

Оптимален контрол на консумацията на енергия при отопление на сгради

Ю. А. Табуничилов, д-тн, чл.-кореспондент на Руската академия по архитектура и строителство
Кенет Ван Де Велде, Jaga N.V.

Въпросът с контролът на енергията, изразходвана за вътрешно отопление или охлаждане, винаги е заемал централно място в теорията за отоплението и климатизацията. В съвременните условия този въпрос придобива все по-голяма значимост в резултат на усъвършенстваните технологии в областта на отоплението и климатизацията, изискващи оптимален контрол на енергийната консумация, вместо просто регулиране на отоплителния / климатизационния процес.

Възможността за използване на компютърни технологии в модерно оборудвани сгради по горната схема може да оптимизира процеса на отопление или охлаждане.

Основно значение в управлението на отоплителните системи имат приложенията за отопление в различен режим. С цел да се намали консумацията на енергия, изразходвана за отопление на почти всички модерни съоръжения, като например административни сгради, училища, театри, кина, жилища и фабрики, системите за отопление могат да се охлаждат под нормалната температура през определени периоди през деня, както и по време на почивните дни и празници. Въпреки това от момента на отваряне на помещението за редовна работа, температурните условия в него могат да отговарят на стандартите.

Този начин на отопление, когато температурата спада под нормалните стойности, се нарича отопление с променлив режим. Подобна е ситуацията при спешни случаи, когато захранването прекъсне.

Предвид голямото му практическо значение, темата за отоплението с променлив режим е широко експлоатирана.

Всички известни решения, обаче, се базират на анализа на промяната на температурата на въздуха в помещението, в зависимост от инертните характеристики на външните стени и режимът на топлоподаване. Тези решения разкриват основната тема, тъй като единствено отговарят на въпроса какво се случва, ако дадено решение се вземе при определени условия и предвижда стойността на избран критерий за ефективност. Решенията, разкриващи обратния проблем са концептуално по-трудни. Те могат да отговорят на въпроса: кое решение да се избере с цел критерият за ефективност да достигне максималната си стойност. В нашия случай е необходимо да изберем оптималния режим на периодично отопление, което свежда до минимум консумацията на топлина.

Решенията на проблема за оптимален контрол на енергийната консумация, изразходвана за отопление или охлаждане са представени за пръв път в [1, 2, 3].

Свеждането на енергийната консумация до минимум може да се изследва със задача за контролно управление. Процесът на установяване на режим на отопление е описан в уравнението за топлинен баланс на вътрешния въздух:

$$c\rho V \frac{dT_R}{dt} = \sum_i h_{c,i} (T_i|_{y=\delta_i} - T_R) F_i + c\rho\lambda_V V (T_0 - T_R) + Q(t) \quad (1)$$

Както и със системата от уравнения, която описва процеса на топлопренасяне през външните стени:

$$C_i \rho_i \frac{\partial T_i}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial y} \left[\lambda_i \frac{\partial T_i}{\partial y} \right] \\ (0 < y < \delta_i; t > 0)$$

$$\begin{aligned}
y=0 \quad & -\lambda_i \frac{\partial T_i}{\partial y} = \alpha_{out}^{con} (T_i - T_0^{con}) \\
y=\delta \quad & \lambda_i \frac{\partial T_i}{\partial y} = \alpha_{in}^{con} (T_i - T_R^{con}) + \sum_j \varphi_{i-j} (T_i - T_j) \\
t=0 \quad & T_i = \varphi_i(y)
\end{aligned} \tag{2}$$

Където:

$c \cdot \rho$ – обемната топлинна мощност на въздуха, $J/(m^3 \cdot ^\circ C)$;

V – обемът на нагрятото пространство, m^3 ;

T_R – вътрешна температура на въздуха, $^\circ C$;

T_0 – външна температура на въздуха, $^\circ C$;

t – време, с;

$h_{s,i}$ – коефициент на конвективен топлообмен на вътрешната i -повърхност, $W/m^2 \cdot ^\circ C$;

T_i – температурата на i -повърхността, $^\circ C$;

F_i – площ на i -повърхността, m^2 ;

$Q(t)$ – топлината, пренесена от източника (консумация на енергия), W ;

α_{in}^{con} , α_{out}^{con} – коефициент на конвективен топлообмен на вътрешната и външната повърхност, $W/m^2 \cdot ^\circ C$

T_j – средната вътрешна работна температура на ограждащите структури, свързани с j - повърхността на ограждащите структури и вътрешния въздух, $^\circ C$;

φ_{i-j} – коефициент на излъчвания топлообмен от i -повърхността към j -повърхността;

$\varphi_i(y)$ – първоначални условия.

Трябва да отбележим, че уравнение (1) е просто диференциално уравнение от първи ред.

Да приемем, че първият елемент от дясната страна на уравнение (1) се отнася както за стените, така и за прозорците, а вторият включва топлинните загуби поради въздухообмен.

Допускаме, че $T_{R,st}$ е първоначалната вътрешна температура на въздуха (where $t=t_0$), а $T_{R,end}$ - последната вътрешна температура на въздуха (където $t=t_1$). Функцията $Q(t)$ в отрязъка $[t_0, t_1]$ will се нарича контрол. Контролът $Q(t)$ се нарича допустим, ако функцията $Q(t)$ е прекъсната в секция $[t_0, t_1]$, и стойностите ѝ не надвишават границите на определено множество U . Очевидно всеки допустим контрол е ограничен.

Написваме уравнение (1) отново, както следва:

$$\frac{dT_R}{dt} = f(T_R, T_i, Q, t) \tag{3}$$

В теорията за оптимален контрол се приема, че дясната страна на уравнението (3) е непрекъсната функция и има непрекъснати първи производни по отношение на T_R , T_i , t за стойности в частта $[t_0, t]$.

Нека да дефинираме проблема за оптимизиране на консумацията на енергия при отопление на сграда и да го разгледаме като оптимална задача за контрол по следния начин: трябва да открием такъв контрол $Q(t)$ на консумацията на енергия изразходвана за промяна на температурата в сградата и такова решение на системата от уравнения за топлинния баланс на дадена сграда като обща енергийна система, каквито биха удовлетворили първоначалните условия, при които функционалът

$$W = \int_{t_0}^{t_1} Q(t) dt \tag{4}$$

реализира възможно най-ниска стойност.

Функционалът (4), който следва да се сведе до минимум, определя консумацията на енергия, изразходвана за отопление на сградата.

Контролът $Q(t)$, който осигурява решение на даден проблем, се нарича оптимален контрол и съответства на промяната на температурата от първоначалната $T_{R,st}$ до крайната $T_{R,end}$, докато траекторията на промяна съответната температура – $T_R(t)$ – се нарича оптимална траектория.

Задачата се решава по метода, предложен първоначално от Л. С. Понтриагин [4], като се правят традиционните опростени предположения, свързани с топлинния баланс на сградата. Получихме следните резултати:

Свеждането до минимум на изразходваната енергия за отопление на сграда се получава, когато времето за промяна между първоначалната и желаната температура в сградата е минимално (методът за максимално бързо действие).

За да приведем това условие с действие за дадена сграда е необходимо допълнително да проучим компонента топлинен баланс, както и да изчислим данните за топлинно съхранение.

За повечето жилищни и обществени сгради свеждането до минимум на енергията, изразходвана за отопление, може да се постигне при прилагане на следващите две твърдения:

Твърдение ПЪРВО:

Сградата трябва да се отоплява при максимална мощност на съответните отоплителни уреди.

Твърдение ВТОРО:

Отоплението на сградата трябва да започне от зоните с най-голям топлинен капацитет.

В повечето случаи това се отнася до вътрешните повърхности на външните стени, които по правило, са най-охлажданите (свеждането до минимум на времето за отопление може да се постигне чрез бързо нагриване на вътрешните повърхности на външните стени чрез конвекционни).

За да може контролът на консумацията на енергия да клони към оптимална стойност, твърдения ПЪРВО и ВТОРО трябва да се реализират едновременно. Обикновено при осъществяване само на едно от горните твърдения при отоплението на сгради (въздух плюс външни стени) дава резултат, който е далеч от оптималния.

Навремето, обаче, някои аспекти на горното решение предизвикаха сериозни съмнения сред приложните математици и възникна необходимостта от повече доказателства.

Трудът на изтъкнатия математик проф. Ю. Ф. Коробежник, съвместно с проф. Ю. А. Табуншчиков [5, 6], потвърди точността на резултатите.

Същевременно, едно математическо заключение не може да бъде убедително за научните изследователи и експерти, освен ако не е проверено с преки изчисления, или, като това се счита за необходимост, не е потвърдено чрез специфично експериментално изследване.

Съществен елемент при потвърждаване на заключенията посредством преки изчисления е използването на сложни математически симулационни програми. Това вече е работа от съвсем различен характер. Поради това остава изборът да се намери възможност за извършване на специфичен експеримент.

Целта на експеримента е да се покаже ефективността на контрола върху оптималната консумация на енергия, определена с нашето решение и произтичащите твърдения ЕДНО и ДВЕ. Това се прави с помощта на количествено сравнение на енергията, използвана при отоплението на дадена сграда.

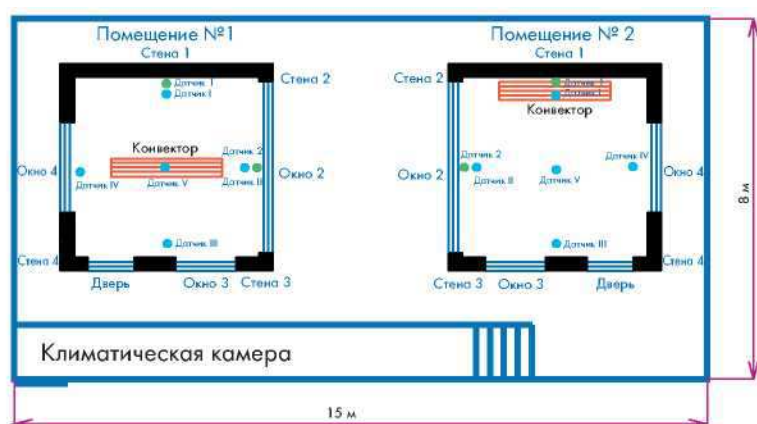
За да се проведе експериментът и да се провери твърдение ЕДНО (сградата трябва да се отоплява при максимална мощност на дадените отоплителни уреди), е препоръчително да се вземат две идентични помещения и да се организира процес на едновременно затопляне на помещенията, като се прилагат източници на различна мощност. С други думи, ако се използва само един източник, експериментът трябва да се раздели на две части и да се използва източник, който гарантира различни нива на захранване за двата етапа.

За да проверим твърдение ВТОРО (отоплението на сградата трябва да започне от зоните с най-висок топлинен капацитет), се нуждаем от две идентични помещения с еднакви отоплителни уреди. В първия случай те ще затоплят първоначално вътрешната повърхност на външните стени, например, чрез интензивни конвекторни струи, а в другия случай ще затоплят първоначално въздуха в помещението.

Белгийското дружество Jaga NV предложи да проведе експеримента в климатична камера в изследователския си център, която отговаря на горните изисквания.

Разполагаме с две идентични помещения в климатичната камера (Фиг. 1, 2) – всяко от които с размер 4m x 4m с наклонен покрив и височина от 2,7 – 3,7 m. В климатичната камера е възможно поддържането на въздушна температура в границите от -15 до +30 °C.

Отворите за прозорци се намират: в стена 2 – с площ от 12,60m²; в стена 3 – с площ от 1,56m²; в стена 4 – с площ от 2,52m². Пълнеж – многопластово стъкло с алуминиеви основи и еднакъв коефициент на топлопредаване и устойчивост, равняващ се на 0,6m²·°C/W. Стените са 300 mm дебели. Еквивалентният коефициент на топлопредаване и устойчивост за стените е 2,7m²·°C/W и 2,6m²·°C/W – за тавана. В помещенията няма обмяна на въздух.



Фиг. 1. Диаграма на климатичната камера и изглед на експерименталните помещения, отоплителните уреди и температурните сензори.



Фиг. 2. Изглед на климатичната камера в изследователския център на JAGA.

За измерване на температурата във всяко помещение се използват следните инструменти:

- 25 сензора за измерване на вътрешната температура, поставени в пет пункта (I, II, III, IV, V) по височина в помещенията; сензори I, II, III, IV са поставени на разстояние от 27 cm от повърхността на стената;
- 5 сензора за измерване на температурата на вътрешната повърхност на стена 1;
- 5 температурни сензора на вътрешната повърхност на прозорец 2.

Сензори за измерване на температурата са поставени на пет нива: на 0,1m, 0,6m, 1,1m, 1,6m, и 2,1m от пода (сн.3). Температурните сензори на вътрешната повърхност на външните стени са обозначени с обикновени номера, а температурните сензори за вътрешния въздух са означени с римски цифри.



Снимка 3. Температурни сензори от вътрешната страна на стените с прозорци

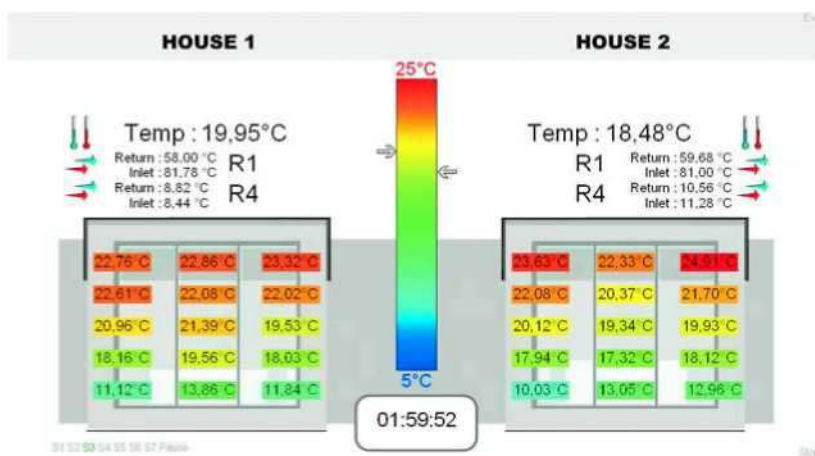


Рис. 4. Резултатите от експеримента се изписват на екран

При обработка на този експеримент е изведено следното уравнение за измерване температурата t на помещението:

$$t_{\text{m}} = \frac{t_{\text{a}} + t_{\text{ndaii}} + t_{\text{ieia}}}{3} \quad (5)$$

където t_{air} , t_{wall} , t_{window} са, съответно, температурата на въздуха в помещението, вътрешната повърхност на стена 1 и вътрешната повърхност на прозорец $2,^{\circ}\text{C}$, определени с уравненията:

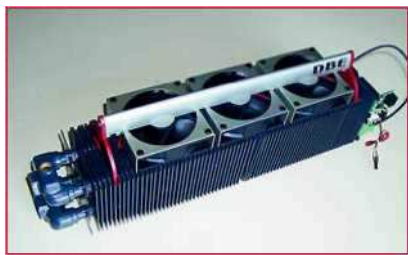
$$t_{\text{a}} = \frac{\sum_{i=1}^{25} t_{\text{ai}}}{25}, \quad t_{\text{ndaii}} = \frac{\sum_{i=1}^5 t_{\text{ndaii } i}}{5}, \quad t_{\text{ieia}} = \frac{\sum_{i=1}^5 t_{\text{ieia } i}}{5}. \quad (6)$$

Помещенията са оборудвани с радиатори Tempro на JAGA (модел 11), снабдени с медно-алуминиеви конвектори и поставени на височина 400 mm, дълги 2 400mm.

Радиаторът се състои от топлообменник, защитен с панели. Теплообменникът представлява кръгла безшевна медна тръба с алуминиеви ребра.

В помещение 1 системата за отопление е поставена в средата на помещението, а в помещение 2 – до външните стени, близо до стената (фиг. 1). Системата с ДУЕ (Динамичен усилващ ефект) от JAGA (фиг. 5) може да се инсталира на радиатора с цел да се увеличи топлинната мощност и да се насочат конвекционните струи към вътрешната повърхност на външните стени (когато

отоплителното устройство е прикрепено към стената) чрез вентилатори с регулируема ротационна скорост.



Фиг. 5. Системата DBE на JAGA, монтирана в радиатора

Водата, подгрята с газов нагревател в помещението, непосредствено до климатичната камера, се използва като нагриваща течност. Тъй като нагриващата течност се подава към радиаторите от един и същи източник, температурата в двата радиатора остава еднаква.

Входящата и изходящата температура, както и моменталното потребление на вода във всеки радиатор, се контролират чрез сензори. Консумацията на енергия за отопление на помещението се изчислява в спрямо входящата и изходящата температура, както и количеството употребена нагриваща течност.

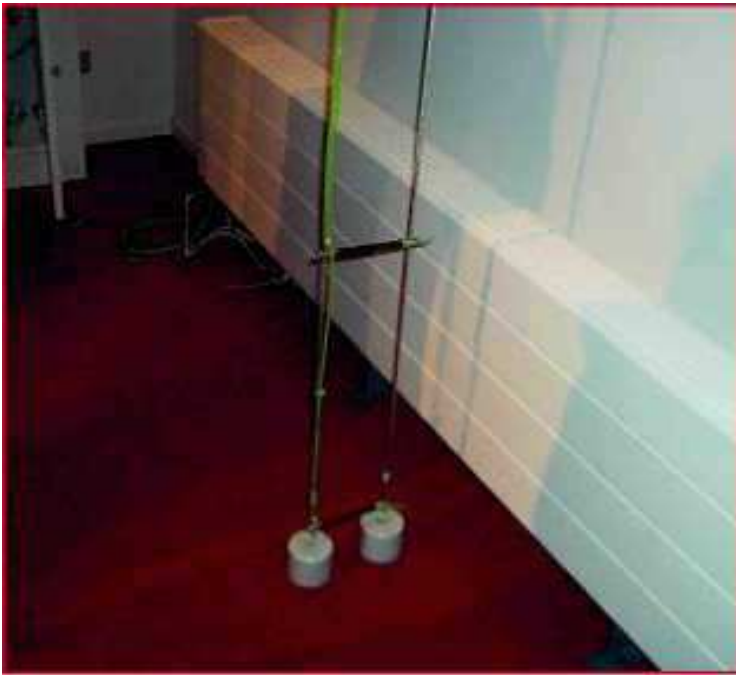
Резултатите от анализа на консумацията на енергия за отопление на помещенията на различни нива на топлинната мощност и при различно позициониране на радиаторите (конвекторите) са представени в таблица 1-5. Консумацията на енергия необходима за достигане на специфична температура в помещението се приема за мярка на ефективността на отоплението. Температурата в помещението се изчислява по формула (5).

Необходимо е да се посочат две обстоятелства, които са от значение за разбирането на експеримента. Първото обстоятелство е свързано със следното: експериментът е ограничен във времето, поради което отоплението на помещението не се осъществява в обичайните граници и започва от 0°C , а не от 13 или 15°C . От друга страна, това обстоятелство не само не оказва влияние върху важността на експериментите, но дори увеличава тяхната категоричност.

Второто обстоятелство: топлинната мощност на радиатора се променя в процеса на експеримента поради температурните разлики между повърхността на радиатора и въздуха в помещението. Също така, автоматичните устройства в този експеримент не са демонтирани с цел да се запази точния контрол на температурата и използваната отоплителна течност. Тези колебания не надвишават 5% и не оказва влияние върху крайните изводи.

Резултатите от изпитването при Твърдение ПЪРВО (**сградата трябва да се отоплява при максимална мощност на съответните отоплителни уреди**) са представени в таблици 1 и 2. Изследването на таблици 1 и 2 показва, че:

- Когато радиаторът е поставен в средата на помещението и увеличаваме топлинната мощност от $1,5$ на $4,7\text{kW}$, можем да спестим енергията, изразходвана за отоплението на помещението от 0 до 9°C с 53% и да намалим времето за затопляне от 3 часа и 41 минути на 34 минути;
- Когато радиаторът е поставен от вътрешната страна на външната стена на помещението (сн. 6), увеличаването на топлинната мощност от $1,7$ на $5,1\text{kW}$ гарантира 43% икономия на мощност за отопление на помещението от 0 до 9°C , като намалява времето за затопляне от 2 часа и 26 минути на 28 минути.

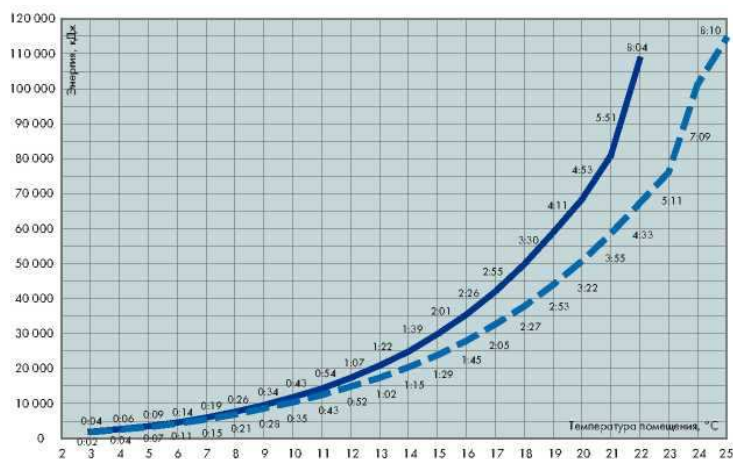


Сн. 6. Радиатор, поставен от вътрешната страна на външните стени

Резултатите от изпитването при твърдение ВТОРО (отоплението на сградата трябва да започне от зоните с най-висок топлинен капацитет) са представени в таблица 3.

Разглеждането на таблица 3 показва, че радиаторите с еднаква топлинна мощност, поставени от вътрешната страна на външните стени (помещение 2) позволяват спестяването на повече енергия в сравнение с радиаторите, поставени в средата (помещение 1) (Сн. 7):

- При затопляне на помещението от 0 до 9⁰С, се получава икономия от 10,4%, а времето за затопляне намалява от 34 на 28 минути;
- При затопляне на помещението от 0 до 22, се получава икономия от 37,9%, а времето за затопляне намалява от 8 часа и 7 минути на 4 часа и 33 минути;



Сн. 7. Изразходвана енергия за затопляне на помещението с радиатор, поставен от вътрешната страна на външните стени (пунктираната линия на диаграмата) и с радиатор в средата на помещението (непрекъсната линия). Числата на диаграмата показват времето (h/min) за постигане на съответната температура.

Резултатите от експеримента с радиатор поставен от вътрешната страна на външните стени с и без инсталирана система ДВЕ, са представени в таблица 4.

Изучаването на таблица 4 показва, че инсталацията на система с DBE на радиатора позволява да се икономисат 42,5% енергия при нагриване на помещението от 0 до 22°C, както и да се намали времето 4 часа 33 минути на 1 час и 54 минути. Експерименталните проучвания за изследване на резултатите за оптимален контрол на отоплението и Твърдения ПЪРВО и ВТОРО (сградата трябва да се отоплява при максимална мощност на съответните отоплителни уреди и отоплението на сградата трябва да започне от зоните с най-висок топлинен капацитет) са представени в таблица 5. Числата в таблица 5 показват, че икономията на енергия достига до 72,7%.

Таблица 1

Резултати от анализа на консумация на енергия за отопление на помещението при поставяне на радиатора в средата

Топлинна мощност на радиатора, kW	Промяна на температурата, °C	Консумация на енергия		Време за отопление	
		kJ	%	h: min	%
1,5	от 0 до 9	20 460	100	3:41	100
4,7	от 0 до 9	9 577	47	0:34	15,4

Таблица 2

Резултати от експеримента, когато радиатора е поставен от вътрешната страна на външните стени

Топлинна мощност на радиатора, kW	Промяна на температурата, °C	Консумация на енергия		Време за отопление	
		kJ	%	h:min	%
1,7	from 0 to 9	14 762	100	2:26	100
5,1	from 0 to 9	8 580	58	0:28	32,6

Таблица 3

Сравнение между топлинната консумация и времето за отопление при поставяне на радиатора в средата на помещението (помещение 1) и от вътрешната страна на външните стени (помещение 2)

Топлинна мощност на радиатора kW	Промяна на температурата, °C	Енергия			Време		
		Консумация на енергия, kJ (помещение 1)	Консумация на енергия, kJ (помещение 2)	Намаляване на консумацията на енергия, %	Време за отопление на помещение 1, h:min	Време за отопление на помещение 2, h:min	Съкращава не на времето, %
4,9	от 0 до 9	9 577	8 580	10,4	0:34	0:28	17,6
3,9	от 0 до 22	108 333	67 307	37,9	8:07	4:33	43,9

Таблица 4

Сравнение между консумацията на енергия и времето за отопление на помещението при работа на радиатора с и без система DBE

Система за отопление	Топлинна мощност на радиатора, kW	Промяна на температурата, °C	Консумация на енергия, kJ	Energy consumption, %	Време за отопление на помещението, h:min	Съкращаване на времето, %
с ДУЕ	4,1	от 0 до 22	67 307	100	4:33	100
Без ДУЕ	5,7	от 0 to 22	38 726	57,5	1:54	41,8

Таблица 5

Сравнение между консумацията на енергия и времето за отопление на помещението, когато радиаторът е поставен в средата на помещението и работи с DBE система и когато радиаторът е поставен от вътрешната страна на външните стени и работи с инсталирана система DBE

Система за отопление	Heating System	Топлинна мощност на радиатора, kW	Промяна на температурата, °C	Консумация на енергия, kJ	Консумация на енергия, %	Време за отопление на помещението, h:min	Съкращаване на времето %
с ДУЕ	without DBE	1,5	from 0 to 9	20 460	100	3:41	100
Без ДУЕ	with DBE	7,8	from 0 to 9	5 595	27,3	0:12	5,4

Изводи:

1. Проведените експерименти разкриват сравнително високи стойности на спестяване на енергия (над 50%) при оптимален контрол според правилата в Твърдения ПЪРВО и ВТОРО след решаването на задачата.
2. Въпреки факта, че резултатите във връзка с икономията на енергия, получени след експериментите са впечатляващи, във всеки отделен случай могат да се постигне по-голямо енергоспестяване, при условие, че потоците на оптимално разпределение на енергия в помещението са изследвани обстоятелствено.
3. Решението на проблема за оптимален контрол на консумацията на енергия, получено от авторите [1, 2, 3] може да се счита за база за разработване на нови системи за отопление или охлаждане с високи характеристики за енергоспестяване.

Източници

1. Табуншчиков Й. А., Бродач М.М. Свеждане до минимум на консумацията на енергия, изразходвана за вътрешно отопление. “Строителство и архитектура”. Новосибирск. 1988. №12.
2. Табуншчиков Й. А. Математически модели на топлинните условия в сгради. CRC Press, 1993.
3. Табуншчиков Й. А., Бродач М.М. Математически модели и оптимизиране на топлинната ефективност на сградите АВОК-PRESS, 2002. Москва.
4. Понтрягин Л.С., Болтянски В.Г., Гамкрелидзе Р.В., Мищенко Е. Ф. Математическа теория за оптимизация на процесите. Физматгиз, 1961. Москва
5. Коробейник Й. Ф., Табуншчиков Й. А. За един изометричен проблем и неговите приложения. “Известия Вузов”. Северен Кавказ. 2002. №1. Natural science series.
6. Коробейник, Ю. Ф., Табуншчиков, Ю. Ф. За линейния контрол и приложението му в топлотехниката. АВОК-PRESS, 2002. Москва.
7. Шкловер, А. М. Теплообмен при периодично топлинно действие “Гозенергоиздат”. 1961. Москва.