

УДК 681.51:664.1(04)

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ОТОПЛЕНИЯ РАСПРЕДЕЛЕННОГО КОМПЛЕКСА ЗДАНИЙ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ СХЕМАХ ТЕПЛОПОТРЕБЛЕНИЯ

© 2011 А.Н. Потапенко, А.С. Солдатенков, Е.А. Потапенко

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

Поступила в редакцию 13.12.2011

На основе математического моделирования процессов отопления распределённого комплекса зданий при различных схемах теплопотребления от автономных источников тепла исследовано и показано, что совместная работа автоматизированных индивидуальных тепловых пунктов (ИТП) и элеваторных узлов этих зданий приводит в целом к существенному уменьшению возможного сбережения тепловой энергии, а в некоторых случаях и к исключению энергосбережения.

Ключевые слова: автономные источники тепла, теплоснабжение, математическое моделирование, автоматическое регулирование, экспериментальные исследования

Практика показывает, что использование автоматического регулирования как в системах централизованного, так и децентрализованного водяного теплоснабжения позволяет повысить качество функционирования систем и снизить потребление тепловой энергии в среднем до 30% в переходные периоды отопительного сезона за счет качественно-количественного регулирования параметров теплоносителя. Важно отметить, что применение систем децентрализованного

теплоснабжения позволяет лучше адаптироваться к условиям потребления тепловой энергии различными объектами, а отсутствие внешних распределительных теплосетей практически исключает потери теплоты при транспортировке теплоносителя [1]. Для децентрализованного теплоснабжения это достигается с помощью применения локальных систем автоматического регулирования (САР) в автономных источниках тепла [2] и тепловых пунктах зданий.

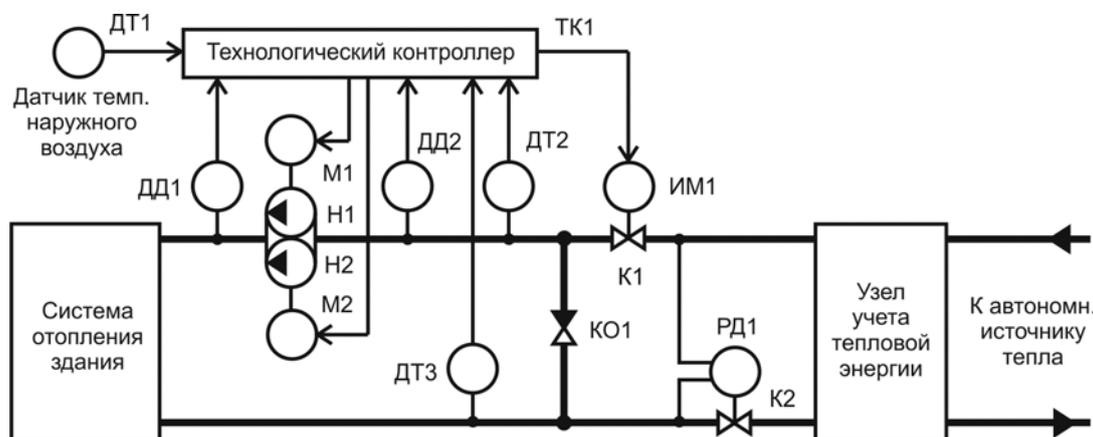


Рис. 1. Блок-схема автоматизированного ИТП здания

Типовой автоматизированный индивидуальный тепловой пункт (ИТП), показанный на

*Потапенко Анатолий Николаевич, кандидат технических наук, профессор кафедры электротехники и автоматики. E-mail: potapenko@intbel.ru*

*Солдатенков Алексей Сергеевич, старший преподаватель кафедры электротехники и автоматики. E-mail: aser@piset.net*

*Потапенко Евгений Анатольевич, кандидат технических наук, профессор кафедры организации и безопасности движения. E-mail: potapenko1@intbel.ru*

рис. 1, содержит технологический контроллер ТК1, моноблок циркуляционных насосов Н1 и Н2 с электроприводами М1 и М2, регулирующий клапан К1 с исполнительным механизмом ИМ1, обратный клапан КО1, регулятор перепада давления прямого действия РД1 с клапаном К2, датчик температуры наружного воздуха ДТ1, датчики температуры ДТ2 и ДТ3, датчики давления ДД1 и ДД2, а также узел учета тепловой энергии, например, теплосчетчик с комплектом датчиков температуры, расхода и давления.

При проведении модернизации инженерной инфраструктуры ЖКХ при обязательном условии повышения её эффективности, в первую очередь, решаются задачи, связанные с проблемами вопроса у потребителей тепла. Например, с концевыми объектами систем централизованного теплоснабжения, которые в виде части зданий не обеспечиваются достаточным количеством тепла по различным причинам. В связи с этим концевые объекты подключаются к децентрализованному теплоснабжению на базе различных схем, например, в виде автоматизированных ИТП и элеваторных узлов.

Водоструйный элеваторный узел по определению не позволяет обеспечивать возможность количественного регулирования теплоносителя на вводах в здания, однако по сравнению с автоматизированным ИТП он существенно дешевле.

Учитывая эту особенность и в условиях ограниченного финансирования при создании системы децентрализованного теплоснабжения зачастую автоматизированными ИТП оборудуются только часть комплекса зданий, обладающих наибольшей тепловой нагрузкой, или обязательно требующие индивидуального регулирования температуры в силу их специфики. Остальные объекты – здания и сооружения, например, носящие вспомогательный характер типа мастерских, гаражей и другие оборудуются водоструйными элеваторными узлами.

**Постановка задачи. Особенности схем моделирования.** Рассмотрим схему децентрализованного теплоснабжения 5-ти зданий на базе 3-х автоматизированных ИТП и 2-х с элеваторными узлами, показанную на рис. 2.

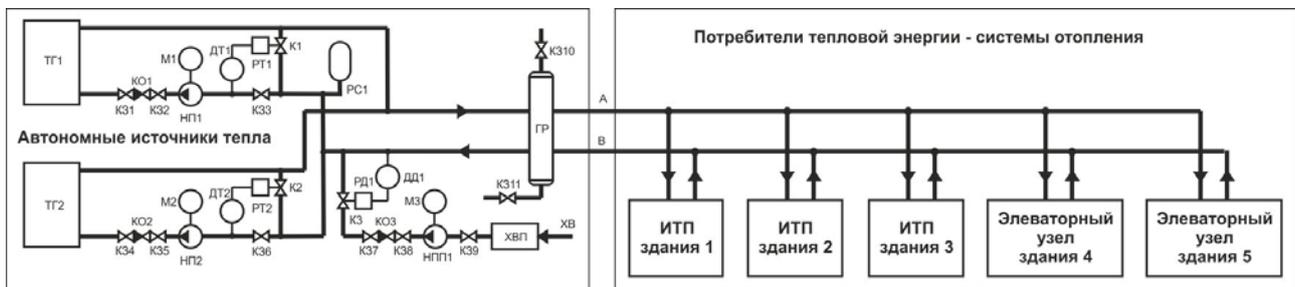


Рис. 2. Блок-схема децентрализованного теплоснабжения 5-ти зданий

Для упрощения представления этой схемы автоматические регуляторы САР автономных источников тепла представлены на базе регуляторов прямого действия. Состав основных элементов источника тепла следующий: теплогенераторы ТГ1 и ТГ2, питательные насосы НП1 и НП2 с электроприводами М1 и М2, регуляторы температуры прямого действия РТ1 и РТ2 с соответствующими клапанами К1 и К2 и датчиками температуры ДТ1 и ДТ2, расширительный бак РС1, подпиточный трубопровод с регулятором давления прямого действия РД1 с регулирующим клапаном К3 и датчиком давления ДД1, подпиточным насосом НПП1 с электроприводом М3 и с системой химической водоподготовки ХВП, а также клапаны обратные КО1 – КО3 и шаровые краны К31 – К311, причём на выходе этой схемы находится гидрораспределитель ГР.

Основная обобщенная функциональная схема системы отопления (СО) автоматизированного ИТП здания показана на рис. 3, состав элементов которой следующий: блоки регуляторов Р1 и Р2 по возмущению и отклонению технологического контроллера, причём Р2 является 2-х контурным; П1 – П3 преобразующие элементы контроллера (преобразуют выходные величины датчиков в измеряемую ими физическую величину); исполнительный механизм ИМ; регулирующий орган РО; Д1 – Д3 датчики температуры; узел смешивания теплоносителей УС (см. рис. 1) от автономного источника тепла и от обратного трубопровода СО здания через переключку

с обратным клапаном; объект управления ОУ в виде СО здания.

Обозначения основных величин функциональной схемы следующие:  $T_a$  – исходная температура наружного воздуха;  $T_a^*$  – температура наружного воздуха на входе в Р1;  $T_{co}$  – программное задание температуры теплоносителя в подающем трубопроводе СО на выходе Р2;  $T_3$  – задание температуры на входе в Р2 с возможностью коррекции  $T_{co}$ ;  $\Delta T$  – отклонение по температуре регулируемой величины;  $\varepsilon$  – выходная величина Р2;  $\xi$  – величина перемещения РО;  $G_{01}$  – расход теплоносителя на входе в УС;  $T_{01}$  – температура теплоносителя в подающем трубопроводе СО;  $T_{01}^*$  – температура теплоносителя на входе в Р1;  $T_{02}$  – температура теплоносителя в обратном трубопроводе СО;  $T_{02}^*$  – температура теплоносителя на входе в Р2.

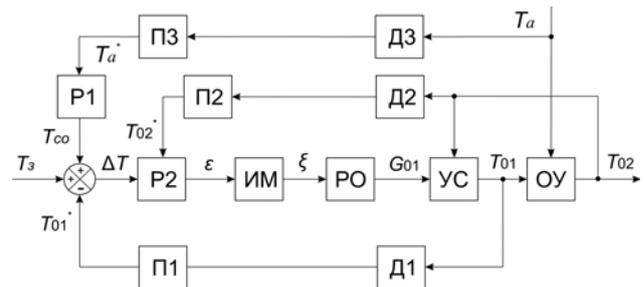


Рис. 3. Функциональная схема системы отопления ИТП здания

Системы уравнений для математического моделирования. Система уравнений (1) записана согласно функциональной схемы СО для автоматизированного ИТП  $j$ -го здания ( $j = 1, 2, 3$ ) и с учётом структур регуляторов Р1 и Р2 (для упрощения функциональной схемы они на рис. 3 не раскрыты). Система (1) включает следующие уравнения: уравнения движения датчиков температуры ДЗ и Д1; уравнения для регуляторов Р1 и Р2 (уравнение отопительного графика температуры для вычисления программного задания  $T_{co}$ ; уравнение связи для определения  $\Delta T$ ; нелинейное уравнение зоны нечувствительности; уравнение регулятора Р2 с учётом особенностей регулирования в системах теплоснабжения, например, для контроллеров фирмы Данфосс; нелинейное уравнение зоны ограничения); уравнение ИМ с учётом выходной величины в виде перемещения (считаем, что постоянные времени электродвигателя ИМ стремятся к 0 в сравнении с  $\tau_i$  для ОУ); уравнение РО относительно выходной величины в виде  $G_{01}$  (считаем процесс безынерционным); уравнение связи для УС (считаем процесс безынерционным) [3]; уравнение движения ОУ по каналу регулирования «температура теплоносителя  $T_{02}$  - температура теплоносителя  $T_{01}$ »; уравнение движения датчика температуры Д2 (учитывается при определении тепловой мощности); уравнение связи для определения величины тепловой мощности  $dQ/dt$ .

$$\left\{ \begin{array}{l} \tau_{daj} \frac{dT_{aj}^*(t)}{dt} + T_{aj}^*(t) = k_{daj} T_{aj}(t), \\ \tau_{d1j} \frac{dT_{01j}^*(t)}{dt} + T_{01j}^*(t) = k_{d1j} T_{01j}(t), \\ T_{coj}(t) = f_{1j}(T_{aj}^*), \\ \Delta T_j(t) = T_{coj}(t) + T_{2j}(t) - T_{01j}^*(t), \\ x_{1j}(\Delta T_j) = \begin{cases} 0, & -X_{dj} \leq \Delta T_j(t) \leq X_{dj}, \\ k_{1j} \Delta T_j(t), & |\Delta T_j(t)| > X_{dj}, \end{cases} \\ \varepsilon_j(t) = \frac{k_m}{X_{pj}} \left[ x_{1j}(\Delta T_j) T_{uj} + \frac{dx_{1j}(\Delta T_j)}{dt} \right], \\ x_{2j}(t) = \begin{cases} k_{2j} \varepsilon_j(t), & -k_m \leq \varepsilon_j(t) \leq k_m, \\ k_m, & |\varepsilon_j(t)| > k_m, \end{cases} \\ \frac{d\xi_j(t)}{dt} = \frac{k_{uj}}{\tau_{uj}} x_{2j}(t), \\ G_{01j}(t) = [G_{1j} + G_{1\phi j}(t) - G_{pj}(t)] k_{aj} e^{k_{\beta j} \xi_j(t)}, \\ T_{1j} G_{01j}(t) + T_{02j}(t)(G_{coj} - G_{01j}(t)) = G_{coj} T_{01j}(t), \\ \tau_{1j} \tau_{2j} \frac{d^2 T_{02j}(t)}{dt^2} + (\tau_{1j} + \tau_{2j}) \frac{dT_{02j}(t)}{dt} + T_{02j}(t) = k_j T_{01j}(t), \\ \tau_{d2j} \frac{dT_{02j}^*(t)}{dt} + T_{02j}^*(t) = k_{d2j} T_{02j}(t), \\ \frac{dQ_j}{dt} = G_{01j}(t) T_{01j}^*(t) - G_{02j}(t) T_{02j}^*(t). \end{array} \right. \quad (1)$$

Дополнительные обозначения в системе уравнений (1) следующие:  $\tau_i$  и  $k_i$  – соответственно постоянная времени и коэффициент передачи  $i$ -го элемента исследуемой системы;  $G_{co}$  – расход теплоносителя на входе СО здания;  $G_1$  – расход теплоносителя на входе РО;  $T_1$  – температура теплоносителя на входе РО;  $G_{1\phi}$  и  $G_p$  – величины промежуточных расходов теплоносителя при аппроксимации уравнения для РО;  $x_1(\Delta T)$  и  $x_2(t)$  – вычисляемые промежуточные величины в регуляторе Р2;  $X_d$  – зона нечувствительности регулятора Р2;  $X_p$  – зона пропорциональности регулятора Р2;  $T_u$  – постоянная регулятора Р2.

Водоструйный элеваторный узел  $j$ -го здания ( $j = 4, 5$ ) можно представить в виде трехходового клапана с фиксированным коэффициентом подмеса, определяемым соотношениями расходов  $G_{01}$  и  $G_{co}$ . С учетом этого система уравнений, описывающих СО здания с элеватором, имеет следующий вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} G_{01j}(t) + G_{0kj}(t) = G_{coj}(t), \\ T_{1j} G_{01j}(t) + T_{02j}(t)(G_{coj} - G_{01j}(t)) = G_{coj} T_{01j}(t), \\ \tau_{1j} \tau_{2j} \frac{d^2 T_{02j}(t)}{dt^2} + (\tau_{1j} + \tau_{2j}) \frac{dT_{02j}(t)}{dt} + T_{02j}(t) = k_j T_{01j}(t), \\ \frac{dQ_j}{dt} = G_{01j}(t) T_{01j}(t) - G_{02j}(t) T_{02j}(t). \end{array} \right. \quad (2)$$

Расходы теплоносителя на вводах распределённого комплекса зданий существенно зависят от положения штоков регулирующих клапанов в автоматизированных ИТП [4]. Определение соотношения расходов выполняется на основе экспериментальных исследований для всех зданий комплекса с учетом системы уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{j=1}^n G_j(t) = G_0, \\ \sum_{j=1}^n S_j(t) G_j(t) |G_j(t)| - \sum_{i=1}^m H_{ni}(t) = 0, \\ S_j(t) = \Delta P_j(t) / G_j^2(t), \\ G_{pj}(t) = \frac{G_0}{\sum_{k=1}^n \sqrt{S_j(t) / S_k(t)}}. \end{array} \right. \quad (3)$$

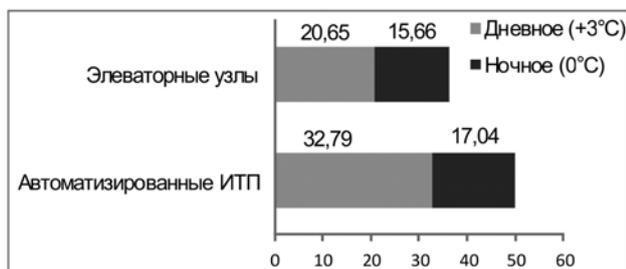
Математическая модель в виде систем уравнений (1)-(3), дополненных экспериментальными данными, позволяет определять параметры теплоносителя на входе и выходе распределённого комплекса зданий при любых изменениях, вызванных, в том числе, изменениями температуры наружного воздуха или качественным регулированием тепла в автономных источниках тепла, а также позволяет исследовать законы регулирования, обеспечивающие энергосбережение и др.

**Результаты расчётов с учётом экспериментальных исследований.** Экспериментальные исследования особенностей системы отопления  $j$ -го здания распределённого комплекса с относительной тепловой нагрузкой, представленной в табл. 1, проводились по аналогии с [4].

**Таблица 1.** Относительная тепловая нагрузка зданий комплекса, ГДж

|                               |       |
|-------------------------------|-------|
| Здание 1 (ИТП 1)              | 0,489 |
| Здание 2 (ИТП 2)              | 0,308 |
| Здание 3 (ИТП 3)              | 0,91  |
| Здание 4 (элеваторный узел 1) | 0,18  |
| Здание 5 (элеваторный узел 2) | 0,15  |

Анализ результатов экспериментальных исследований показал следующее. При переходе в режим пониженного теплопотребления в ночной период времени с целью экономии тепловой энергии установлено, что здания с элеваторными узлами, обладая существенно меньшей относительной тепловой нагрузкой (см. табл. 1), обеспечивают соизмеримое с автоматизированными ИТП ночное потребление тепловой энергии (см. рис. 4). Для выявленного эффекта требуются соответствующие объяснения и доказательства.



**Рис. 4.** Диаграмма сравнительного потребления тепла различными зданиями

С помощью имитационного моделирования в среде Simulink исследуем процесс перераспределения теплоносителя между различными объектами комплекса (см. рис. 2). Для этого используем систему уравнений (1) для каждого  $j$ -го здания с автоматизированным ИТП ( $j = 1, 2, 3$ ), систему уравнений (2) для каждого  $j$ -го здания с элеваторным узлом ( $j = 4, 5$ ), а также систему уравнений (3) с учётом соотношения расходов для комплекса зданий. Начальные условия для  $j$ -го здания ( $j = 1, 2, 3$ ) определяются системой (4)

$$\begin{cases} G_1 = [14,7 & 9,2 & 17,5] \text{ м}^3 / \text{ч}, \\ T_{02} = [46,2 & 45,9 & 46,7] \text{ }^\circ\text{C}, \\ x_2 = [61,8 & 64,4 & 69,8] \%, \\ T_1 = [75,0 & 75,0 & 75,0] \text{ }^\circ\text{C}. \end{cases} \quad (4)$$

Соответственно для  $j$ -го здания ( $j = 4, 5$ ) – системой (5):

$$\begin{cases} G_1 = [5,2 & 6,4] \text{ м}^3 / \text{ч}, \\ T_{02} = [45,55 & 45,3] \text{ }^\circ\text{C}, \\ T_1 = [75,0 & 75,0] \text{ }^\circ\text{C}. \end{cases} \quad (5)$$

Параметры распределённого комплекса зданий задаются на основе экспериментальных исследований ОУ следующим образом:

$$\begin{cases} k = [0,83 & 0,84 & 0,87 & 0,75 & 0,72], \\ \tau_1 = [1390 & 1350 & 1376 & 903 & 887], \\ \tau_2 = [560 & 603 & 573 & 290 & 349]. \end{cases} \quad (6)$$

Дополнительные настройки регуляторов для зданий с автоматизированными ИТП ( $j = 1, 2, 3$ ) следующие:

$$\begin{cases} X_d = [0,52 & 0,48 & 0,54], \\ X_p = [80 & 76 & 82], \\ T_u = [112 & 109 & 117]. \end{cases} \quad (7)$$

Параметры регулирующих клапанов с исполнительными механизмами для зданий с автоматизированными ИТП ( $j = 1, 2, 3$ ) идентичны и определяются как  $k_u=15,0$  мм,  $\tau_u=165$  с. Общими параметрами для распределённого комплекса зданий являются  $T_a = 0^\circ\text{C}$ ,  $k_{df}=1$ .

Для комплекса зданий результаты расчётов изменений  $dQ/dt$  и температур теплоносителей  $T_{02}$  в условиях перехода зданий с автоматизированными ИТП ( $j = 1, 2, 3$ ) в режим пониженного теплопотребления, представлены на рис. 5. Из рис. 5, а и рис. 5, б следует, что исходные величины  $dQ/dt$  и  $T_{02}$  для  $j$ -ых зданий ( $j = 1, 2, 3$ ) уменьшаются, а для остальных – они увеличиваются. Анализ полученных результатов показывает, что снижение температуры теплоносителя  $T_{02}$  зданий автоматизированных ИТП ( $j = 1, 2, 3$ ) связано с уменьшением расхода теплоносителя на их вводах. Однако в замкнутой гидросистеме (см. рис. 2) уменьшение расхода у одних потребителей (здания с автоматизированными ИТП) приводит к увеличению расхода у других (здания с элеваторными узлами), что соответственно приводит к увеличению температуры теплоносителя, например, в обратных трубопроводах на выходах СО  $j$ -ых зданий ( $j = 4, 5$ ).

**Выводы:**

1. Экспериментально выявлен эффект для распределённого комплекса из 5-ти зданий, а именно, при переходе в режим пониженного теплопотребления зданий с автоматизированными ИТП в зданиях с элеваторными узлами увеличивается потребление тепловой энергии, что сводит к минимуму экономию тепловой энергии.

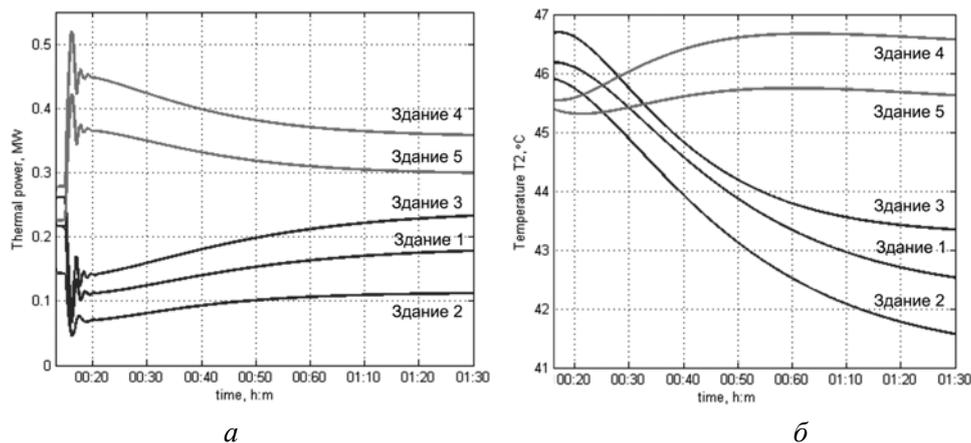


Рис. 5. Расчетные характеристики параметров систем отопления зданий: а – изменения тепловых мощностей; б – изменения температур  $T_{02}$

2. Для распределённого комплекса зданий экономия тепловой энергии возможна только в том случае, если имеется в целом возможность регулирования динамических процессов в системе теплоснабжения.

3. Разработанная математическая модель в виде систем уравнений (1)-(3), дополненная экспериментальными данными, позволяет определять параметры теплоносителя для распределённого комплекса зданий при возможных изменениях процессов от автономных источников тепла до систем отопления зданий, особенно на этапе регулирования теплопотребления.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Хаванов, П.А. Автономная система теплоснабжения – альтернатива или шаг назад? // Вентиляция, отопление, кондиционирование воздуха, тепло-

снабжение и строительная теплофизика (АВОК). 2004. №1. С. 34-37.

2. Миrowsки, А. Материалы для проектирования котельных и современных систем отопления / А. Миrowsки, Г. Ланге, И. Елень. – Польша: Виссманн, 2005. 293 с.
3. Солдатенков, А.С. Исследование процессов перераспределения энергоносителя при частичной автоматизации распределенного комплекса зданий / А.С. Солдатенков, А.Н. Потапенко // Международный научно-технический журнал “Світлотехника та електроенергетика”. 2009. №2 (18). С. 4-8.
4. Потапенко, А.Н. Автоматизированное управление процессом централизованного теплоснабжения распределенного комплекса зданий с учетом моделирования этих процессов / А.Н. Потапенко, Е.А. Потапенко, А.С. Солдатенков, А.О. Яковлев // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2007. № 7-8. С. 120-134.

## MATHEMATICAL MODELING OF HEATING PROCESSES IN THE DISTRIBUTED GROUP OF BUILDINGS AT VARIOUS SCHEMES OF HEAT CONSUMPTION

© 2011 A.N. Potapenko, A.S. Soldatenkov, E.A. Potapenko

Belgorod State Technological University named after V.G. Shuhov

On the basis of mathematical modeling of heating processes in the distributed group of buildings at various schemes of heat consumption from independent heat sources it is investigated and shown that teamwork of the automated individual thermic points (ITP) and elevator units of these buildings results as a whole in essential reduction of possible savings the thermal energy, and in certain cases also to energy-saving exception.

Key words: *independent heat sources, heat supply, mathematical modeling, automatic control, experimental researches*

Anatoliy Potapenko, Candidate of Technical Sciences, Professor at the Department of Electrotechnics and Automatics. E-mail: potapenko@intbel.ru  
Sergey Soldatenkov, Senior Teacher at the Department of Electrotechnics and Automatics. E-mail: aser@pisem.net  
Evgeniy Potapenko, Candidate of Technical Sciences, Professor at the Department of Traffic Management and Road Safety. E-mail: potapenko1@intbel.ru