11	7,3	0,16	7,3	0,22	7,3
Напольное отопление	0,20	5,4	0,30	5,4	0,40	5,4

Таблица 2

Параметры колебаний T_b . Комбинация 2:
плотность «эквивалентного» материала прозрачной части остекления снижена с 314 до 150 кг/м³

Parameters of T_b -fluctuations. Combination 2:
density of “equivalent” material for transparent part has been reduced from 314 to 150 kg/m³

Вид отопительного прибора	$A_n = 6\text{ °C}$		$A_n = 9\text{ °C}$		$A_n = 12\text{ °C}$	
	A_b , °C	τ_3 , ч	A_b , °C	τ_3 , ч	A_b , °C	τ_3 , ч
Радиатор	0,11	6,6	0,16	6,6	0,22	6,6
Напольное отопление	0,20	4,8	0,30	4,8	0,40	4,8

На амплитуду и запаздывание изменений температуры T_b влияет при прочих равных условиях массивность ограждений. Колебания T_n вызывают изменение температуры не только в наружных ограждениях, непосредственно омываемых наружным воздухом. Температурная волна проникает также и во внутренние ограждения путем теплопроводности при непосредственном контакте конструкций, а также путем конвекции и радиационного теплообмена в помещении. В итоге температура всех внутренних поверхностей изменяется с тем же периодом, что и вынуждающие колебания T_n , но с различными амплитудами и запаздываниями относительно T_n .

Существенно различающиеся поля скорости воздуха в условиях использования радиатора и напольного отопления, разные (часто противоположные) направления теплового потока на внутренних поверхностях и в толще большинства ограждений обуславливают отличия в параметрах гармонических изменений T_b . Для комбинации 2 теплофизических свойств материалов параметры колебаний T_b указаны в табл. 2.

Сравнение с результатами расчетов для комбинации 1 показывает различие только в величине запаздывания τ_3 , которое в данной группе расчетов для радиатора сократилось на 10 %, а для напольного отопления – на 12 %. Снижение примерно в два раза плотности (и соответственно объемной теплоемкости) материала стеклопакета привело к уменьшению инерционности заполнения оконного проема. По этой причине сократилось запаздывание гармонических изменений температуры на внутренней поверхности остекления, что привело к указанному снижению запаздывания колебаний T_b относительно T_n .

Параметры гармонических изменений T_b в расчетах с комбинацией 3 теплофизических свойств материалов приведены в табл. 3.

Для комбинации 3, по сравнению с расчетами комбинации 1, существенно увеличилось значение A_b , в то время как значения τ_3 увеличились не столь значительно. Уменьшение в 2,5 раза объемной теплоемкости замещающего материала по отношению к реальному железобетону отразилось как на наружных (трех-

слои стеновых панелях), так и на внутренних ограждениях, выполненных из этого материала. Теплоусвоение и тепловая инерция всех ограждений помещения, за исключением заполнения оконного проема, уменьшились.

Таблица 3

Параметры колебаний T_b . Комбинация 3:
плотность материала, замещающего железобетон,
задана 1000 кг/м^3

Parameters of T_b -fluctuations. Combination 3:
density of material substituting reinforced concrete
has been assigned as 1000 kg/m^3

Вид отопительного прибора	$A_n = 6 \text{ }^\circ\text{C}$		$A_n = 9 \text{ }^\circ\text{C}$		$A_n = 12 \text{ }^\circ\text{C}$	
	$A_b, \text{ }^\circ\text{C}$	$\tau_3, \text{ ч}$	$A_b, \text{ }^\circ\text{C}$	$\tau_3, \text{ ч}$	$A_b, \text{ }^\circ\text{C}$	$\tau_3, \text{ ч}$
Радиатор	0,15	7,6	0,20	7,6	0,25	7,6
Напольное отопление	0,25	5,8	0,37	5,8	0,49	5,8

Важно отметить, что снижение тепловой инерции основных ограждений приводит к увеличению амплитуды A_b колебаний температуры внутреннего воздуха обслуживаемой зоны.

ВЫВОДЫ

По результатам выполненных исследований можно сделать следующие выводы:

- снижение инерционности наружных ограждений, через которые происходят основные теплотери (показано на примере остекления), приводит к уменьшению величины запаздывания, т. е. к более быстрому проникновению наружной температурной волны в помещение. При этом амплитуда колебаний температуры внутреннего воздуха в обслуживаемой зоне остается постоянной по причине неизменной тепловой инерции основных конструкций (стен, пола и потолка);
- при уменьшении массивности стен и перекрытий наблюдается существенное увеличение амплитуды колебаний температуры внутреннего воздуха в зоне обитания, тогда как запаздывание относительно гармонических изменений температуры наружного воздуха остается практически постоянным.

ЛИТЕРАТУРА

1. Власов, О. Е. Основы строительной теплотехники (к курсу отопления и вентиляции) / О. Е. Власов. М.: Тип. ВИА РККА, 1938. 94 с.
2. Муромов, С. И. Расчетные температуры наружного воздуха и теплоустойчивость ограждений / С. И. Муромов. М.; Л.: Госстройиздат, 1939. 72 с.
3. Семенов, Л. А. Теплоустойчивость и печное отопление жилых и общественных зданий / Л. А. Семенов. М.: Изд-во и тип. Машстройиздата в Л., 1950. 264 с.
4. Шкловер, А. М. Теплоустойчивость зданий / А. М. Шкловер. М.: Гос. изд-во лит. по стр-ву и архит., 1952. 168 с.
5. Богословский, В. Н. Строительная теплофизика (теплофизические основы отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха) / В. Н. Богословский. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Высш. шк., 1982. 415 с.

6. Numerical Study on the Thermal Performance of Building Wall and Roof Incorporating Phase Change Material Panel for Passive Cooling Application / X. Kong [et al.] // *Energy and Buildings*. 2014. Vol. 81. P. 404–415.
7. Rohdin, P. Experiences from Nine Passive Houses in Sweden – Indoor Thermal Environment and Energy Use / P. Rohdin, A. Molin, B. Moshfegh // *Building and Environment*. 2014. Vol. 71. P. 176–185.
8. Yang, D. Analysis and Experiments on the Periodically Fluctuating Air Temperature in a Building with Earth-Air Tube Ventilation / D. Yang, J. Zhang // *Building and Environment*. 2015. Vol. 85. P. 29–39.
9. Захаревич, А. Э. Особенности формирования микроклимата в многоцветных пространствах / А. Э. Захаревич // *Вестник МГСУ*. 2011. № 7. С. 148–154.
10. Захаревич, А. Э. Формирование параметров микроклимата в отапливаемых помещениях в условиях естественной конвекции / А. Э. Захаревич. Минск: БНТУ, 2012. 22 с.

Поступила 17.03.2016

Подписана в печать 23.05.2016

Опубликована онлайн 29.11.2016

REFERENCES

1. Vlasov O. E. (1938) *Fundamentals of Construction Thermal Technology (for the Course of Heating and Ventilation)*. Moscow, VIA RKKA [Military-Engineering Academy of Workers' and Peasants' Red Army] Publishing House. 94 (in Russian).
2. Muromov S. I. (1939) *Design Temperatures and Thermal Stability of Cladding Structures*. Moscow, Leningrad, Gosstroyizdat. 72 (in Russian).
3. Semenov L. A. (1950) *Thermal Stability and Furnace Heating of Residential and Public Buildings*. Moscow, Publishing House "Mashstroyizdat" in Leningrad. 264 (in Russian).
4. Shklover A. M. (1952) *Thermal Stability of Buildings*. Moscow: State Publishing House for Literature on Construction and Architecture. 168 (in Russian).
5. Bogoslovsky V. N. (1982) *Construction Thermophysics (Thermophysical Fundamentals of Heating, Ventilation and Conditioning of Air)*. 2nd ed. Moscow, Vysshaya Shkola. 415 (in Russian).
6. Kong X., Lu S., Li Y., Huang J., Liu S. (2014) Numerical Study on the Thermal Performance of Building Wall and Roof Incorporating Phase Change Material Panel for Passive Cooling Application. *Energy and Buildings*, 81, 404–415. DOI: 10.1016/j.enbuild.2014.06.044
7. Rohdin P., Molin A., Moshfegh B. (2014) Experiences from Nine Passive Houses in Sweden – Indoor Thermal Environment and Energy Use. *Building and Environment*, 71, 176–185. DOI: 10.1016/j.buildenv.2013.09.017.
8. Yang D., Zhang J. (2015) Analysis and Experiments on the Periodically Fluctuating Air Temperature in a Building with Earth-Air Tube Ventilation. *Building and Environment*, 85, 29–39. DOI: 10.1016/j.buildenv.2014.11.019.
9. Zakharevich A. E. (2011) Peculiar Features in Formation of Microclimate in Void Space. *Vestnik MGSU* [Moscow State University of Civil Engineering Bulletin], (7), 148–154 (in Russian).
10. Zakharevich A. E. (2012) *Formation of Microclimate Parameters in Heated Space Under Conditions of Natural Convection*. Minsk, BNTU [Belarusian National Technical University]. 22 (in Russian).

Received: 17.03.2016

Accepted: 23.05.2016

Published online: 29.11.2016