

## ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ ТЕПЛООВОГО РЕЖИМА ЗДАНИЯ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ОПТИМАЛЬНОГО РЕЖИМА ПРЕРЫВИСТОГО ОТОПЛЕНИЯ\*

*Е.Ю. Анисимова*

## ENERGY EFFICIENCY OF TEMPERATURE CONDITIONS FOR A BUILDING AT OPTIMUM INTERMITTENT CENTRAL HEATING USE

*E.Y. Anisimova*

Рассматривается задача оптимального управления тепловым режимом отапливаемых зданий. Получены необходимые условия оптимальности, сформулированные в форме принципа максимума. Проанализированы вычислительные аспекты и указан способ приближенной реализации оптимального управления. Проведен анализ экономии энергии при прерывистом отоплении для различных видов топлива.

*Ключевые слова:* тепловой режим здания, прерывистое отопление, энергоэффективность, энергосбережение.

The problem of optimal control for temperature conditions of heated buildings is considered in the article. Necessary conditions of optimality formulated in terms of maximum principle are obtained. Computation aspects are analyzed; method for approximate realization of optimal control is stated. The analysis of energy efficiency at intermittent central heating for different types of fuel is made.

*Keywords:* temperature conditions of a building, intermittent central heating, energy efficiency, energy saving.

Актуальность темы исследования определяется острой необходимостью разработки и внедрения мероприятий, направленных на повышение эффективности использования энергоресурсов. Данная задача является одной из приоритетных в нашей стране на период до 2020 г. Основным документом, отражающим главные аспекты энергосберегающей политики, является Федеральный закон № 261-ФЗ «Об энергосбережении и повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации». К одной из задач, поставленных в законе, относится разработка и внедрение энергосберегающих технологий и оборудования. В качестве решения данной задачи предлагается отказ от систем централизованного теплоснабжения и переход к децентрализованным системам. Но это не значит, что следует массово переходить к автономным системам теплоснабжения (что фактически является нереализуемой задачей). А вот в некоторых случаях автономные источники теплоты будут выступать в качестве удачного технического решения теплоснабжения объекта. Эффективность децентрализованного теплоснабжения не подлежит сомнению в отдаленных город-

ских районах, там, где прокладка тепломагистрали невыгодна, а также при реконструкции старого жилфонда, где развитие тепловых мощностей иногда невозможно из-за стесненности территории. Нередко в больших городах существуют проблемы нехватки мощностей центральных тепловых источников. Вместе с тем, децентрализованные системы теплоснабжения имеют большой потенциал в области энерго-, ресурсосбережения и качественного поддержания параметров микроклимата зданий, по сравнению с центральными теплоснабжающими системами.

В настоящее время существует множество технических решений реализации автономного теплоснабжения объекта: классические – использование автономных котельных, современные – использование солнечной энергии в качестве источника теплоты в так называемых гелиоустановках и использование низкопотенциальной энергии грунта, воды и др. с применением тепловых насосов и т. д.

Однако из-за больших капитальных и эксплуатационных затрат, многих открытых технических вопросов проектирования, монтажа и эксплуатации, недостаточности накопленного опыта

\* Работа выполнена под руководством В.И. Панферова.

использования данных систем в наших климатических условиях гелиосистемы и теплонасосные установки применять для целей энергосбережения в крупных масштабах совсем нелогично.

В случае применения децентрализованного теплоснабжения с автономными источниками теплоты существенную экономию энергоресурсов обеспечивает реализация оптимального режима прерывистого отопления, то есть оптимального управления тепловым режимом здания в нерабочий период. Согласно СНиП 41-01-2003 «Отопление, вентиляция, кондиционирование» в жилых, общественных, административно-бытовых и производственных зданиях в нерабочее время температуру воздуха можно поддерживать на более низком уровне, чем в остальные промежутки времени, что дает возможность снизить расход энергии на отопление. Данная задача нами была решена на основании адекватных математических моделей, описывающих тепловой режим здания, для которых был разработан оптимальный алгоритм управления тепловым режимом здания в нерабочий период, который обеспечивает требуемые температуры внутреннего воздуха при минимальном расходе тепловой энергии.

Тепловой режим здания, строго говоря, как объект управления является объектом с распределенными параметрами, поэтому решалась задача об оптимальном управлении для данного представления объекта.

Проведенный анализ литературы показал, что математическое описание теплового режима здания может быть удовлетворительно представлено следующим образом:

$$\frac{\partial t(x, \tau)}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 t(x, \tau)}{\partial x^2}, \quad 0 < x < L, \tau > 0; \quad (1)$$

$$t(x, 0) = t^0(x), \quad 0 \leq x \leq L; \quad (2)$$

$$-\lambda \frac{\partial t(0, \tau)}{\partial x} = \alpha_B [t_B(\tau) - t(0, \tau)], \quad \tau > 0; \quad (3)$$

$$-\lambda \frac{\partial t(L, \tau)}{\partial x} = \alpha_H [t(L, \tau) - t_H(\tau)], \quad \tau > 0; \quad (4)$$

$$c_B m_B \frac{dt_B(\tau)}{d\tau} = u(\tau) - \alpha_B F_{CT} [t_B(\tau) - t(0, \tau)] - k_{OK} F_{OK} [t_B(\tau) - t_H(\tau)], \quad \tau > 0; \quad (5)$$

$$t_B(0) = t_B^0, \quad (6)$$

где  $t(x, \tau)$ ,  $t(0, \tau)$ ,  $t(L, \tau)$  – температура соответственно в точке с координатой  $x$  по толщине наружной стены, на внутренней поверхности и на наружной поверхности наружной стены здания в момент времени  $\tau$ ;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности материала наружной стены;  $\alpha_B$ ,  $\alpha_H$  – коэффициент теплоотдачи соответственно для внутренней и наружной поверхностей стены;  $t_B(0)$ ,  $t_B(\tau)$  – температура внутреннего воздуха в начальный момент времени и момент времени  $\tau$

соответственно;  $t_H(\tau)$  – температура наружного воздуха в момент времени  $\tau$ ;  $u(\tau)$  – управление, мощность системы отопления в момент времени  $\tau$ ;  $c_B$ ,  $m_B$  – удельная теплоемкость и масса внутреннего воздуха в здании соответственно;  $a$  – коэффициент температуропроводности;  $F_{CT}$ ,  $F_{OK}$  – соответственно площадь наружных стен здания и окон;  $k_{OK}$  – коэффициент теплопередачи окна.

На множестве допустимых решений был определен функционал  $I$ , первая составляющая которого определяет близость начальной и конечной температуры внутреннего воздуха, а вторая – расход тепловой энергии:

$$I = [t_B(\tau_k) - t_B^0]^2 + \beta \int_0^{\tau_k} G[u(\tau)] d\tau, \quad (7)$$

где  $\tau_k$  – заданный промежуток времени;  $G$  – функция, оценивающая текущий расход теплоты зданием на отопление;  $\beta$  – некоторый весовой коэффициент.

В теории оптимального управления системами с распределенными параметрами, согласно проведенному анализу литературы, нет достаточно общей формулировки принципа максимума, позволяющей решать все возможные постановки задач. Поэтому в работе отыскивались условия оптимальности управления для поставленной задачи. Условия оптимальности представлены следующими соотношениями: для формулировки условий оптимальности вводится функция

$$H = \psi_0(\tau)u(\tau) - \beta G[u(\tau)], \quad (8)$$

где  $\psi_0(\tau)$  удовлетворяет следующей системе уравнений:

$$-c_B m_B \frac{d\psi_0(\tau)}{d\tau} + (\alpha_B F_{CT} + k_{OK} F_{OK}) \psi_0(\tau) - \frac{a\alpha_B}{\lambda \psi(0, \tau)} = 0; \quad (9)$$

$$\frac{\partial \psi(x, \tau)}{\partial \tau} + a \frac{\partial^2 \psi(x, \tau)}{\partial x^2} = 0; \quad (10)$$

с начальными условиями

$$c_B m_B \psi_0(\tau_k) = -2[t_B(\tau_k) - t_B^0]; \quad (11)$$

$$\psi(x, \tau_k) = 0. \quad (12)$$

Граничные условия для функции  $\psi(x, \tau)$  задавались в виде:

$$a \frac{\alpha_B}{\lambda} \psi(0, \tau) - a \frac{\partial \psi(0, \tau)}{\partial x} - \alpha_B F_{CT} \psi_0(\tau) = 0; \quad (13)$$

$$-\lambda \frac{\partial \psi(L, \tau)}{\partial x} = \alpha_H \psi(L, \tau). \quad (14)$$

Доказано утверждение, что если допустимое управление  $u(\tau)$  доставляет минимум критерию (7), то оно должно максимизировать функцию  $H$ , определенную соотношениями (8)–(14), т. е.

$$u^*(\tau) = \arg \{ \sup H | W_0^{\min} \leq u(\tau) \leq W_0^{\max} \}.$$

Аналитически решить данную задачу ввиду ее сложности не представлялось возможным. Вместе с тем, большим достоинством доказанного утверждения является то, что оно позволяет во многих случаях оценить структуру оптимального управления, его общий вид, не решая самой оптимальной задачи. Например, в линейных оптимальных задачах, т. е. в задачах, уравнения которых содержат управление в первой степени, оптимальное управление представляется кусочно-постоянной функцией, принимающей поочередно значения  $W_0^{\min}$  и  $W_0^{\max}$ , т. е. она будет представлять такую функцию

$$u^*(\tau) = \frac{W_0^{\min} + W_0^{\max}}{2} + \frac{W_0^{\max} - W_0^{\min}}{2} \times \text{sign}[\psi_0(\tau) - \beta], \quad (15)$$

где  $W_0^{\min}$ ,  $W_0^{\max}$  – соответственно минимально возможная и установленная (максимально возможная) мощность системы отопления здания.

Дальше учитывая полученные результаты и практические соображения, полагали, что приближенно-оптимальное управление имеет два интервала постоянства. В связи с этим оценивалась эффективность следующих алгоритмов управления.

I режим: в течение первого периода времени мощность системы отопления равна максимальному (установленному) значению, а во второй период – минимальному, причем длительность периодов отыскивалась моделированием процесса.

II режим: в течение первого периода времени мощность системы отопления равнялась минимальному значению, а во второй период – максимальному, длительность периодов отыскивалась также моделированием процесса, при этом условия задачи таковы, что ограничение по температуре внутреннего воздуха не нарушается, то есть внутренняя температура не опускается ниже 12 °С.

Для решения этой задачи была проведена конечно-разностная аппроксимация математической модели и разработано программное обеспечение в среде MatLab [1]. В результате расчетов было получено, что расход теплоты во втором режиме прерывистого отопления существенно ниже, что подтверждает ранее полученный вывод об оптимальности режима прерывистого отопления для

инженерной модели (с сосредоточенными параметрами) [2].

Разработанная программа [1] позволяет для конкретного здания рассчитать различные режимы управления мощностью системы отопления в нерабочий период для целей проведения качественного и количественного сравнения их. Таким образом, для здания были запроектированы еще 3 различных тепловых режима. Анализ этих режимов на основе вычислительного эксперимента был необходим для отыскания оптимального управления тепловой мощностью системы отопления, по возможностям обеспечения требуемой температуры внутреннего воздуха помещения и по количеству энергозатрат при этом.

III режим аналогичен II режиму, только дополнительно внутренняя температура выходит на свою границу 12 °С. Вообще, вопрос о том выйдет ли система на ограничение по внутренней температуре зависит от длительности режима прерывистого отопления, а также от установленной мощности системы отопления.

IV режим осуществляется путем поддержания внутренней температуры на заданном значении с помощью стабилизирующего регулятора, и им же определяется мощность системы отопления.

V режим, когда здание подключено к тепловым сетям и производится центральное регулирование отпуска теплоты на источнике, т. е. мощность, необходимая для разогрева здания, является функцией температуры наружного воздуха. Этот режим является наиболее распространенным в настоящее время.

В результате расчетов и сравнения было установлено, что экономичным является режим, когда интенсивный разогрев здания осуществляется только на конечном участке нерабочего времени (режимы II и III). Неэкономичным оказался наиболее распространенный в настоящее время режим, когда здание подключено к центральным тепловым сетям и осуществляется регулирование отпуска теплоты только на источнике. Расход тепловой энергии и величина экономии для рассмотренных режимов приведены в табл. 1.

Таким образом, было установлено, что целесообразно применение режима прерывистого отопления в зданиях с автономным источником теп-

Таблица 1

Расход и экономия тепловой энергии при различных режимах управления тепловой мощностью системы отопления

Показатели	Название режима			
	Оптимальный режим прерывистого отопления с выходом на ограничение по $t_{в}$	Оптимальный режим прерывистого отопления	Со стабилизирующим регулятором по $t_{в}$	При подключении здания к центральным тепловым сетям
Расход тепловой энергии, Вт·ч	20 289,6	31 159,2	43 597,1	45 060
Экономия, %	55	30,8	3,2	0

Результаты расчетов

Вид топлива, ед. измерения	Стоимость 1 ед., руб.	Экономленный объем топлива	Экономия, руб.	Стоимость топлива, руб.
1	2	3	4	5
СУГ, л	13,5	85,5	1154	12625
Дизельное топливо, л	24	74	1777	19440
Природный газ, м <sup>3</sup>	3,3	59	194,7	2133
Электроэнергия, кВт/ч	3,4	577,3	1963	21472
Центральные тепловые сети*	1221,3	–	–	7242*

\* Наиболее распространенный вариант подключения здания к центральным тепловым сетям, в нем реализация режима прерывистого отопления нецелесообразна.

лоты и нерационально при подключении их к центральным тепловым сетям. Это объясняется следующим образом: когда здание подключено к тепловым сетям и производится центральное регулирование отпуска теплоты на источнике, мощность, необходимая для разогрева здания, является функцией температуры наружного воздуха. Поступившая из центральных тепловых сетей энергия тратится на компенсацию текущих теплотерь здания, а сам разогрев здания, то есть подъем температуры внутреннего воздуха в нем, не происходит из-за отсутствия запаса теплоты. Данный факт является немаловажным, так как нередко в предложениях не совсем компетентных энергоаудиторов по энергосбережению можно увидеть неверное применение режима прерывистого отопления при подключении объекта к центральным тепловым сетям, что может приводить к аварийным ситуациям, разморозке систем отопления и т. д.

Хотелось бы отметить, что в технической литературе существуют методики расчета количества теплоты при применении режима прерывистого отопления, которыми не рекомендуется пользоваться. Данные методики являются очень поверхностными и не учитывают теплотехнические, в том числе теплоинерционные, особенности зданий, специфику его микроклимата, особенности и принцип действия систем отопления: инерционность, максимальную установленную тепловую мощность, возможную комбинацию систем отопления (водяной и воздушной); не ведется расчет продолжительностей периодов охлаждения и нагрета помещений, нет ограничения по минимальной допустимой температуре внутреннего воздуха в режиме отопления и т. д.

Применение оптимального режима прерывистого отопления, как уже отмечалось, возможно только при наличии индивидуального источника теплоты. Топливом, как известно, может являться природный газ, сжиженный углеводородный газ (СУГ), дизельное топливо и электроэнергия. Довольно интересным представляется вопрос сравнения финансовых затрат при эксплуатации оптимального режима прерывистого отопления с различными видами топлива и вариантом присоеди-

нения потребителя к центральным тепловым сетям. Расчеты проводились для города Челябинска, для небольшого одноэтажного бесчердачного, бесподвального здания общей площадью 42 м<sup>2</sup>, с теплотехническими характеристиками, отвечающими требованиям СНиП 23-02-2003 «Тепловая защита зданий», постоянная времени, характеризующая тепловую инерцию здания составляло 55 ч. Кроме того, в расчетах использовались установленные опытным путем средние величины, не подлежащие оспариванию справочные данные и методики, а также статистические данные по ценам и тарифам на топливо за 2011 г. Рассчитывались: расход теплоты при оптимальном режиме прерывистого отопления за год (5,4 Гкал) с учетом, что нерабочий период составляет 15 часов каждую ночь; расход тепловой энергии при подключении здания к центральным тепловым сетям за год (5,93 Гкал); количество экономленного топлива в режиме оптимального прерывистого отопления (табл. 2, колонка 3) и соответственно экономию денежных средств за год (табл. 2, колонка 4); стоимость топлива, сжигаемого в нерабочий период времени при оптимальном режиме прерывистого отопления за год (табл. 2, колонка 5).

Таким образом, из анализа очевидно, что оптимальный режим прерывистого отопления позволяет экономить теплоту, в данном случае в размере 8–10 %, но, ввиду серьезного различия тарифов на указанные виды топлива, данная экономия в финансовом плане тоже неодинакова. Кроме того, если за базовый вариант сравнения выбрать подключение здания к центральным тепловым сетям, то единственным менее затратным оказывается вариант автономного источника теплоты, работающего на природном газе при современном тарифе на тепловую энергию.

### Заключение

Таким образом, можно утверждать, что, во-первых, для модели объекта с распределенными параметрами определены условия оптимальности, сформулированные в форме принципа максимума, установлен общий вид оптимального управления; во-вторых, разработано программное обеспечение, позволяющее для любого объекта и различных

условий смоделировать разные режимы управления мощностью системы отопления в нерабочий период с целью их качественного и количественного анализа; в-третьих, подтверждена эффективность управления, найденного ранее на основе инженерной модели, установлено, что интенсивный натоп здания на конечном участке нерабочего времени экономит до 30–55 % теплоты; в-четвертых, доказана неэкономичность распространенного в настоящее время режима, когда здание подключено к центральным тепловым сетям; в-пятых, установлено, что целесообразно применение режима прерывистого отопления в зданиях с автономным источником теплоты и нерационально при подключении их к центральным тепловым сетям; в-шестых, проведен анализ экономии энергии и материальных средств при внедрении прерывистого отопления в случаях использования различных видов топлива.

#### *Литература*

1. Свидетельство об отраслевой регистрации разработки, зарегистрированное в Отраслевом фонде алгоритмов и программ (ОФАП). Программа для расчета оптимальных режимов прерывистого отопления зданий / Е.Ю. Анисимова. – № 50200800068 от 18.01.2008 г.
2. Панферов, В.И. Анализ возможности экономии тепловой энергии при прерывистом режиме отопления / В.И. Панферов, Е.Ю. Анисимова // Вестник ЮУрГУ. Серия «Строительство и архитектура». – 2008. – Вып. 6. – № 12 (112). – С. 30–37.
3. Панферов, В.И. Об экономии энергии при оптимальном управлении режимом прерывистого отопления / В.И. Панферов, Е.Ю. Анисимова // Научно-технический журнал «Инженерные системы. АВОК – Северо-запад». – 2009. – № 5 (44). – С. 32–35.
4. Панферов, В.И. Эффективная эксплуатация систем отопления / В.И. Панферов, Е.Ю. Анисимова // Теплогазоснабжение: состояние, проблемы, перспективы: сб. материалов Всерос. науч.-практ. конф. – Оренбург: ООО «НикОс», 2011. – С. 129–133.

*Поступила в редакцию 12 сентября 2012 г.*