

УДК 697.1

П.А. Стрижак, М.Н. Морозов

ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ СИСТЕМЫ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ ЗДАНИЙ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ МЕТОДАХ РЕГУЛИРОВАНИЯ ТЕПЛОПОТРЕБЛЕНИЯ

P.A. Strizhak, M.N. Morozov

ENERGY EFFICIENCY OF BUILDINGS HEATING SYSTEM USING VARIOUS METHODS OF HEAT CONSUMPTION REGULATION

Разработана тепловая модель системы теплоснабжения здания, включающая источник теплоты, индивидуальный тепловой пункт и отопительные приборы. Модель реализована на базе математического пакета Matlab. Выполнены исследования влияния внешних и внутренних возмущений на функционирование системы отопления с последовательным соединением отопительных приборов. Установлены временные характеристики переходных процессов в системах с местным и индивидуальным регулированием теплопотребления. Исследована возможность реализации специализированных энергосберегающих тепловых режимов на базе однотрубных систем отопления. Разработаны рекомендации для повышения эффективности функционирования системы отопления при различных методах регулирования теплопотребления.

СИСТЕМА ОТОПЛЕНИЯ; ТЕПЛОПОТРЕБЛЕНИЕ; РЕГУЛИРОВАНИЕ; ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ; ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ; МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ.

The authors designed a thermal model of the building heating system including a heat source, individual heating unit and heating appliances. Application Simulink of the mathematical package Matlab is selected as a platform for the model. The paper describes the research of influencing external and internal disturbing factors on the operation of the heating system with a sequential connection of heating appliances. The research resulted into specifying time characteristics of transient processes in systems with local and individual regulation of heat consumption. The authors analyze the possibility of implementing specialized energy-saving thermal modes on the basis of one-pipe heating systems. The paper provides recommendations to improve the operation efficiency of the heating system using various methods of heat consumption regulation.

HEATING SYSTEM; HEAT CONSUMPTION; REGULATION; ENERGY EFFICIENCY; SIMULATION MODEL; MATHEMATICAL MODELING.

Вопросы энергосбережения и повышения энерго- и ресурсоэффективности — одни из ключевых при развитии и модернизации различных отраслей экономики России. Именно поэтому в последнее время данной теме уделяется пристальное внимание на различных уровнях [1, 2]. В структуре потребления энергоресурсов России основной потребитель — это жилищно-коммунальное хозяйство [1–3]. Как следствие, решающее значение имеют мероприятия, направленные на повышение энергоэффективности жилых и административных зданий [3]. Наибольшим потенциалом сбережения энергии обладают системы теплоснабжения [1]. От последних требуются поддержание па-

раметров внутреннего климата здания на комфортном для человека уровне [4], снижение энергопотребления и повышение энергоэффективности инженерных систем.

Цель нашей работы заключается в исследовании функционирования системы теплоснабжения здания, выявлении особенностей однотрубной конфигурации системы отопления (СО) и влияния ее на энергоэффективность процесса теплоснабжения здания. В работе также рассматриваются различные варианты систем управления теплоснабжением.

Объект моделирования — система централизованного теплоснабжения типичного административного здания, которая состоит из

теплового пункта, магистральных подающих и отводящих трубопроводов, стояков, подводок к отопительным приборам, нагревательных элементов, а также сопутствующей запорно-регулирующей арматуры. Теплоснабжение здания осуществляется от центрального теплового пункта (ЦТП) в соответствии с температурным графиком 95/70 °С. В здании расположены узел учета и индивидуальный тепловой пункт (ИТП) [5–7]. ИТП выполнен по зависимой схеме [5–7]. Применена принудительная насосная циркуляция с подмешиванием теплоносителя из обратного трубопровода в подающий. Особенность отопительной системы здания — наличие как одно-, так и двухтрубной конфигурации с горизонтальным и вертикальным расположением подводных и отводящих трубопроводов. Исследования выполнены для широко распространенной однотрубной конфигурации с последовательным присоединением отопительных приборов (рис. 1). Система — комбинированная: обвязка радиаторов верхних этажей выполнена с байпасом, нижний этаж — проточная система.

Для оценки энергоэффективности однотрубных систем отопления при различных методах регулирования разработана универсальная те-

пловая модель здания [8]. Для создания имитационной модели выбрано приложение *Simulink* математического пакета *Matlab* [9, 10]. Такой выбор обусловлен наличием широких возможностей программного обеспечения (инструменты для анализа динамики систем во времени; связь с рабочей средой *Workspace* и другими приложениями пакета *Matlab*, в частности *Control System Toolbox*; моделирование различных возмущений, детерминированных или случайных с соответствующими законами распределения, и ситуаций, как штатных, так и нештатных, в том числе аварийных, возникающих при эксплуатации технической системы).

Использование библиотеки приложения *Simscape* позволило применить концепцию «аккумулятивного» (физического) моделирования [11].

Структура тепловой модели представлена на рис. 2, на котором проиллюстрирована последовательность прохождения теплоносителя в исследуемой системе от тепловой сети через ЦТП и ИТП до конечных потребителей (отдельные помещения). Такой подход позволяет масштабировать модель типового помещения для формирования суммарной тепловой нагрузки здания. Модель помещения включает источник и потребителей

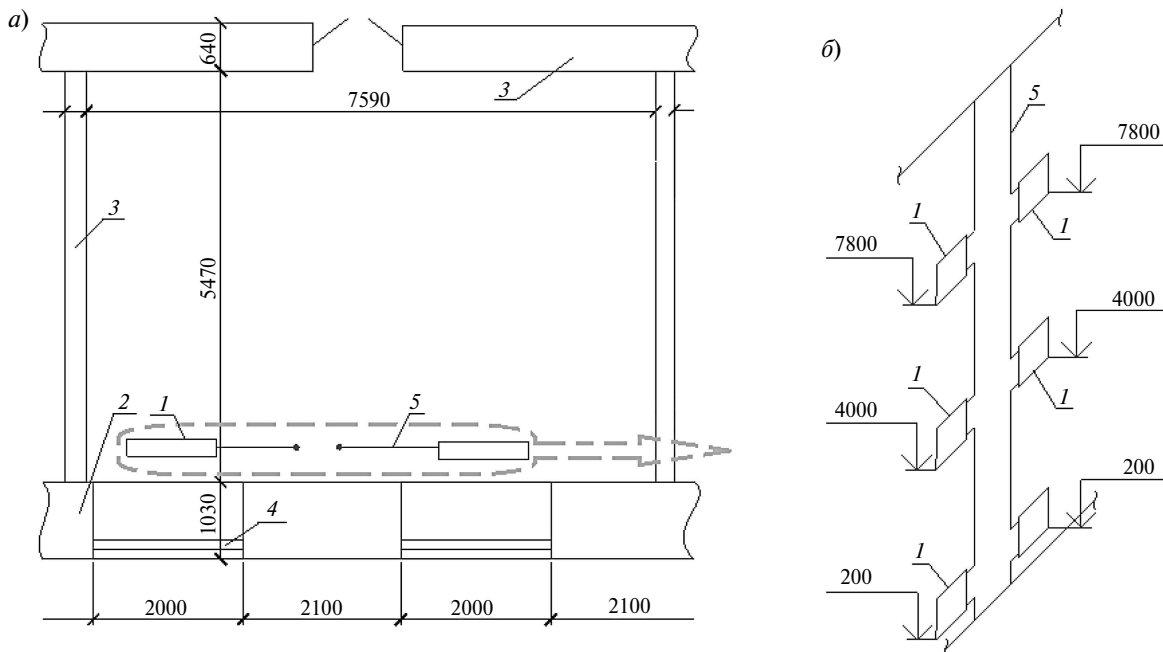


Рис. 1. Схематичное представление объекта моделирования (а — план помещения, б — часть аксонометрической схемы однотрубной системы отопления): 1 — отопительный прибор; 2, 3 — наружные и внутренние ограждающие конструкции; 4 — стеклопакет; 5 — водопроводная труба



Рис. 2. Структура тепловой модели системы теплоснабжения здания

тепловой энергии. Поступление тепла в помещение происходит от нагревательных приборов системы отопления, а его убыль — посредством процессов теплопередачи через наружные ограждающие конструкции в окружающую среду.

Реализация модели в пакете *Matlab* основывается на представлении каждого отдельного функционального компонента в виде блоков *s*-функций и подсистем (рис. 3). В процессе выполнения циклов моделирования происходит перераспределение тепловых потоков между ис-

точниками, средой передачи тепловой энергии и ее потребителями.

Модель включает основные функциональные компоненты [12]: отопительный прибор (радиатор); смеситель; клапан; блок тепловой защиты помещения; погодный блок; блок температурного режима помещения.

Математическую базу модели теплоснабжения здания составляют [12]: закон сохранения энергии для типового помещения; закон Фурье, описывающий кондуктивный теплообмен; за-

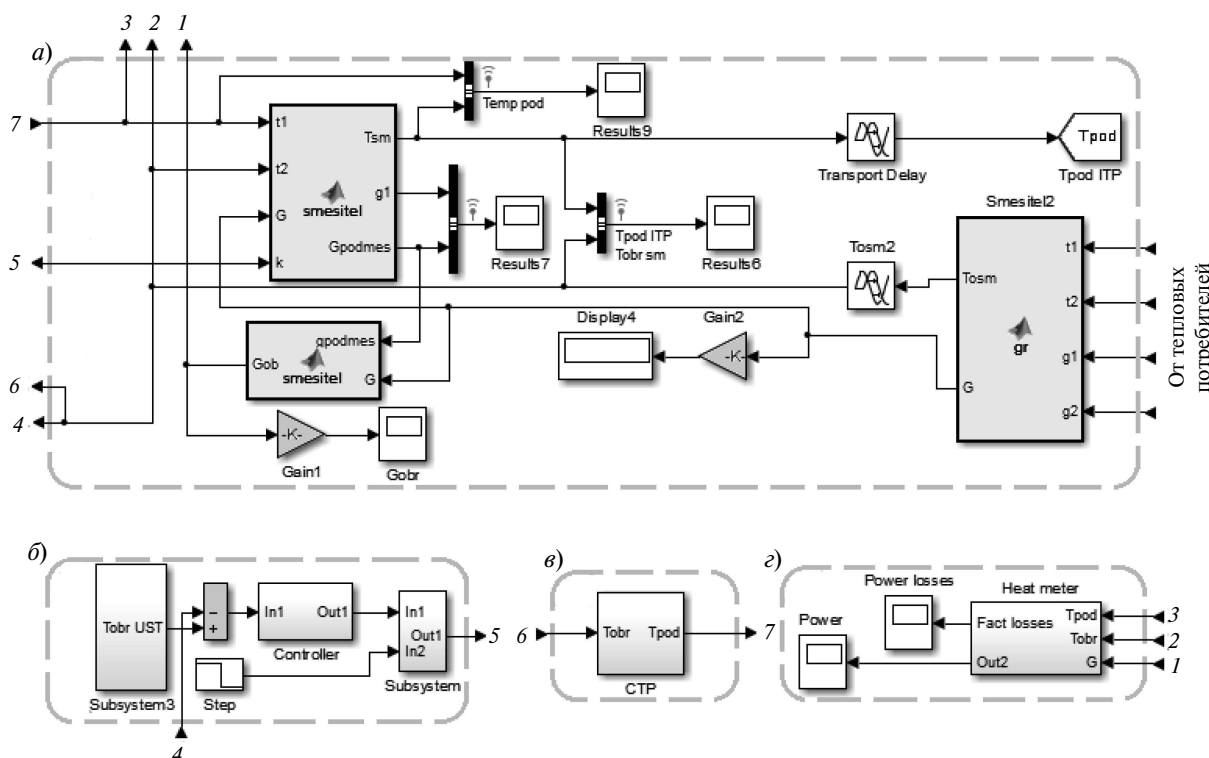


Рис. 3. Основные блоки тепловой модели системы теплоснабжения здания:
 а — блок элементов ИТП; б — регулятор теплопотребления; в — источник теплоснабжения;
 з — тепловычислитель

кон Ньютона — Рихмана, описывающий механизм конвективного теплообмена.

При моделировании приняты следующие допущения:

удельная теплоемкость и плотность характеризуются постоянными значениями;

отсутствуют потери теплоносителя (принималось равенство его входного и выходного расходов);

нет теплообмена со смежными помещениями.

Разработанная модель характеризуется универсальностью и позволяет проводить прогнозное исследование процессов теплоснабжения зданий и сооружений с целью определения эффективности внедрения энергосберегающих технологий. Модель может применяться как инструмент при разработке технико-экономического обоснования системы энергоменеджмента в соответствии с *ISO 50001:2011 «Energy management systems — Requirements with guidance for use»* [13]. Еще одно важное применение модели — оценка теплового режима здания при аварийном прекращении теплоснабжения.

Для достижения сформулированной выше цели работы проведены две серии опытов, заключавшихся в исследовании влияния внешнего возмущающего фактора на тепловой режим помещений, содержащих систему отопления:

с местным регулированием в ИТП и с индивидуальным регулированием в помещениях (распределенная система управления);

с местным регулированием в ИТП без индивидуального.

В каждой серии опытов были рассмотрены расположенные (см. рис. 1) на различных этажах здания три помещения, отопительные приборы

которых соединены последовательно (вертикальная однотрубная разводка). В качестве внешнего возмущающего фактора была принята температура наружного воздуха $T_{нар}$, изменение которой задавалось в диапазоне $[-40; +5]$ °С с шагом 5 °С.

Сравнительный анализ результатов моделирования первой серии опытов показал, что индивидуальное регулирование отопительного прибора обеспечивает стабилизацию регулируемого параметра — температуры воздуха внутри помещений $T_{в}$.

Оценка качества переходных процессов проводилась по времени регулирования. Переходный процесс для помещения третьего этажа с индивидуальным регулированием при $T_{нар} = -10$ °С представлен на рис. 4.

После моделирования установленного температурного диапазона внешнего возмущающего фактора полученные данные подверглись обработке. Результаты представлены в табл. 1.

Резкий рост времени регулирования для помещения первого этажа объясняется недостаточной температурой теплоносителя на входе в отопительные приборы. В этом случае локальная автоматическая система регулирования не может стабилизировать температуру воздуха в помещении.

Полученные данные также позволяют сравнить оценки качества регулирования для рассматриваемых помещений. Регулирование температуры воздуха в помещении 3-го этажа (первого по направлению движения теплоносителя) — оптимальное, в то время как нижний этаж характеризуется относительно большим временем регулирования ($t_{пер}$).

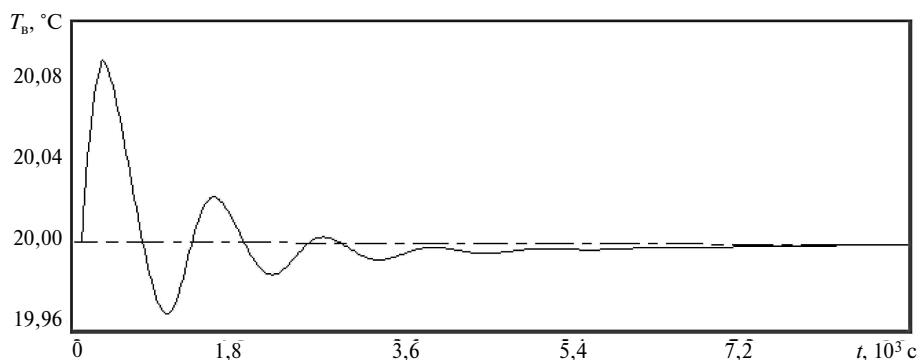


Рис. 4. График переходного процесса по каналу возмущающего воздействия

Таблица 1

Результаты исследования реакции системы на внешнее возмущающее воздействие $T_{нар}$

№ опыта	$T_{нар}$	Время регулирования $t_{рег}$, с		
		Помещение 3-го этажа (№ 3)	Помещение 2-го этажа (№ 2)	Помещение 1-го этажа (№ 1)
1	5–0	0,0608	0,0776	0,2655
2	0–(–)5	0,0628	0,1296	0,2661
3	(–5)–(–10)	0,0621	0,1284	0,2243
4	(–10)–(–15)	0,0623	0,0872	5,9
5	(–15)–(–20)	0,0598	0,0867	4,55
6	(–20)–(–25)	0,0585	0,088	4,58
7	(–25)–(–30)	0,0582	0,0925	4,6
8	(–30)–(–35)	0,067	0,1067	4,63
9	(–35)–(–40)	0,0532	0,1607	4,117

Анализ второй серии опытов показывает, что отсутствие индивидуального регулирования не позволяет системе отопления поддерживать оптимальный тепловой режим помещений (табл. 2). Температура воздуха внутри помещения третьего этажа оказывается завышенной во всем диапазоне изменения внешнего возмущающего воздействия, т. е. в течение всего отопительного сезона. Наоборот, помещение первого этажа характеризуется дефицитным теплоснабжением. Смоделированная система отопления не только не удовлетворяет нормативным значениям параметров микроклимата [4], но и вызывает дополнительные теплотери из-за «перетоков».

Для комплексной оценки энергоэффективности системы отопления здания выполнено исследование влияния внутреннего возмущения на тепловой режим помещений, а также на функционирование системы регулирования теплопотребления. Последняя представлена в варианте распределенной системы управления. Рассмотрены три группы помещений. Внутреннее возмущение смоделировано (рис. 5) снижением теплопотребления помещения второго этажа (рассматриваемая система управления переводит неиспользуемое помещение в режим пониженного энергопотребления, при котором температура воздуха в помещениях $T_{в}$ снижается

Таблица 2

Результаты исследования теплового режима здания при внешнем возмущающем воздействии $T_{нар}$ в случае местного погодозависимого регулирования

№ опыта	$T_{нар}$	Температура в помещении $T_{в}$, °С		
		Помещение 3-го этажа (№ 3)	Помещение 2-го этажа (№ 2)	Помещение 1-го этажа (№ 1)
1	5	26,37	24,68	22,51
2	0	25,68	23,92	21,64
3	–5	25,49	23,49	20,87
4	–10	25,32	23,05	20,04
5	–15	25,15	22,61	19,24
6	–20	24,97	22,18	18,45
7	–25	24,79	21,75	17,66
8	–30	24,59	21,32	16,89
9	–35	24,59	21,06	16,27



Рис. 5. График температуры воздуха в помещении второго этажа

до уровня, допустимого параметрами тепло-влажностного режима, нормативными документами, а также из экономических соображений [14–16]).

На рис. 6 приведен график выходного сигнала индивидуального терморегулятора (в относительных единицах) при переключениях тепловых режимов здания.

Рис. 7 иллюстрирует переходные процессы в тепловом режиме помещения третьего этажа, вызванные реакцией на появление и последующее исчезновение внутреннего возмущающего воздействия. Максимальная относительная амплитуда отклонения при этом составляет 3,75 %.

Реакция главного регулятора ИТП на двукратное возмущение показана на рис. 8. Видно, что при подаче первого возмущения главный регулятор снижает расход «горячей» сетевой воды в СО. Это объясняется снижением перепада температур на входе и выходе из отопительных приборов помещения второго этажа, а следовательно, повышается общая температу-

ра теплоносителя на выходе СО. В итоге система управления фиксирует ошибку регулирования и для ее минимизации начинает активно управлять приводом клапана, ответственного за ограничение подачи сетевой воды в СО. Таким образом, в результате перевода помещения в режим пониженного теплотребления система управления компенсирует возмущение при помощи главного регулятора, снижая негативное взаимное влияние тепловых потребителей (помещений).

Неравномерное распределение теплоносителя по отопительным приборам — наиболее серьезный недостаток однотрубных систем отопления. Эту проблему не удастся решить и при внедрении в ИТП современного регулятора с погодным компенсатором. Исследования показали, что при внедрении локальных регуляторов теплотребления рассматриваемая система отопления приобретает качественно новые возможности: способность поддерживать индивидуальный тепловой режим помещения, точность

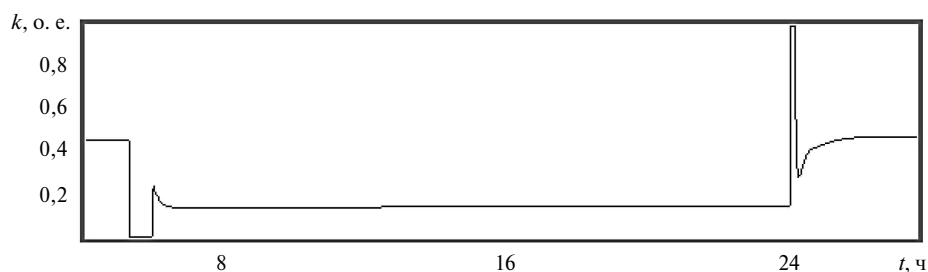


Рис. 6. График выходного сигнала локального терморегулятора



Рис. 7. График температуры воздуха в помещении второго этажа

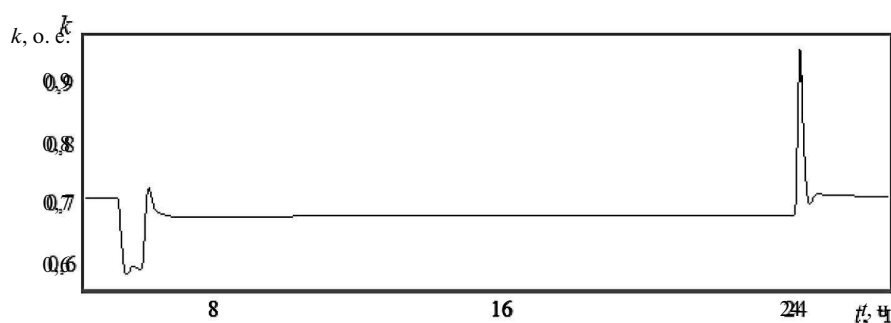


Рис. 8. График выходного сигнала главного регулятора теплотребления

регулирования в соответствии с ПИД-, ПД- или ПИ-законами, исключающая перерасход тепла. При этом происходит автоматическое перераспределение теплоносителя между отопительными приборами. Также становится возможным организация индивидуальных тепловых режимов отдельных помещений, позволяющая сни-

зить общее теплотребление здания на 20–24 % (в зависимости от времени действия энергосберегающего режима).

Работа поддержана грантом Министерства образования и науки РФ (проект № 2.1321.2014) и субсидией, направленной на повышение конкурентноспособности ТПУ (проект ВИУ_ЭНИН_94_2014).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дубягин Ю.П., Дубягина О.П., Марченко Е.М. Стратегия национальной безопасности России и ее соотносимость с энергетической безопасностью и ее важными системными составляющими: энергосбережением и водоподготовкой // Энергосбережение и водоподготовка. 2013. № 3 (83). С. 11–16.
2. Парыгин А.Г., Волкова Т.А., Куличихин В.В. О энергонезависимости и надежности тепловых пунктов // Энергетик. 2013. № 3. С. 41–43.
3. Самарин О.Д., Гришнев Е.А. Повышение энергоэффективности зданий на основе интеллектуальных технологий // Энергосбережение и водоподготовка. 2011. № 5. С. 12–14.
4. СНиП 41–01–2003. Отопление, вентиляция и кондиционирование. Введ. 2004–01–01. Госстрой России. М., 2004.
5. Боровков В.М., Скулкин С.В. Эксергетический анализ тепловой схемы индивидуального теплового пункта на стадии проектирования // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2010. № 106. С. 61–66.
6. Батухтин А.Г., Кобылкин М.В. Автоматизированная система регулирования расхода теплоносителя для теплоснабжения групп потребителей // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2013. № 2(171). С. 68–72.

7. **Игнатенко В.В., Боровиков В.М.** Анализ методов регулирования отпуска тепловой энергии потребителям // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2010. № 2(100). Т. 1. С. 65–71.

8. **Батухтин А.Г.** Особенности математических моделей современных теплопотребляющих установок в системах централизованного теплоснабжения // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2011. № 1(117). С. 250–256.

9. **Добротин С.А., Прокопчук Е.Л.** Синтез системы упреждающего управления процессом подачи тепла на отопление здания // Проблемы региональной энергетики. 2011. № 2. С. 53–65.

10. **Солдатенков А.С., Потепенко А.Н., Глаголев С.Н.** Исследование математической модели управления автоматизированным индивидуальным тепловым пунктом с типовыми регуляторами // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2012. Т. 14. № 1 (2). С. 679–684.

11. **Broman D., Fritzon P.** Higher-order acausal models // Proceedings of the 2-nd International workshop on

equation-based object-oriented languages and tools. Paphos, Cyprus. July 8, 2008. P. 59–69.

12. **Lauenburg P., Wollerstrand J.** Modelling space heating systems connected to district heating in case of electric power failure // Proceedings of the Eleventh International Building simulation Conference (IBPSA), Glasgow, Scotland, 2009. P. 150–158.

13. **ISO 50001:2011** “Energy management systems Requirements with guidance for use” / International Organization for Standardization. 2011.

14. **Мишин М.А.** Тепловой режим жилых зданий // Ползуновский вестник. 2011. № 1. С. 104–115.

15. **Бурцев В.В., Басин А.С., Байтингер Н.М.** Математическая модель регулирования объекта теплопотребления // Ползуновский вестник. 2004. № 1. С. 174–177.

16. **Пуговкин А.В., Купреков С.В., Абушкин Д.В. [и др.]** Математическая модель теплоснабжения помещений для АСУ энергосбережения // Доклады ТУСУР. Управление, вычислительная техника и информатика. 2010. № 2 (22). Ч. 1. С. 293–298.

REFERENCES

1. **Dubyagin Yu.P., Dubyagina O.P., Marchenko Ye.M.** Strategiya natsionalnoy bezopasnosti Rossii i yeye sootnosimost s energeticheskoy bezopasnostyu i yeye vazhnymi sistemnymi sostavlyayushchimi: energosberezheniyem i vodopodgotovkoy. *Energosberezheniye i vodopodgotovka*. 2013. № 3 (83). S. 11–16. (rus.)

2. **Parygin A.G., Volkova T.A., Kulichikhin V.V.** O energonezavisimosti i nadezhnosti teplovykh punktov. *Energetik*. 2013. № 3. S. 41–43. (rus.)

3. **Samarin O.D., Grishneva Ye.A.** Povysheniye energoeffektivnosti zdaniy na osnove intellektualnykh tekhnologiy. *Energosberezheniye i vodopodgotovka*. 2011. № 5. S. 12–14. (rus.)

4. **SNiP 41–01–2003.** Otopleniye, ventilyatsiya i konditsionirovaniye. Vved. 2004–01–01. Gosstroy Rossii. M., 2004. (rus.)

5. **Borovkov V.M., Skulkin S.V.** Eksergeticheskiy analiz teplovoy skhemy individualnogo teplovogo punkta na stadii proyektirovaniya. *Nauchno-tekhnicheskkiye vedomosti SPbGPU*. 2010. № 106. S. 61–66. (rus.)

6. **Batukhtin A.G., Kobylkin M.V.** Avtomatizirovannaya sistema regulirovaniya raskhoda teplonositelya dlya teplosnabzheniya grupp potrebitel'ev. *Nauchno-tekhnicheskkiye vedomosti SPbGPU*. 2013. № 2(171). S. 68–72. (rus.)

7. **Ignatenok V.V., Borovikov V.M.** Analiz metodov regulirovaniya otpuska teplovoy energii potrebitelyam. *Nauchno-tekhnicheskkiye vedomosti SPbGPU*. 2010. № 2(100). Vol 1. S. 65–71. (rus.)

8. **Batukhtin A.G.** Osobennosti matematicheskikh modeley sovremennykh teplopotrebyayushchikh ustanovok v sistemakh tsentralizovannogo teplosnabzheniya. *Nauchno-tekhnicheskkiye vedomosti SPbGPU*. 2011. № 1(117). S. 250–256. (rus.)

9. **Dobrotin S.A., Prokopchuk Ye.L.** Sintez sistemy uprezhdayushchego upravleniya protsessom podachi tep-la na otopleniye zdaniya. *Problemy regionalnoy energetiki*. 2011. № 2. S. 53–65. (rus.)

10. **Soldatenkov A.S., Potapenko A.N., Glagolev S.N.** Issledovaniye matematicheskoy modeli upravleniya avtomatizirovannym individualnym teplovym punktom s tipovymi regulyatorami. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk*. 2012. № 1 (2). T. 14. S. 679–684. (rus.)

11. **Broman D., Fritzon P.** Higher-order acausal models. *Proceedings of the 2-nd International workshop on equation-based object-oriented languages and tools*. Paphos, Cyprus. July 8, 2008. P. 59–69. (rus.)

12. **Lauenburg P., Wollerstrand J.** Modelling space heating systems connected to district heating in case of electric power failure. *Proceedings of the Eleventh International Building simulation Conference (IBPSA)*. Glasgow, Scotland. 2009. P. 150–158. (rus.)

13. **ISO 50001:2011** “Energy management systems Requirements with guidance for use” / International Organization for Standardization. 2011. (rus.)

14. **Mishin M.A.** Teplovoy rezhim zhilykh zdaniy. *Polzunovskiy vestnik*. 2011. № 1. S. 104–115. (rus.)

15. **Burtsev V.V., Basin A.S., Baytinger N.M.** Matematicheskaya model regulirovaniya obyekta teplo-portebleniya. *Polzunovskiy vestnik*. 2004. № 1. S. 174–177. (rus.)

16. **Pugovkin A.V., Kuprekov S.V., Abushkin D.V. [и др.]** Matematicheskaya model teplosnabzheniya pomeshcheniy dlya ASU energosberezheniya. *Doklady TUSURa. Upravleniye, vychislitel'naya tekhnika i informatika*. 2010. № 2 (22). Ch. 1. S. 293–298. (rus.)

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

СТРИЖАК Павел Александрович — доктор физико-математических наук профессор кафедры автоматизации теплоэнергетических процессов, научный руководитель лаборатории Национального исследовательского Томского политехнического университета. 634050, Россия, Томск, пр. Ленина, 30. E-mail: pavelspa@tpu.ru

МОРОЗОВ Максим Николаевич — аспирант Национального исследовательского Томского политехнического университета. 634050, Россия, Томск, пр. Ленина, 30. E-mail: tpu_chm@tpu.ru

AUTHORS

STRIZHAK Pavel A. — National Research Tomsk Polytechnic University. 30 Lenina Ave., Tomsk, Russia, 634050. E-mail: pavelspa@tpu.ru

MOROZOV Maxim N. — National Research Tomsk Polytechnic University. 30 Lenina Ave., Tomsk, Russia, 634050. E-mail: tpu_chm@tpu.ru