

УДК 518.5:532.54

## ДОПУСТИМЫЕ ПРЕДЕЛЫ КОРРЕКТИРОВКИ ОТОПИТЕЛЬНОЙ НАГРУЗКИ ПРИ ОПТИМИЗАЦИИ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ТЕПЛОИСТОЧНИКОВ

Доктора техн. наук, профессора ДЯЧЕК П. И., СЕДНИН В. А.,  
канд. техн. наук ЗАХАРЕВИЧ А. Э., магистр. техн. наук ШКЛЯР И. В.

*Белорусский национальный технический университет*

E-mail: pte@bntu.by

## ACCEPTABLE LIMITS FOR CORRECTION OF HEATING LOAD WHILE OPTIMIZING OPERATIONAL MODES OF HEAT SOURCES

DIACHEK P. I., SEDNIN V. A., ZAKHAREVICH A. E., SHKLIAR I. V.

*Belarusian National Technical University*

На основе разработанной математической модели и алгоритма ее реализации выполнено численное исследование температурных полей жилого помещения многоквартирного дома, позволившее оценить динамику изменения температуры воздуха в нестационарных условиях в результате повышения или снижения мощности отопительных приборов относительно нормируемой величины. Результаты расчетов показали, что для панельных домов допустимый период изменения мощности составляет не более 6 ч. Диапазон изменения мощности при этом – до 40 %. Практическое применение полученные результаты могут найти в интеллектуальных системах теплоснабжения минимизации потребления топливно-энергетических ресурсов.

**Ключевые слова:** теплоснабжение, отопительная нагрузка, отопительный прибор, тепловая мощность, температурные поля.

Ил. 3. Библиогр.: 8 назв.

Numerical investigations of temperature fields in the apartments of a multi-dwelling building has been carried out on the basis of the developed mathematical model and algorithm of its realization. The investigations have made it possible to evaluate dynamics of changes in air temperature under unsteady conditions due to increase or reduction heating device capacity with regard to standardized values. The calculation results have demonstrated that a permissible period for capacity change accounts for not more than 6 hours. At the same time the rate of capacity change is up to 40 %. The obtained results can be practically used in the intelligent heating supply systems with the purpose to minimize consumption of fuel and power resources

**Keywords:** heat supply, heating loading, heating device, heating capacity, temperature fields.

Fig. 3. Ref.: 8 titles.

**Введение.** Применение интеллектуальных технических комплексов является перспективной реальностью, позволяющей на современном этапе развития общества обеспечить рост его благосостояния. В мировой практике тенденция использования данных комплексов в инженерной городской инфраструктуре получила термин «умный город» [1]. Под ним понимают город, инфраструктура которого выстроена на основе технологий, позволяющих рационально использовать материальные, трудовые и энергетические ресурсы и минимизировать воздействия на окружающую среду. Очевидно, что при реализации концепции «умного города» системы инженерной инфраструктуры должны обладать дополнительными опциями по сравнению с традиционными. В частности, элементы систем энергоснабжения должны «уметь» согласовывать производство и потребление энергии по критерию минимизации потребления топливно-энергетических ресурсов.

В данной постановке теоретический и практический интерес представляет задача определения допустимых границ корректировки нагрузок теплоснабжения. Как известно, основными видами тепловой нагрузки в социально-бытовой сфере являются отопление и горячее водоснабжение. Первая (отопительная) в течение отопительного сезона (для Беларуси его продолжительность составляет около 4000 ч в год) изменяется в пределах от 20 до 100 % своего расчетного максимума и определяется в основном температурой наружного воздуха. Вторая нагрузка (горячее водоснабжение) в среднем для жилой застройки составляет 20–25 % от расчетного максимума нагрузки отопления и изменяется в течение суток от 0 до 100 %, имея два ярко выраженных пика в будние дни и специфическую структуру в воскресные и праздничные дни в зависимости от сезона года. По технологии управления в СЦТ, не оборудованных автоматизированными системами управления технологическими процессами (АСУ ТП), отпуск теплоты при качественном способе регулирования осуществляется по средней температуре предыдущих суток. При наличии интеллектуальной надстройки АСУ ТП в системах управления оптимальный период осреднения температуры определяется рядом факторов, характеризующих структуру подключенной к теплоисточнику тепловой сети и структуру подключенной нагрузки [2, 3]. В данном случае при планировании работы теплоисточника учитываются прогнозные метеоданные. Естественно, в этих условиях существуют задачи оптимизации работы теплоисточников (выравнивание суточной нагрузки для котельных, работа по электрическому графику для теплоэлектроцентралей и др.). Кроме того, важно знать пределы недоотпуска теплоты в аварийных ситуациях. Для решения этих задач авторами были выполнены численные исследования по определению изменения температурных полей в жилых помещениях при снижении (увеличении) потребления теплоты системами отопления.

Отопительные приборы реализованы в модели как распределенные в пространстве источники теплоты, по геометрии, месту расположения и другим характеристикам подобные соответствующим реальным отопительным приборам.

**Методика исследования.** Цель проведения численных экспериментов – определение влияния вида нагревателя на динамику изменения тем-

пературы внутреннего воздуха в отапливаемом помещении вследствие изменения мощности подводимого теплового потока к системе отопления. Для численного эксперимента выбрано помещение, расположенное на нижнем этаже здания: высота  $H = 2,5$  м, длина  $L = 6,0$  м. Расчетная область размером и формой представляла вертикальный разрез по окну ограждающих конструкций и воздушной среды помещения. Теплофизические характеристики материалов ограждающих конструкций и начальные условия заданы одинаково для всех расчетов. Наружная стена представляла собой трехслойную панель. Материал наружного и внутреннего слоев – железобетон, теплоизоляционный слой – из пенополистирола. Материал оконной рамы и подоконника – древесина. Камеры стеклопакета – материал с эквивалентными теплофизическими характеристиками. Стена, расположенная справа, – железобетонная. Во всех расчетах материал перекрытий, отделяющих рассматриваемое помещение от других помещений с температурой воздуха  $20$  °С, учитывает свойства железобетонного перекрытия с напольным покрытием. Особенность конструкции пола над подвалом, в котором задана температура воздуха  $5$  °С, заключалась в том, что на железобетонном перекрытии снизу закрепляли дополнительный слой теплоизоляции (с целью обеспечения нормируемого значения сопротивления теплопередаче перекрытия над подвалом).

В расчетах учитывали лучистый теплообмен поверхностей внутри помещения, оконных стекол и окружающей среды. Степень черноты принимали: деревянных поверхностей –  $0,90$ , конвектора и радиатора –  $0,95$ , стекла (с селективным покрытием) –  $0,10$ , остальных поверхностей внутри помещения –  $0,94$ , наружной среды –  $0,85$ .

В местах отсечения ограждений границей расчетной области приняты адиабатические граничные условия. Теплообмен между внешними поверхностями ограждающих конструкций, наружным воздухом и воздухом смежных помещений задавали с помощью граничных условий третьего рода. Коэффициенты теплообмена:  $23,0$  Вт/( $\text{м}^2 \cdot \text{К}$ ) – на границе с наружным воздухом и  $8,7$  Вт/( $\text{м}^2 \cdot \text{К}$ ) – на поверхностях смежных помещений. Параметры лучистого теплообмена остекления с наружной средой рассчитывали отдельно, поэтому конвективную часть теплообмена светопрозрачной конструкции с наружным воздухом определяли с помощью коэффициента  $\alpha$ , значение которого принимали  $23,0$  Вт/( $\text{м}^2 \cdot \text{К}$ ).

Проведенные ранее исследования показали, что при суточных колебаниях температуры наружного воздуха  $\pm 12$  °С амплитуда колебаний температуры внутреннего воздуха в аналогичном помещении составляет не более  $\pm 0,4$  °С для различных видов отопительных приборов. Поэтому в данном исследовании температуру наружного воздуха задавали постоянной в каждом из расчетов.

Рассмотрены системы с тремя видами отопительных приборов: 1) радиатор, 2) конвектор, 3) напольное отопление. Первые два вида отопительных приборов располагались под окном, на разрезах они схематично изображены прямоугольниками. Нагревательные элементы напольного отопления условно показаны в ограждениях с помощью линий. Подразумевается, что отопительные элементы равномерно расположены вдоль данных линий. В соответствии с особенностями алгоритма расчета мощность отопи-

тельных приборов  $Q_{tot}$  (Вт) задавали на 1 м ширины помещения, измеряемой вдоль оси  $z$ . Данная ось перпендикулярна плоскости, в которой лежит расчетная область. Теплоотдача конвектора и радиатора состояла из лучистой и конвективной частей. При этом конвективная доля у конвектора составляла 93 %, а у радиатора – 70 % [6].

Расчеты проводили для различных значений характерных температур наружного воздуха  $T_n$  (–24; –12; –1,6 и 8 °С). Каждый из расчетов состоял из двух стадий. Первая – стартовый расчет, проводимый для выхода на стационарный режим. При этом тепловые нагрузки приборов  $Q_{tot}$  задавали в соответствии с теплопотерями помещения, рассчитанными по нормативной методике [7, 8], из условия обеспечения температуры внутреннего воздуха, равной 20 °С. Поскольку во всех расчетах температура воздуха в подвале задана постоянной (5 °С), зависимость  $Q_{tot}$  от  $T_n$  являлась нелинейной. Отличие от тепловой нагрузки, пропорционально рассчитываемой относительно значения  $Q_{tot}$  для расчетных условий ( $T_n = -24$  °С), максимально для  $T_n = 8$  °С. Вторая стадия – основной расчет, выполняемый при измененной мощности отопительного прибора для расчетного периода, равного 24 ч. В ходе этого расчета выполняли наблюдение за изменением средней температуры воздуха в помещении  $T_{в.ср}$ .

Мощность подводимого теплового потока для основного расчета изменяли путем задания корректирующего коэффициента  $K$  к требуемой нагрузке прибора  $Q_{tot}$ . Для каждого стартового расчета (при заданном значении  $T_n$  и виде нагревателя) выполняли основные вычисления со значениями  $K = 0,0; 0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 1,1; 1,2; 1,3$ . В общей сложности были осуществлены 12 стартовых и 96 основных расчетов. Шаг дискретизации по времени во всех вычислениях составлял 10 мин.

Характер распределения параметров микроклимата в помещении нижнего этажа по результатам проведенных стартовых расчетов для  $T_n = -24$  °С и  $Q_{tot} = 190$  Вт приведен на рис. 1. На данных изображениях показан вертикальный разрез по окну ограждающих конструкций, приборов и воздушной среды помещения. Внешняя поверхность трехслойной панели, расположенной слева, омывается наружным воздухом. Снизу находится подвал с температурой воздуха 5 °С, сверху и справа – помещения, в которых задана температура воздуха 20 °С.

На рис. 1 числовые значения изотерм (сплошные линии) показаны в легенде справа от расчетной области. Стрелки отражают поле скорости, их длина пропорциональна абсолютному значению скорости. Масштабная стрелка, соответствующая скорости 1 м/с, указана в верхней части рис. 1.

В случае применения радиатора и конвектора наблюдаются сходные картины движения воздуха. Это связано с компактностью данных приборов и сходным расположением – под окном. Качественно иной характер формирующейся картины движения воздуха в условиях использования напольного отопления обусловлен распределением отопительной мощности практически по всей площади пола помещения.

Графики изменения  $T_{в.ср}$  для разных температур наружного воздуха (–24 и 8 °С) представлены на рис. 2, 3. В легенде у каждого изображения приведены значения корректирующего коэффициента мощности нагревательного прибора  $K$ .

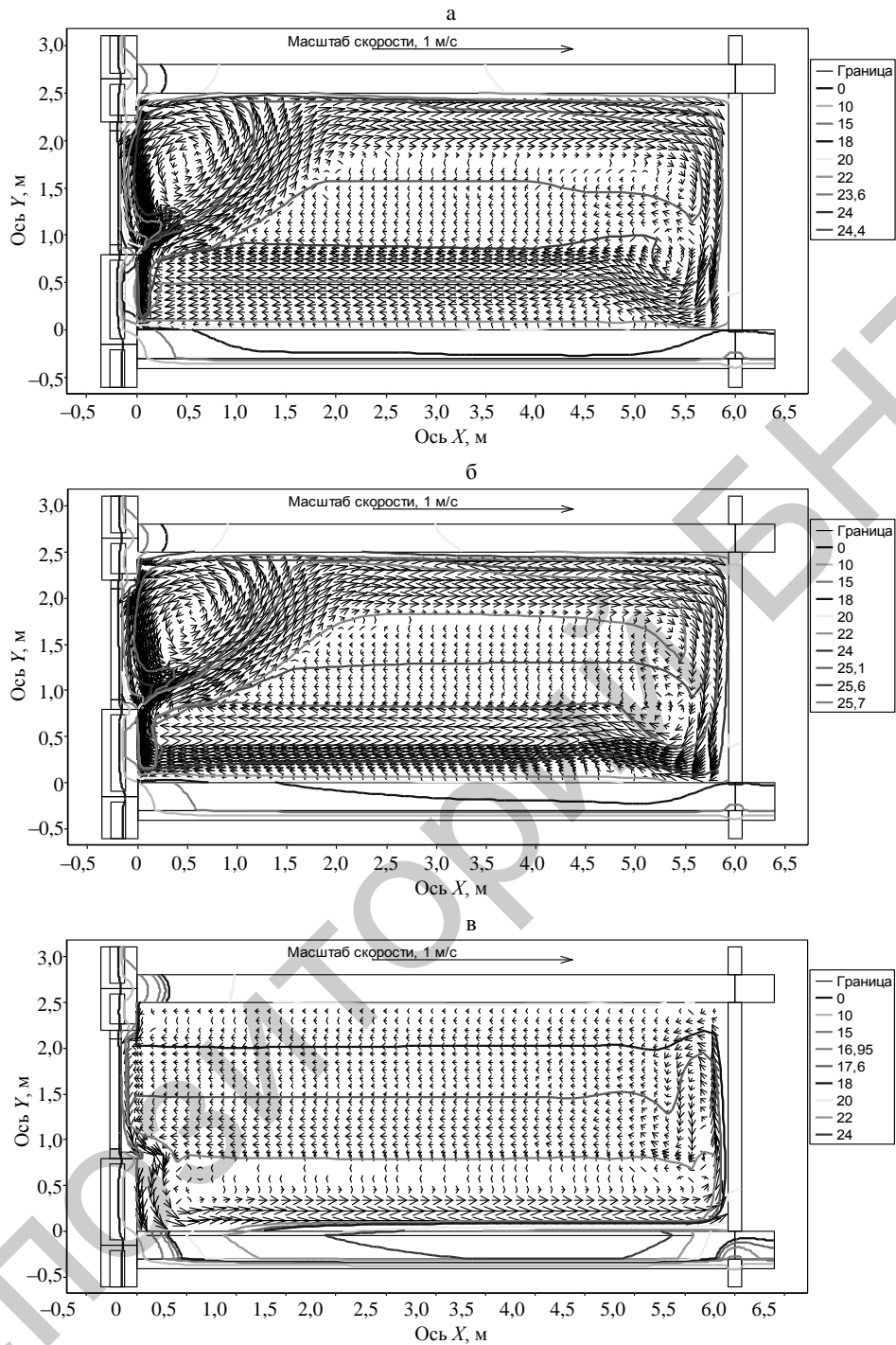


Рис. 1. Поля температур и скоростей перемещения воздуха:  
а – радиатор; б – конвектор; в – напольное отопление

Как отмечалось выше, расчет температурных полей внутри помещения выполнен для четырех характерных режимов работы систем отопления для г. Минска (на рис. 2, 3 представлены результаты расчетов для трех из них). Как видно из графиков, изменение температуры во времени при применении отопительных приборов (радиатора и конвектора) практически иден-

тичны (кривые имеют параболическую форму относительно времени). Для напольного отопления характер изменения температуры во времени ближе к линейной зависимости.

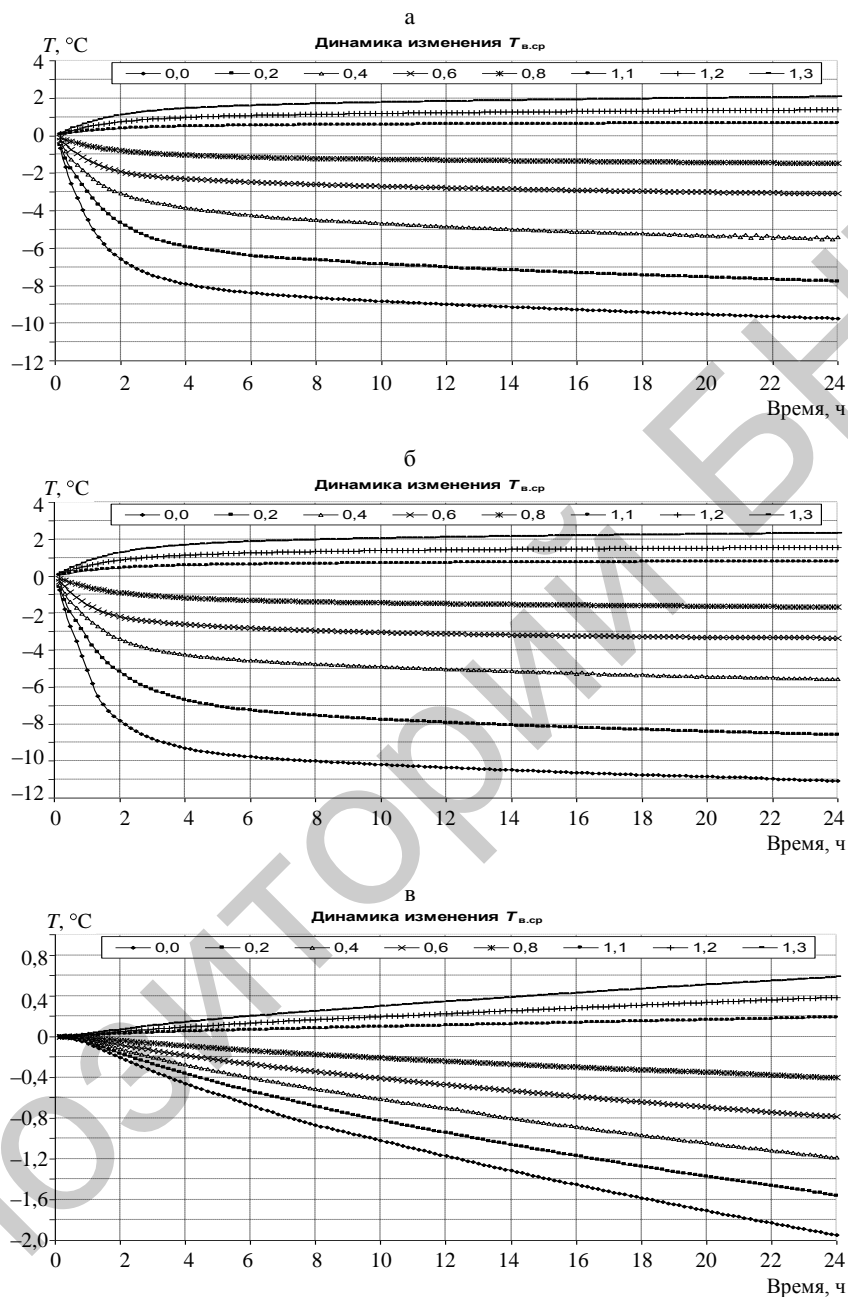


Рис. 2. Графики изменения  $T_{в.ср}$  для  $T_{н} = -24^{\circ}\text{C}$  ( $Q_{tot} = 190 \text{ Вт}$ ):  
а – радиатор; б – конвектор; в – напольное отопление

При увеличении подводимой мощности до 30 % температура за сутки увеличивается в пределах  $2^{\circ}\text{C}$ , видимый ее рост происходит в первые 12 ч, а интенсивный – в первые 6 ч. Таким образом, увеличение мощности до 30 % не приводит к значительным «перетокам» помещений. Аналогично

снижение подводимой мощности вплоть до отключения систем отопления приводит к значительному уменьшению температуры в помещении уже в первые 6 ч.

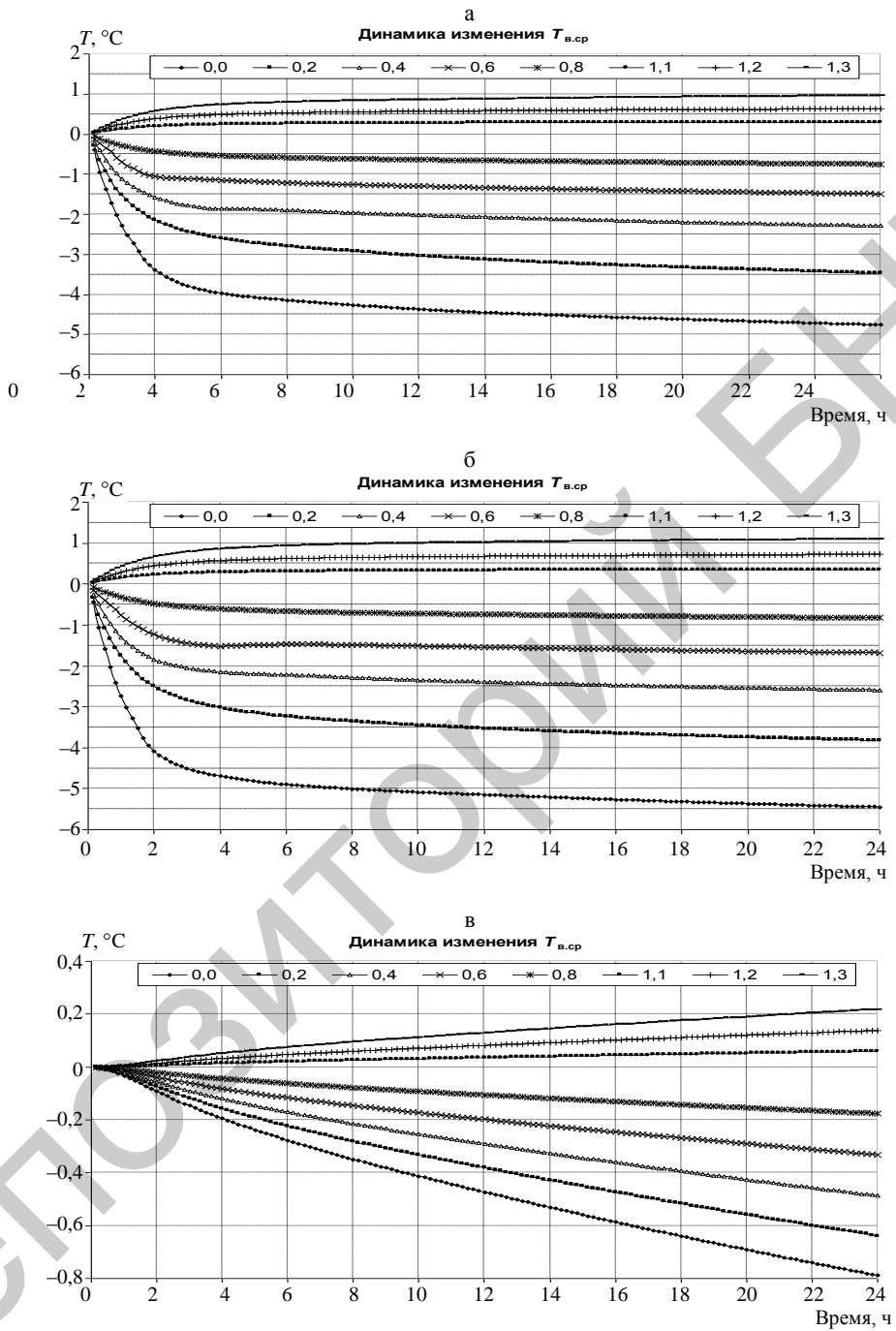


Рис. 3. Графики изменения  $T_{в.ср}$  для  $T_n = 8 ^\circ\text{C}$  ( $Q_{tot} = 80$  Вт):  
а – радиатор; б – конвектор; в – напольное отопление

Так, при полном отключении систем отопления при расчетной температуре наружного воздуха для систем отопления температура уменьшается

на 8 °С, а за 12 ч – на 10 °С. Можно считать, что допустимое снижение подводимой мощности составляет около 40 %, при котором температура в помещении уменьшается на 1,5–2,2 °С за период времени 6 ч для систем с радиаторами и конвекторами. Для напольного отопления период снижения температуры в помещении на 2 °С составляет около 24 ч. Для остальных температур наружного воздуха снижение температуры помещения за соответствующие периоды времени еще меньше.

Следовательно, можно считать допустимым регулирование подводимой мощности к системам отопления в пределах до 40 % от расчетной для данной температуры наружного воздуха и период времени до 6 ч при соблюдении суточного баланса подведенной тепловой энергии с учетом колебаний температуры наружного воздуха. Принципиально допустимо проведение более глубокой разгрузки системы отопления, но при этом возможны варианты, когда продолжительность цикла «снижение/увеличение мощности» может превысить 12 ч, и более сложно будет отрегулировать баланс подведенной энергии в разрезе суток.

## ВЫВОДЫ

1. Выполненное численное исследование тепловых полей жилых помещений в результате снижения (повышения) мощности отопительных приборов позволило определить допустимые границы регулирования мощности подводимой к заданиям тепловой энергии. Возможности аккумулирования тепловой энергии жилыми зданиями без значительных колебаний температуры воздуха жилых помещений за счет прогрева жилых помещений ограничены диапазоном времени до 6 ч. На такой же период допустимо снижение подводимой к системам отопления жилых зданий тепловой мощности. Диапазон изменения мощности при этом может составлять до 40 %.

2. Полученные результаты целесообразно использовать в системах автоматизированного управления технологическими процессами теплоснабжения для согласования режимов выработки и потребления энергии по критерию минимизации затрат топлива.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Левченко, С. А. Интеллектуальные энергетические сети – эффективная технология сбережения энергии / С. А. Левченко // Энергетическая стратегия. – 2012. – № 2. – С. 22–25.
2. Седнин, В. А. Теория и практика создания автоматизированных систем управления теплоснабжением / В. А. Седнин. – Минск: БНТУ, 2005. – 192 с.
3. Седнин, В. А. Концепция создания автоматизированной системы управления технологическими процессами Минских тепловых сетей / В. А. Седнин, А. В. Седнин, Е. О. Воронов // Повышение эффективности энергетического оборудования: материалы науч.-практ. конф.: в 2 т. – СПб., 2012. – Т. 2. – С. 481–500.
4. Работка программного продукта и численное исследование распределения параметров микроклимата в отапливаемых помещениях в условиях естественной конвекции [Электронный ресурс]: отчет о НИР (заключ.) / БНТУ; рук. П. И. Дячек; исполн. А. Э. Захаревич. – Минск, 2008. – 80 с. – № ГР 20080666.



5. Дячек, П. И. Моделирование микроклимата отапливаемых помещений / П. И. Дячек, А. Э. Захаревич // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 2009. – № 2. – С. 34–47.

6. Богословский, В. Н. Отопление: учеб. для вузов / В. Н. Богословский, А. Н. Скани. – М.: Стройиздат, 1991. – 736 с.

7. Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха: СНБ 4.02.01–03. – Введ. 01.01.05. – Минск: Минстройархитектуры, 2004. – 78 с.

8. Внутренние санитарно-технические устройства: в 3 ч. – Ч. 1: Отопление / В. Н. Богословский [и др.]; под ред. И. Г. Староверова и Ю. И. Шиллера. – М.: Стройиздат, 1990. – 344 с.

#### REFERENCES

1. Levchenko, S. A. Intelligent Energy Networks – Efficient Technology of Power Saving / S. A. Levchenko // Energy Strategy. – 2012. – No 2. – P. 22–25.

2. Sednin, V. A. Theory and Practice for Creation of Automatic Control Heat-Supply Systems / V. A. Sednin. – Minsk: BNTU, 2005. – 192 p.

3. Sednin, V. A. Concept on Creation of Automated Control Systems for Technological Processes of the Minsk Heat Supply Network / V. A. Sednin, A. V. Sednin, E. O. Voronov // Efficiency Improvement of Power Equipment: Proceedings of Scientific and Practical Conference: in 2 Vol. – Saint-Petersburg, 2012. – Vol. 2. – P. 481–500.

4. Development of Software Product and Numerical Investigation on Distribution of Micro-Climate Parameters in Heated Space under Conditions of Natural Convection [Electronic Resource]: R&D Report (Final) / BNTU; Research Advisor: P. I. Diachek; Executive Researcher: A. E. Zakharevich. – Minsk, 2008. – 80 p. – No. IP 20080666.

5. Diachek, P. I. Simulation of Micro-Climate in Heated Space / P. I. Diachek, A. E. Zakharevich // Energetika (Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations). – 2009. – No 2. – P. 34–47.

6. Bogoslovsky, V. N. Heating: Manual for HEIs / V. N. Bogoslovsky, A. N. Skanavi. – M.: Stroyizdat, 1991. – 736 p.

7. Heating, Ventilation and Conditioning of Air: SNB 4.02.01–03. – Introduction 01.01.05. – Минск: Minstroyarkhitecture, 2004. – 78 p.

8. Internal Sanitary and Technical Devices: 3 Parts. – Part 1: Heating / V. N. Bogoslovsky [et al.]; Edited by I. G. Staroverov and Yu. I. Shiller. – M.: Stroyizdat, 1990. – 344 p.

Представлена кафедрой ПТЭ и ТТ

Поступила 29.10.2013