

О. М. Голишев, А. О. Голишев, Д. В. Михалків, Е. В. Серебреніков
ДВНЗ “Криворізький національний університет”,
кафедра теплогазоводопостачання, водовідведення і вентиляції

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ОСТИГАННЯ БУДІВЛІ В УМОВАХ ПРИПИНЕННЯ ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ

© Голишев О. М., Голишев А. О., Михалків Д. В., Серебреніков Е. В., 2016

Наведено теоретичні розрахунки та дані експериментальних досліджень часу остигання будівлі в умовах існуючих систем опалення в холодний період року при застосованні режиму періодичної роботи системи опалення, що часто приймається для зменшення енергоспоживання будівель. При такому режимі роботи системи опалення розрахункові параметри мікроклімату підтримуються системою тільки на час експлуатації будинку за часом доби і днями тижня, у неробочий час система опалення не працює або підтримує мінімально допустимі температурні показники для швидкого виходу на нормовані параметри або забезпечення попередження замерзання теплоносія у водяних системах опалення. Теоретичний розрахунок виконано для громадської будівлі шестиповерхового учбового корпусу за умови використання зазначеного принципу роботи системи опалення. Експериментальні дослідження виконано в умовах застосування системи електричного радіаторного та підлогового опалення, що дало змогу розширити межі вимірювання та визначати розрахункові температури в приміщеннях при температурних показниках, за яких використання системи водяного опалення є аварійно небезпечним. Представлено розрахунок часу остигання будинку до мінімально встановленої температури під час вимикання системи опалення, що особливо важливо при аварійних відключеннях теплопостачання для визначення припустимого часу виконання ремонтних робіт.

Ключові слова: остигання будівлі, періодична робота системи опалення, температурні показники, акумуляція теплоти, енергоспоживання.

The article presents the theoretical calculations and the experimental research time cooling of the building in terms of existing heating systems during the cold season while to using periodic mode of heating, which is often taken to reduce energy consumption of buildings. In this mode, the heating system design parameters microclimate support system only for the duration of the building on time of day and day of the week, the time off the heating system is not working or supported minimum allowable temperature to quickly enter the normalized settings or software prevent freezing of the coolant in water systems heating. Theoretical calculations made for building provided use of the principle of the heating system. Experimental studies done in terms of application of the electric radiator and underfloor heating, which allowed to expand the boundaries of measurement and calculation to determine the temperature in the room at a temperature, at which the system of water heating emergency is dangerous. The calculation time cooling the building to the minimum set temperature when disconnecting heating system, which is especially important during emergency shutdown heat to determine the allowable time repair.

Key words: cooling buildings, periodic operation of the heating system, temperature, accumulation of heat energy, energy consumption.

Постановка проблеми. На практиці в умовах експлуатації існуючих систем опалення в холодний період року для зменшення енергоспоживання часто застосовується періодична робота системи опалення, при якій розрахункові параметри мікроклімату підтримуються системою тільки

на час експлуатації будівлі за часом доби і днем тижня, в неробочий час система опалення відключається.

Згідно з вимогами [1] в холодний період року в опалюваних приміщеннях упродовж періоду їх невикористання у житлових будинках допускається, а у громадських, адміністративно-побутових та виробничих будівлях слід приймати температуру повітря нижчою не більше ніж на 4 °С від нормованої температури, але не нижче ніж 12 °С у житлових, громадських та адміністративно-побутових будівлях і не нижче ніж 5 °С у виробничих приміщеннях. Але фактично для зменшення енерговитрат в приміщеннях, особливо тих, де існують значні надходження теплової потужності від людей, освітлення, технологічного обладнання та процесів, застосовують принцип перевивчастого (періодичного) опалення, при цьому розрахункове зниження температури приміщення значно перевищує вищенаведені нормативні значення, проте мінімальні значення температури відновлюються до початку робочого режиму приміщення за умови достатньої потужності теплогенераторів та коректно розрахованої системи опалення.

При виконанні таких розрахунків та дослідженні роботи систем опалення періодичної дії особливий інтерес представляє розрахунок часу остигання будівлі до мінімально встановленої температури при відключенні системи опалення, що особливо важливо при аварійних відключеннях теплопостачання для визначення допустимого часу виконання ремонтних робіт.

Мета роботи – отримання теоретичних залежностей та аналіз даних натурних експериментів щодо температурних режимів приміщень, що використовують системи опалення періодичної дії, визначення часу остигання будівлі від початкових до встановлених граничних розрахункових значень температури, визначення основних чинників впливу на швидкість охолодження будівлі.

Теоретичний розрахунок часу остигання будівлі. Розглядаються температурні показники в холодний період року. В середині будівлі початкова температура приймається постійною і дорівнює t_0 , °С. Як вихідне значення такої температури t_0 , °С вибирають її осереднену величину.

До елементів, що акумулюють в собі тепло під час роботи системи опалення, належать:

- повітря всередині будівлі;
- внутрішні огороження;
- зовнішні огороження;
- радіатори системи опалення;
- труби і арматура системи опалення;
- теплоносій (вода) в системі опалення.

Як конкретний приклад розглянемо процес охолодження будівлі будівельного факультету ДВНЗ “КНУ” після відключення системи опалення. Об’єкт дослідження – шестиповерхова будівля з загальною площею близько 10300 м².

Початкова температура теплоносія 90 °С за розрахункової зовнішньої температури (-23) °С, температура повітря в приміщеннях +18 °С.

Вихідне значення осередненої температури t_0 , °С розраховують за формулою:

$$t_0 = t_3 + \frac{Q_0}{C_{p\Sigma}}, \quad (1)$$

де t_3 – температура зовнішнього повітря, що також приймається постійною, °С; Q_0 – теплота, акумульована будинком при роботі системи опалення, Дж; $C_{p\Sigma}$ – сумарна ізобарна теплоємність будинку, Дж/°С.

Величини Q_0 і $C_{p\Sigma}$ визначають за формулами [2]:

$$Q_0 = \sum_i C_{pi} (t_{0i} - t_3), \quad (2)$$

$$C_{p\Sigma} = \sum_i C_{pi}, \quad (3)$$

де C_{pi} , й t_{0i} – відповідно ізобарні теплоємності, Дж/°С та вихідні температури, °С окремих елементів будинку.

Потрібно пам'ятати, що теплоємність зовнішніх огорожень входить до формули (2) і (3) з коефіцієнтом 0,5. Це пов'язане з тим, що температура за їх товщиною розподілена приблизно лінійно від середньої температури будівлі до зовнішньої.

Обчислюють конкретні значення C_{pi} за формулою [2]:

$$C_{pi} = c_{pi} m_i, \quad (4)$$

де c_{pi} , m_i – відповідно питома ізобарна теплоємність, Дж/(°C · кг) і маса, кг відповідного елемента будинку.

Розглянемо питання динаміки остигання будівлі при плановому чи аварійному відключенні системи опалення. Для цього можна записати рівняння теплового балансу:

$$Q_{ноч} = Q_{кінц} + \Delta Q_{втрат}, \quad (5)$$

де $Q_{ноч}$ – акумульована будинком теплота, Дж; $Q_{кінц}$ – кількість теплоти, що залишилася після втрат, Дж; $\Delta Q_{втрат}$ – втрати теплоти зовнішніми огороженнями протягом малого проміжку часу, Дж.

Оскільки розглядається середня по будинку температура, то справедливі формули [2]:

$$Q_{ноч} = C_{p\Sigma} (t_{ноч} - t_3); \quad (6)$$

$$Q_{кінц} = C_{p\Sigma} (t_{кінц} - t_3). \quad (7)$$

Втрати теплоти знаходимо як для пласкої стінки [3]:

$$\Delta Q_{втрат} = \sum_i \frac{S_i}{R_i} (t - t_3) \Delta t, \quad (8)$$

де S_i – площі різних елементів зовнішніх огорожень, м²; R_i – відповідні термічні опори, м²·°C/Вт; Δt – деякий малий проміжок часу, протягом якого t не встигає помітно змінитися, с.

До згаданих елементів зовнішніх огорожень належать:

- 1) стіни;
- 2) вікна;
- 3) перекриття під горищем і над підвалом.

Отже:

$$C_{p\Sigma} (t_{кінц} - t_{ноч}) = \sum_i \frac{S_i}{R_i} (t_3 - t) \Delta t, \quad (9)$$

$$C_{p\Sigma} \frac{\Delta t}{\Delta t} = \sum_i \frac{S_i}{R_i} (t_3 - t). \quad (10)$$

Переходимо до ліміту при $\Delta t \rightarrow 0$

$$\frac{dt}{dt} = \frac{\sum_i \frac{S_i}{R_i}}{C_{p\Sigma}} (t_3 - t). \quad (11)$$

Одержали звичайне диференціальне рівняння першого порядку щодо температури за часом. Множник перед різницею температур у правій частині є деяким аналогом коефіцієнта теплопровідності.

Рішення отриманого рівняння [4] відносно температури t дає динаміку охолодження будинку за часом:

$$t(t) = t_3 + (t_0 - t_3) \exp \left(- \frac{\sum_i \frac{S_i}{R_i}}{C_{p\Sigma}} t \right) \quad (12)$$

Формулу для знаходження часу остигання до заданої температури отримано внаслідок елементарних перетворень з виразу (12):

$$t = - \frac{C_{p\Sigma}}{\sum_i \frac{S_i}{R_i}} \ln \left(\frac{t - t_3}{t_0 - t_3} \right). \quad (13)$$

Розглянемо процес остигання будівлі на прикладі будівельного факультету ДВНЗ “КНУ” після відключення системи опалення. Прийmemo розрахункову температуру зовнішнього повітря $-23\text{ }^{\circ}\text{C}$. Розрахунок по (2) і (1) дає для середньої вихідної температури $t_0=18,19\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Вихідні та розрахункові дані наведені в табл.1 та табл. 2.

Таблиця 1

Характеристики елементів будинку

Назва	$C_{pi}, \text{Дж}/(\text{кг}\cdot^{\circ}\text{C})$	$m_i, \text{кг}$	$t_{0i}, ^{\circ}\text{C}$
1) повітря усередині будинку	1000	46300	18
2) внутрішні огороження	1100	5312000	18
3) зовнішні огороження	1100	5177000	18
4) радіатори системи опалення	540	15700	70
5) труби системи опалення	720	4700	70
б) вода в системі опалення	4190	4880	70

Таблиця 2

Характеристики елементів зовнішніх огорожень

Назва	$S_i, \text{м}^2$	$R_i, \text{м}^2\cdot^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$
1) стіни й покрівля	5601	1,38
2) вікна	987	0,35
3) перекриття над підвалом	1596	1,76

Прийmemo розрахункову температуру зовнішнього повітря $-23\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Формули (4), (3) з використанням даних з табл. 1 дають $C_{p\Sigma}=8,77\cdot 10^9 \text{ Дж}/^{\circ}\text{C}$.

Розрахунок за (2) і (1) дає для середньої вихідної температури $t_0=18,19\text{ }^{\circ}\text{C}$.

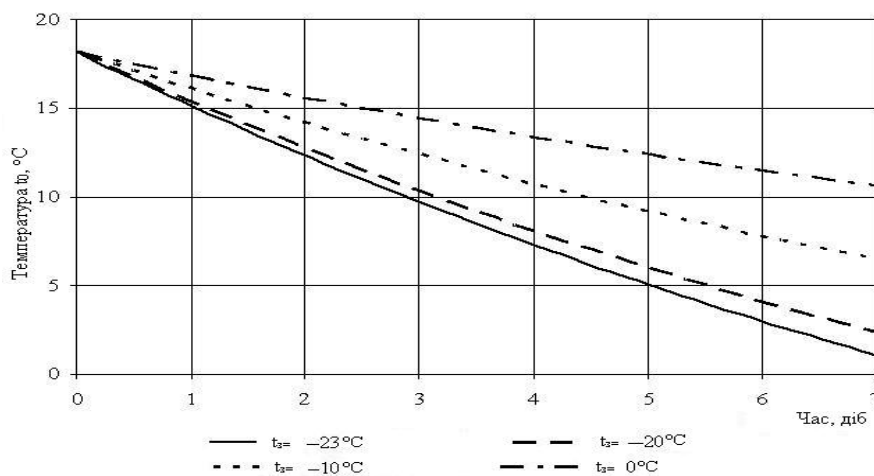


Рис. 1. Графік динаміки остигання дослідної будівлі в часі

Обчислимо час, за яке будинок охолоне, наприклад, до $5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Розрахунок за формулою (13) з використанням табл. 2 дає $\tau'=434802 \text{ с}\approx 5,03 \text{ діб}$.

Розглянемо динаміку процесу остигання будинку в часі. Графіки зміни температури будівлі побудовано за розрахунковими значеннями формули (12) для чотирьох значень температури зовнішнього повітря представлені на рис.1.

Розрахунки виконано за осередненою температурою будівлі, при цьому не враховано різниці в швидкості охолодження повітря всередині будівлі і огорожувальних конструкцій внаслідок відмінності в процесах теплообміну і теплотехнічних властивостях, зокрема вплив залежності швидкості зниження температури приміщення від площі скління — за виконаними авторами натурними експериментами при площі скління близько 56 % від площі огорожувальних конструкцій приміщення зниження температури повітря в приміщенні з $+18\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+5\text{ }^{\circ}\text{C}$ відбувалося

приблизно за 8–11 годин. Відповідно до [5] при припиненні подачі тепла приміщення починає поступово охолоджуватися: спочатку різко знижується температура повітря, досягаючи рівня осередненої температури поверхонь, потім температура у всіх точках починає знижуватися одночасно, основні втрати тепла відбуваються через вікна. Також не враховано різниці в швидкості охолодження різних поверхів будівлі залежно від їх висотного положення, орієнтації за сторонами світу, частки світлопрозорих огорожувальних конструкцій, що є значущими факторами при визначенні мінімальної температури приміщення (зокрема повітря), до якої можливе охолодження будівлі без пошкодження системи опалення при постійній експлуатації в зазначеному періодичному режимі або при проведенні аварійних ремонтних робіт.

Дослідження остигання будівлі в умовах періодичної роботи системи опалення. Для визначення фактичного часу остигання будівлі було проведено експериментальні дослідження в умовах приміщення громадської будівлі. В приміщенні розміром 3,5×6 м висотою 2,6 м встановлено електричне опалення: електричні радіатори біля віконних прорізів та електрична кабельна система підігрівання підлоги. Приміщення є одноповерховим з окремим входом та прибудоване до основної будівлі короткою стороною 3,5 м. Спільна стіна теплоізолювана від основної будівлі, тому фактично тепловий потік від експлуатованої основної частини є мінімальним, приміщення має окремий облік спожитої електричної енергії.

В умовах такої дослідної будівлі можливо не підтримувати необхідного мінімального значення температури приміщення для запобігання замерзанню теплоносія, як при використанні водяного опалення.

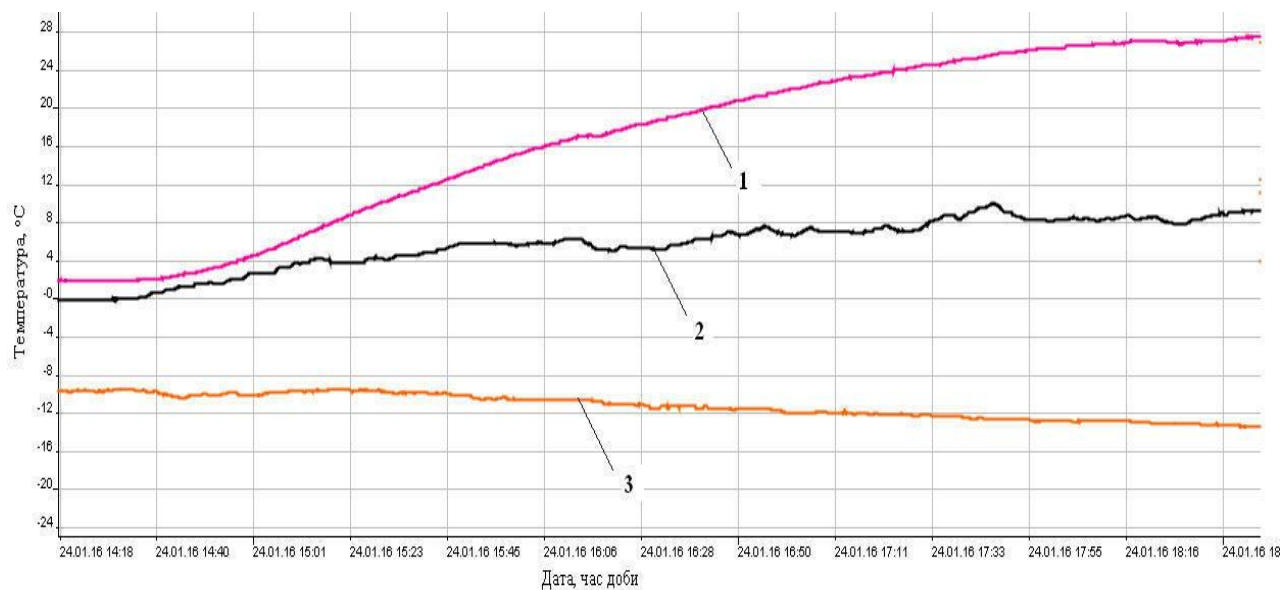


Рис. 2. Динаміка процесу нагрівання дослідного приміщення: 1 – температура поверхні покриття при підлоговому опаленні; 2 – температура повітря в приміщенні на висоті 1,5 м; 3 – температура зовнішнього повітря

Зазначена система опалення працює за встановленим графіком експлуатації приміщення, при цьому перерви в роботі можуть становити від 1 до 3 діб, при цьому систему опалення повністю відімкнено.

Вимірювання виконували і результати накопичували 6-канальним логером даних, інтервал вимірювань становив 30 с.

Дані натурних вимірювань температури в приміщеннях наведено на рис. 2 та 3.

Відповідно до наведених на рис. 2 даних процес нагрівання (опалення приміщення) становив 2 години, початкова температура повітря в приміщенні $-0,3\text{ }^{\circ}\text{C}$, кінцева $+9,2\text{ }^{\circ}\text{C}$, температура поверхні підлоги підвищилася до заданої розрахункової температури $+28\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Результати вимірювання параметрів динаміки процесу охолодження приміщення протягом приблизно 1 доби (23,5 годин) наведено на рис. 3.

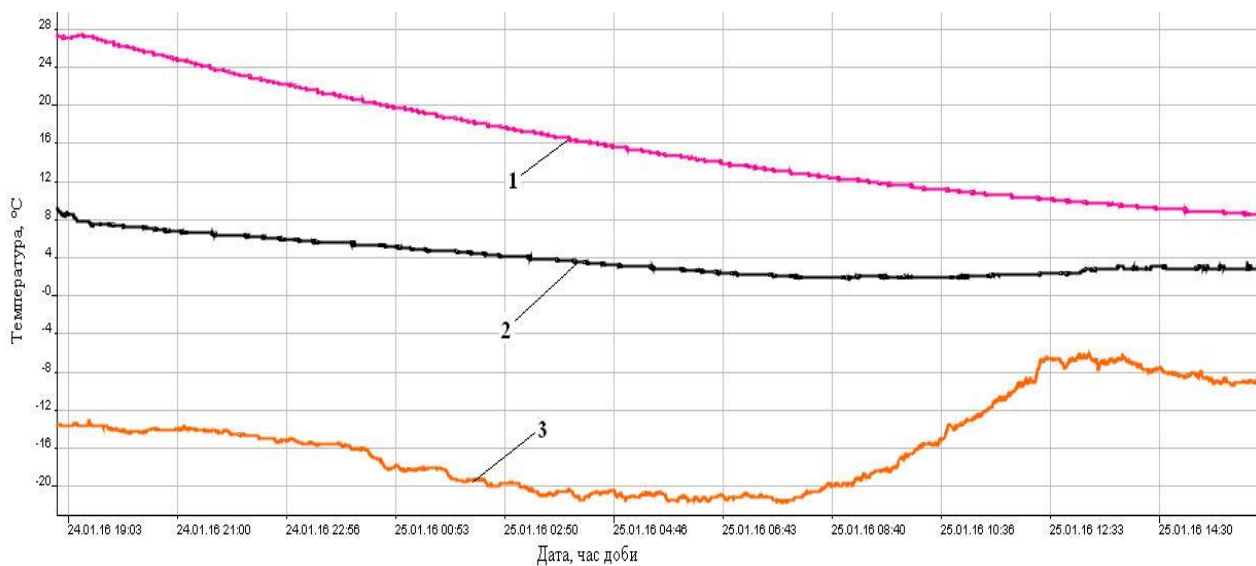


Рис. 3. Динаміка процесу остигання дослідного приміщення: 1 – температура поверхні покриття при підлоговому опаленні; 2 – температура повітря в приміщенні на висоті 1,5 м; 3 – температура зовнішнього повітря

За результатами вимірювань параметрів приміщення з комбінованою системою опалення вагомим є визначений ефект пролонгації та зменшеної динаміки зниження параметрів температурного режиму внаслідок акумуляційних властивостей панельної системи опалення.

Висновки: 1. Теоретичний розрахунок часу остигання будівлі за наведеною методикою не враховує основний небезпечний чинник при роботі систем водяного опалення як найпоширеніших на практиці – швидке зниження температури повітря в приміщенні, що може призвести до виникнення аварійної ситуації (розморожування) системи опалення.

2. За результатами натурних експериментів можна зробити попередні висновки, що застосуванням робочої комбінації гріючих (підлогових) панелей та конвективних опалювальних приладів досягають ефекту запобігання різкому падінню температури повітря в приміщенні у разі виникнення або переривчастої роботи системи опалення, що забезпечує більший час безаварійної роботи системи водяного опалення.

1. Опалення, вентиляція та кондиціонування: ДБН В.2.5-67:2013. – [Чинний від 2014-01-1]– К.: Мінбудрегіон України, 2013. – 141 с. – (Національний стандарт України). 2. Буляндра О. Ф. Технічна термодинаміка. – К.: Техніка, 2001. – 320 с. 3. Михеев М. А., Михеева И. М. Основы теплопередачи. – М.: Энергия, 1977. – 344 с. 4. Понтрягин Л. С. Обыкновенные дифференциальные уравнения. – М.: Наука, 1970. – 332 с. 5. Каменев П. Н., Сканава А. Н., Богословский В. Н. Отопление и вентиляция: учебник для вузов: в 2-х ч. Ч.1. Отопление. – М.: Стройиздат, 1975. – 483 с.