

УДК 681.51:664.1(04)

## ВОЗМОЖНОСТИ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ОТОПЛЕНИЯ РАСПРЕДЕЛЕННОГО КОМПЛЕКСА ЗДАНИЙ НА ОСНОВЕ СТРАТИФИЦИРОВАННОЙ МОДЕЛИ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ

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

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

Поступила в редакцию 19.03.2011

На основе стратифицированной модели теплоснабжения и экспериментальных исследований представлена модель управления процессом отопления здания, позволяющая исследовать возможности регулирования расходов теплоносителя в ветвях системы отопления, с целью повышения эффективности управления процессом отопления в целом.

Ключевые слова: *теплоснабжение, автоматическое регулирование, математическое моделирование, экспериментальные исследования*

В настоящее время, в связи с падением объемов производства роль топливно-энергетического комплекса (ТЭК) в экономике страны значительно возросла, при этом важной структурой ТЭК является теплоэнергетика, потребляющая порядка 40% топливных ресурсов страны. В связи с этим в энергетической стратегии России повышение эффективности процесса теплоснабжения потребителей и обеспечение его устойчивого развития на базе новых технологий определено стратегической целью [1]. Значительная территориальная протяженность тепловых сетей, большое количество потребителей, действующие возмущения, связанные с потреблением горячей воды населением, переключениями в тепловой сети, работой тепловых завес и др., а также возмущения от изменения климатических факторов, воздействующих на здания – это одна из задач системных исследований этих процессов, являющаяся достаточно сложной. Завоевавшие популярность вследствие крайней необходимости меры по установке узлов автоматического регулирования и учета теплопотребления относятся к первоочередным и позволяют достичь экономического эффекта для определённых типов потребителей тепловой энергии. Однако потребители, чьи узлы ввода тепловой энергии территориально распределены, столкнутся с необходимостью диспетчеризации и супервизорного управления распределёнными узлами

автоматического регулирования теплопотребления. В данном случае ориентация на внедрение современных технологий на базе применения систем автоматического регулирования (САР) для индивидуальных тепловых пунктов (ИТП) недостаточна, необходимо использовать различные технологии управления комплексом распределённых ИТП с учётом САР процессами теплоснабжения и осуществлять автоматизированный мониторинг над ними, т.е. применять инновации в виде автоматизированных систем диспетчерского управления [2].

Учитывая территориальную протяженность объекта исследования, сложность проведения экспериментальных исследований актуальной является задача разработки и исследования моделей процесса отопления на основе системных исследований. В качестве базового метода для уточнения структуры объекта исследования и выявления наиболее значимых факторов, определяющих эффективность, можно использовать стратификацию [3]. Стратификация позволяет исследовать структуру объекта с заданной степенью детализации, что особенно важно для сложных систем, состоящих из большого количества взаимодействующих подсистем, к которым можно отнести и исследуемые системы теплопотребления. Страты – некоторые уровни абстрагирования, выделяемые субъектом при моделировании в соответствии с заданной целью. Стратифицированную структуру можно рассматривать как множество взаимосвязанных моделей и исследовать некоторые ее подмножества с учетом поставленных целей. Рассмотрим в качестве

*Потапенко Евгений Анатольевич, кандидат технических наук, профессор кафедры организации и безопасности движения. E-mail: potapenko@intbel.ru*  
*Солдатенков Алексей Сергеевич, старший преподаватель кафедры электротехники и автоматики. E-mail: aser@pisem.net*

сложной системы процесс теплоснабжения комплекса зданий.

В соответствии с составом системы выделено 5 страт, представленных на рис. 1: здания, системы теплоснабжения зданий, система отопления (СО) здания с зависимым тепло-

снабжением, ветви СО, стояки СО. На каждой страте представлен процесс изменения материального и энергетического баланса системы, на основе анализа изменения температуры  $T$  и расхода  $G$  теплоносителя.

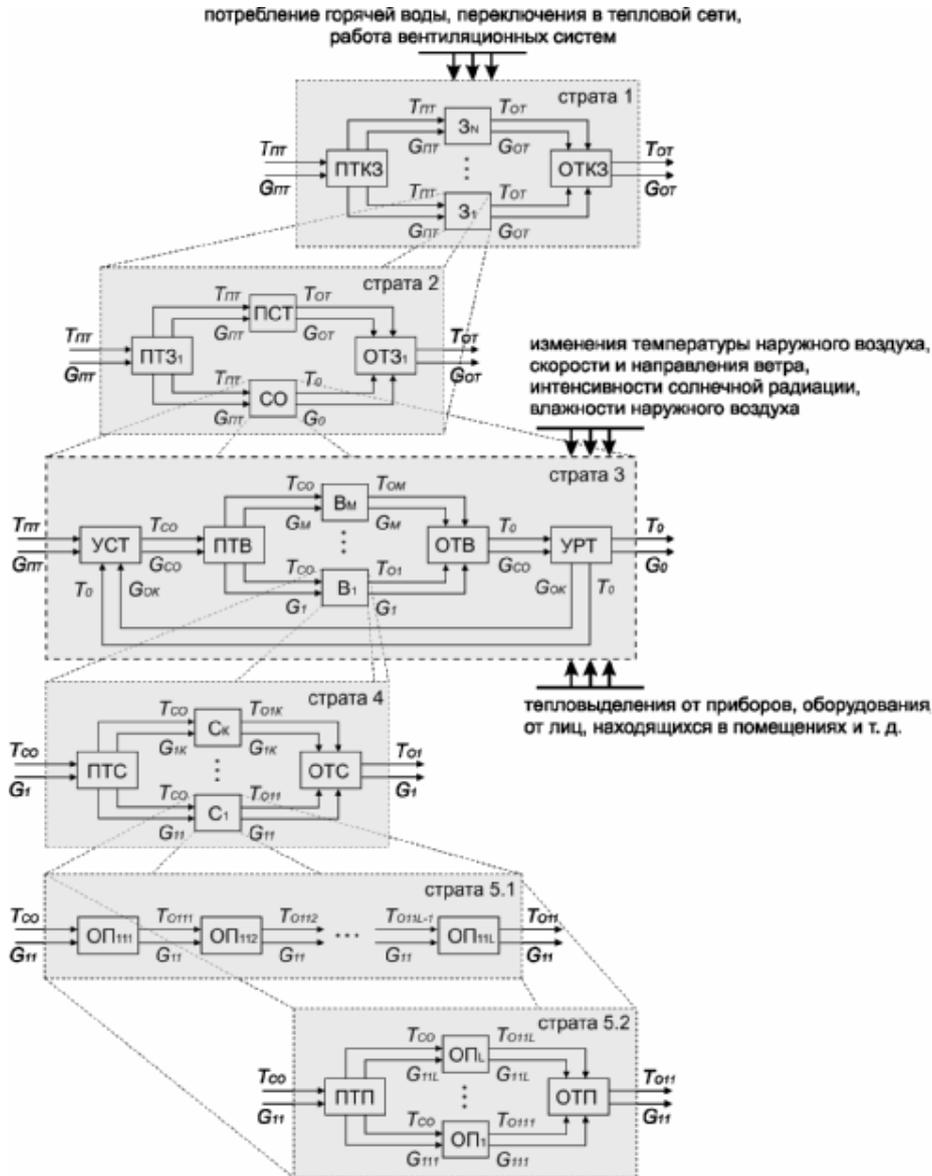


Рис. 1. Стратифицированная модель системы теплоснабжения зданий

Страта 1 – здания. Включает в себя здания ( $Z_i$ ) и систему подающих и обратных трубопроводов комплекса зданий (ПТКЗ, ОТКЗ). Действующие возмущения,  $\Delta G_k$ , связаны с потреблением горячей воды населением, переключениями в тепловой сети, работой вентиляционных систем, а именно, приточно-вентиляционных установок (ПВУ) и др. Страта 2 – система теплоснабжения. Включает в себя прочие системы теплоснабжения здания (ПСТ), такие как ПВУ, горячее водоснабжение, систему отопления (СО), подающие и обратные трубопроводы (ПТЗ, ОТЗ). Страта 3 –

ветви системы отопления. Включает в себя элементы схемы, например, зависимого теплоснабжения СО – участок смешивания теплоносителя в подающем трубопроводе (УСТ) и участок распределения теплоносителя из обратного трубопровода (УРТ), подающие трубопроводы ветвей СО (ПТВ) и обратные трубопроводы ветвей СО (ОТВ), а также ветви СО ( $V_i$ ). Действующие возмущения  $\Delta T$  связаны с тепловыделениями от приборов, оборудования, от лиц, находящихся в помещениях и т.д., а также возмущения  $\Delta C$  от изменения климатических факторов, таких как, температура

наружного воздуха, скорость и направления ветра, интенсивность солнечной радиации, влажность воздуха. Страта 4 – стояки системы отопления. Включает в себя стояки СО с подающими и обратными трубопроводами (ПТС, ОТС). Страта 5 – Отопительные приборы системы отопления. В СО используются однотрубная и двухтрубная схемы питания отопительных приборов. Однотрубная схема (5.1) включает последовательно расположенные отопительные приборы (ОП). Двух-трубная схема (5.2) включает подающие и обратные трубопроводы (ПТП, ОТП) с подключенными ОП.

Применяются следующие основные способы управления процессом отопления зданий:

- регулирование  $T_{CO}$  на вводе в СО. Применяется для зданий с системами отопления, содержащими более 2-х ветвей ( $M > 2$ ). Заключается в изменении температуры теплоносителя  $T_{CO}$ , подаваемого в СО, посредством изменения расхода теплоносителя  $G_{ПТ}$  (см. рис. 1, страты 2 и 3). Основным недостатком данного способа является неравномерность распределения температуры по помещениям здания вследствие невозможности учета климатических факторов и использования одной регулируемой переменной  $G_{ПТ}$ ;
- пофасадное регулирование. Применяется для систем отопления протяженных зданий с

двумя фасадами ( $M = 2$ ), при этом используется раздельное регулирование  $T_{CO}$  для каждой ветви. Применение для зданий с числом ветвей больше 2-х экономически нецелесообразно.

Исследуем возможность повышения качества управления процессом отопления здания с регулированием на вводе путем учета климатических факторов, применив регулирование соотношений расходов,  $G_1, \dots, G_M$ , по ветвям ( $B_i$ ) СО (см. рис. 1, страта 3). Данный способ заключается в установке регулирующих клапанов с исполнительными механизмами на ветвях 1...M системы отопления. За счет изменения скорости протекания теплоносителя будет изменяться теплотребление ветвей  $B_i$  и соответственно температура обратных трубопроводов ветвей СО,  $T_{o11}, \dots, T_{o1K}$ . В таком случае реакция на возмущающие воздействия климатических факторов, действующих на различные фасады и соответственно ветви, будет более адекватной. На основе законов сохранения массы и количества теплоты математическую модель, описывающую связь между основными переменными, изменяющимися в СО с зависимым теплоснабжением, можно представить в виде структурной схемы, показанной на рис. 2 (для страт 3 и 4, см. рис. 1).

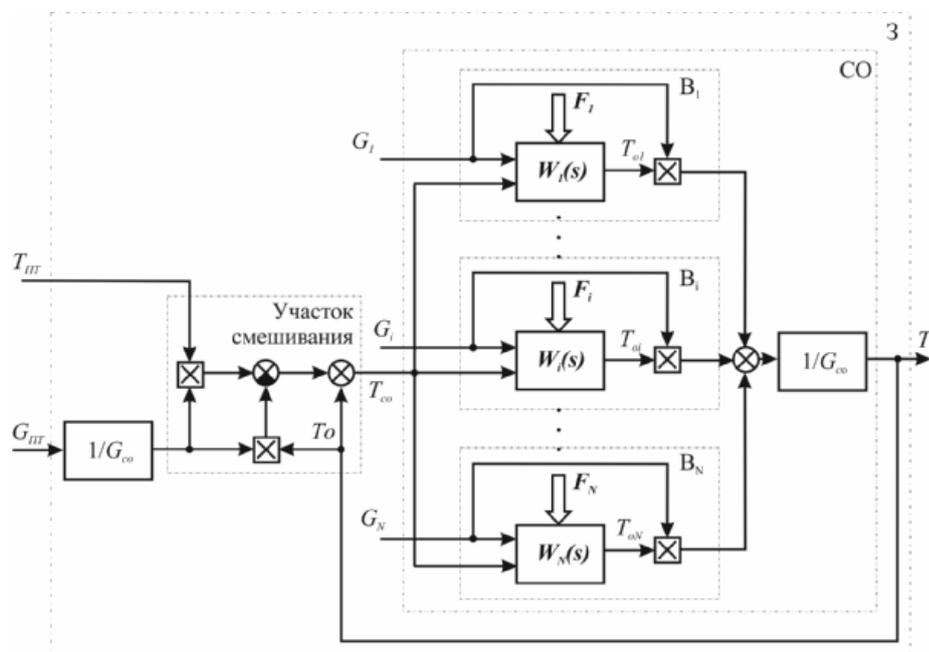


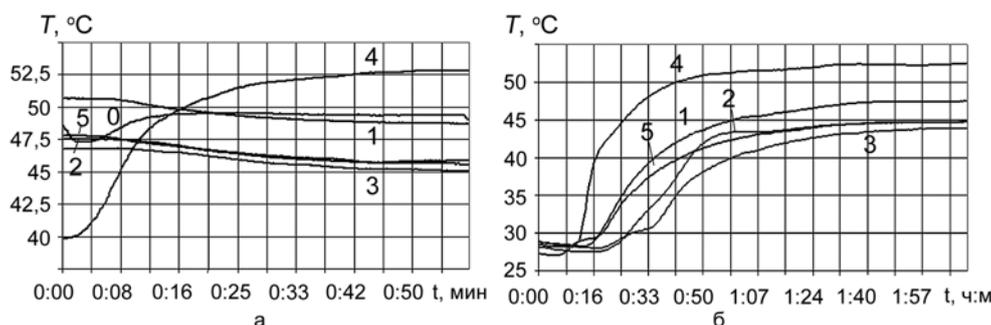
Рис. 2. Модель процесса отопления здания

Характерной особенностью СО зданий с зависимым теплоснабжением является наличие нелинейного участка смешивания теплоносителя (УСТ, см. рис. 1, страта 3). Для исследования представленной математической

модели необходимо располагать видом операторов  $W_i(s)$ , которые в общем случае определяются исходя из решения краевой задачи с уравнением теплопроводности и с учетом вынужденной конвекции, что является достаточно

сложным. В связи с этим целесообразно получить вид указанных операторов на основе экспериментальных динамических характеристик

исследуемого процесса в системе теплоснабжения с пятью ветвями СО (см. рис. 3) путем идентификации.



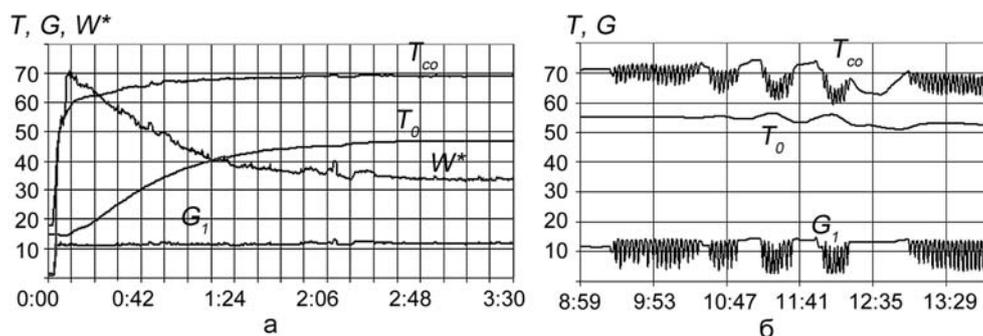
**Рис. 3.** Экспериментальные переходные характеристики ветвей СО при  $G_i=var, T_{co}=const$  (а) и  $G_i=const, T_{co}=var$  (б) (кривые 1...5 – температура в обратных ветвях СО; кривая 0 – температура обратного трубопровода)

На основе анализа экспериментальных переходных характеристик (см. рис. 3) можно принять допущение о структуре операторов  $W_i(s)$  по различным каналам регулирования, при этом, вследствие наличия нелинейностей в представленной математической модели целесообразно использовать численный способ ее исследования, на предмет синтеза регулятора. Кроме того, анализ экспериментальных данных показал, что возможно:

- управлять расходом теплоносителя по ветвям СО без разделения их на независимые для каждого фасада с целью снижения теплопотребления в процессе отопления здания при учете климатических факторов. Значительное

изменение  $G_i$  более чем на 50%, приводит к кратковременному, незначительному изменению  $T_0$  менее чем на 5% (см. рис. 3, а, кривая 0);

- учитывать температуру теплоносителя в обратном трубопроводе,  $T_0$  на участке смешивания для введения коррекции в контур управления с целью снижения теплопотребления на вводе при смене режимов функционирования, что позволит обеспечивать энергосбережение, управляя выходом на заданный режим теплопотребления, поскольку при скачкообразном изменении  $G_{III}$  происходит значительное пиковое увеличение значения мгновенного теплопотребления  $W^*$  (см. рис. 4, а).



**Рис. 4.** Типовые переходные характеристики ОУ при ступенчатом (а) и периодическом (б) изменениях расхода  $G_i$  ( $W^*$  – энергопотребление в относительных единицах,  $G_i$  в  $m^3/ч$ ;  $T$  в  $^{\circ}C$ ; временная ось в ч:мин)

Таким образом, на базе принятых допущений можно обоснованно упростить модель, представленную на рис. 2 путем замены нелинейного блока СО (вход  $T_{co}$  – выход  $T_0$ ), включающего нелинейные блоки  $B_1...B_M$  на соответствующую аппроксимацию, структуру которой можно определить на основе экспериментальных кривых (см. рис. 4, а). С целью

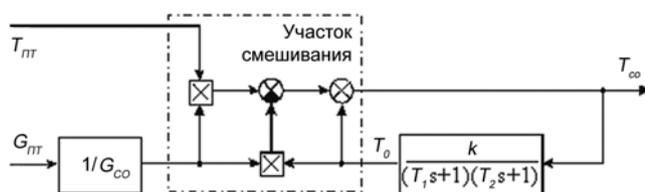
применения аналитических методов анализа динамики системы можно ограничиться передаточной функцией в виде апериодического звена второго порядка. Адекватность данного выбора подтверждается экспоненциальным видом экспериментальных переходных характеристик (см. рис. 4, а) и свойствами фильтра нижних частот присущих модели по данному

каналу (см. рис. 3, б). Следует отметить, что за счет значительной инерционности ветвей и стояков при протекании по ним теплоносителя зависимость  $T_0(t)$  является гладкой даже при скачкообразных периодических изменениях  $G_{пт}$  (см. рис. 4, б). С использованием обобщенного метода наименьших квадратов (ОМНК) по ретроспективной информации с глубиной выборки 500 записей и временем квантования  $t = 158$  с получена оценка параметров модели объекта управления (см. табл. 1) по каналу регулирования « $T_{CO} - T_0$ ».

**Таблица 1.** Значения параметров объекта управления

Параметр	$T_1, c$	$T_2, c$	$k$	$t, c$
значение	766,00	1336,00	0,69	158,00

На основе параметрической идентификации с учетом законов сохранения массы и количества теплоты на базе принятых допущений разработана структурная схема математической модели процесса отопления здания, представленная на рис. 5, учитывающая нелинейный участок смешивания теплоносителей из подающего трубопровода теплосетей и обратного трубопровода системы отопления здания, расположенный после регулирующего клапана.



**Рис. 5.** Структурная схема исследуемого процесса

## POSSIBILITIES OF RESEARCH THE HEATING PROCESSES OF THE BUILDINGS DISTRIBUTED COMPLEX ON THE BASIS OF STRATIFIED HEAT SUPPLY MODEL

© 2011 E.A. Potapenko, A.S. Soldatenkov  
Belgorod State Technological University named after V.G. Shuhov

On the basis of the stratified model of heat supply and experimental researches the management model by process of building heating is presented, allowing to investigate possibilities of regulation the expenses of heat-carrier in branches of heating system, for the purpose of increase the management efficiency by heating process as a whole.

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

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

**Выводы:** в разработанной модели управления процессом отопления здания с учетом нелинейности процесса смешивания теплоносителя на вводе тепловых сетей в здание в отличие от известных,  $T_0$  является одним из регулируемых параметров, что позволяет исследовать возможность регулирования расходов теплоносителя в ветвях СО, с целью повышения эффективности управления процессом отопления, которая может быть достигнута путем учета климатических факторов. За счет устранения перетопов по различным фасадам здания, подверженным влиянию внешних и внутренних возмущений, будет происходить более равномерное распределение температуры по помещениям здания и, соответственно, повысится качество процесса отопления здания. Инновационные технологии автоматизации систем теплоснабжения внедрены в Белгородском государственном технологическом университете им. В.Г. Шухова, Белгородском государственном университете и др. Внедрение разработки позволило снизить потребление тепловой энергии до 30%.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Энергетическая стратегия России на период до 2020 г. Министерство энергетики РФ. <http://www.mte.gov.ru/docs/32/189.html>
2. Гридчин, А.М. Опыт внедрения современных энергоэффективных технологий на основе автоматизации распределенных энергосистем зданий вуза / А.М. Гридчин, А.Н. Потапенко, В.С. Лесовик, А.В. Белоусов, Е.А. Потапенко // Строительные материалы: бизнес» №4. 2005. №2. С. 2-5.
3. Месарович, М. Теория иерархических многоуровневых систем / М. Месарович, Д. Мако, И. Такахара. – М.: Мир, 1973. 344 с.