

Экспериментальное определение времени остывания здания при аварийном отключении системы теплоснабжения

М. В. Горелов,

Московский энергетический институт, кандидат технических наук,
доцент кафедры тепломассообменных процессов и установок

С. В. Гужов,

Московский энергетический институт, кафедра тепломассообменных процессов и установок,
кандидат технических наук, доцент

Е. М. Горячева,

Московский энергетический институт,
старший преподаватель кафедры тепломассообменных процессов и установок

М. Ю. Юркина,

Московский энергетический институт, кандидат технических наук,
доцент кафедры тепломассообменных процессов и установок

Статья посвящена экспериментальному определению коэффициента тепловой аккумуляции здания и обработке результатов этого эксперимента. Приведено сравнение расчетного коэффициента тепловой аккумуляции и коэффициента, определенного по результатам эксперимента, сделаны выводы о причинах их отличия. Представлены графики зависимости изменения температуры внутреннего воздуха от времени.

Ключевые слова: коэффициент тепловой аккумуляции, теплоаккумулирующая способность, тепловая защита зданий, теплоснабжение.

Эксплуатируемое здание, независимо от его назначения, является потребителем тепловой энергии, большая часть которой расходуется на отопление и приточную вентиляцию. Часть тепловой энергии аккумулируется в наружных ограждающих конструкциях, внутренних стенах, перекрытиях, технологическом оборудовании, мебели. В соответствии с п. 9.3.25 Правил технической эксплуатации тепловых энергоустановок, в процессе тепловых испытаний выполняется наладка и регулировка системы отопления для определения теплоаккумулирующей способности здания и теплозащитных свойств ограждающих конструкций. При выполнении испытаний под теплоаккумулирующей способностью здания понимается период времени, в течение которого температура воздуха в отапливаемых помещениях при отключенной системе отопления снизится до значения 8°C . Температура воздуха в неотапливаемых помещениях (чердаки, подвалы) за этот период может приблизиться к значению, которое лишь на несколько градусов превышает 0°C . Определенный в результате испытаний период – это время, которое имеется в распоряжении ремонтной бригады теплоснабжающей организации для ликвидации аварийной ситуации в системе теплоснабжения здания.

Теплоаккумулирующую способность здания также целесообразно определять для реализации энергосберегающих мероприятий. Одним из таких мероприятий может быть покрытие пиковых расходов тепловой энергии в системе горячего водоснабжения за счет сни-

жения подачи тепловой энергии в систему отопления здания. Подобное энергосберегающее мероприятие подробно рассмотрено в [1].

Объектом настоящих исследований являлось отдельно стоящее здание библиотеки в Москве. В плане здание имеет Т-образную форму. Краткие характеристики объекта представлены в табл. 1.

Наружные ограждающие конструкции представляют собой керамзитобетонные плиты толщиной 250 мм и двойные стеклопакеты в ПВХ-переплетах. Ориентировочное значение приведенного сопротивления теплопередачи керамзитобетонных плит составляет $0,56 (\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})/\text{Вт}$, стеклопакетов – $0,4 (\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})/\text{Вт}$. Внутренние перегородки – кирпичные (полнотельный глиняный кирпич) толщиной 120 мм с обшивкой гипсокартонными листами; перекрытия – сборные железобетонные плиты однослойные, толщиной 160 мм; полы в лекционных и читальных залах и коридорах – из паркетной доски толщиной 15 мм; подготовка под полы – два слоя мягких древесно-волокнистых плит общей толщиной 25 мм, каждый слой на горячей мастике; перекрытия в хранилище книг между первым и вторым этажами представляют собой стальные перфорированные листы с прямоугольными отверстиями для дополнительной вентиляции; кровля – рулонное покрытие по железобетонному настилу.

Теплофизические свойства ограждений рассмотренного помещения представлены в табл. 2.

Таблица 1

Характеристики объекта исследований

Показатель	Значение
Год постройки	1973
Этажность	4 + подвал и технический этаж
Отапливаемый объем, м ³	45 259
Полезная площадь, м ²	7260
Общая площадь наружных ограждающих конструкций, м ²	9937
Из них стен, включая окна и балконные и входные двери в здание, м ²	3103,95
Коэффициент остекления фасада здания	0,18
Показатель компактности здания	0,22

Таблица 2

Теплофизические свойства материалов ограждающих конструкций

Материал	Плотность ρ , кг/м ³	Удельная теплоемкость c , кДж/(кг·°C)
Керамзитобетон	1700	0,84
Кирпич	1900	0,8
Гипсокартон	750	0,95
Железобетонные плиты	2400	0,84
Древесно-волоконная плита	1050	2,3
Паркетная доска	700	0,88
Сталь Ст3 (перфорированные перегородки книгохранилища)	7850	0,48

Поддержание внутренней температуры воздуха в помещениях библиотеки осуществляется системой водяного отопления, в которой в качестве отопительных приборов используются чугунные радиаторы МС-140.

Эксперимент

Изначально целью эксперимента являлось определение температуры внутреннего воздуха в течение длительного периода времени и определение соответствия данной температуры условиям теплового комфорта. Однако в момент проведения настоящего эксперимента произошла аварийная ситуация в системе отопления здания. Факт прекращения подачи теплоносителя к отопительным приборам не был зафиксирован своевременно, и подача теплоносителя не была восстановлена, так как авария произошла во время праздников. Здание библиотеки не отапливалось в течение 8 суток.

Измерения температуры внутреннего и наружного воздуха проводились с помощью логгеров данных

testo 175 T1 с встроенным сенсором (NTC). Данные приборы предназначены для осуществления непрерывного мониторинга температуры с автоматическим сохранением результатов во внутренней памяти устройства. Технические характеристики testo 175 T1 приведены в табл. 3.

Измерители-регистраторы температуры были установлены в нескольких помещениях, расположенных на разных этажах корпуса библиотеки. В работе использовались показания логгеров, установленных на втором этаже в помещении книгохранилища на стеллажах с книгами на высоте 1,8 м.

Измерители-регистраторы температуры регистрировали показания температуры внутреннего воздуха с 28 декабря 2016 г. по 8 января 2017 г. 1 января 2017 г. произошло аварийное отключение системы отопления, в результате чего удалось провести экспериментальное исследование остывания здания. Полученные данные послужили основой для определения экспериментального значения коэффициента тепловой аккумуляции здания.

Таблица 3

Технические характеристики testo 175 T1

Диапазон измерений	-35...+55 °C
Погрешность	±0,5 °C
Разрешение	0,1 °C
Память	1 000 000 значений

На основании результатов экспериментального исследования остывания здания были построены графики изменения температуры внутреннего и наружного воздуха во времени, представленные на рис. 1 и 2 соответственно.

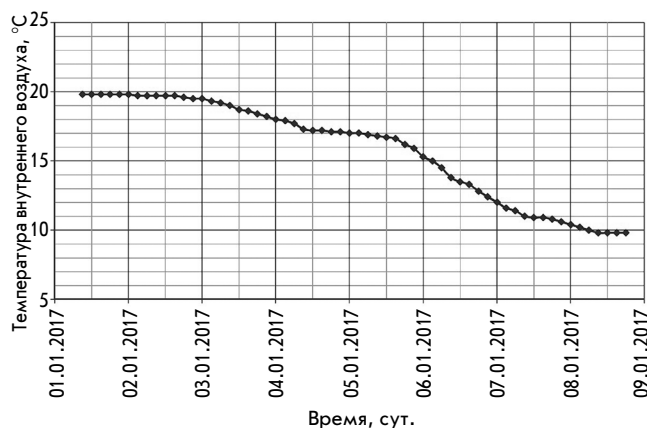


Рис. 1. График изменения температуры внутреннего воздуха во времени

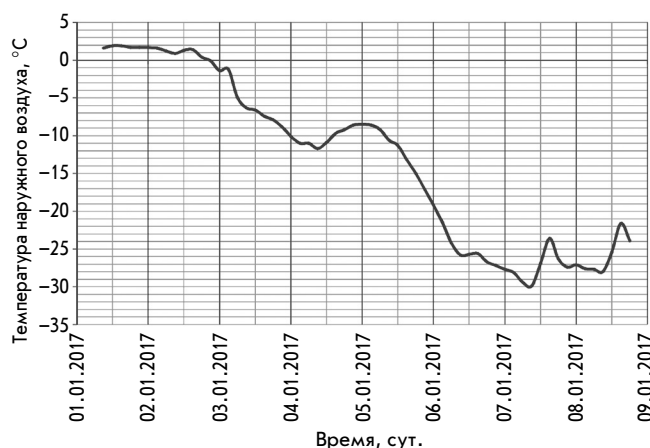


Рис. 2. График изменения температуры наружного воздуха во времени

Обработка результатов эксперимента

На основании полученных численных значений температур внутреннего и наружного воздуха во времени были определены коэффициенты

тепловой аккумуляции здания в каждый момент измерения.

Экспериментальное значение коэффициента тепловой аккумуляции определялось по формуле, которая представлена в [2, 3]:

$$\beta_{\text{экс}} = \frac{z}{\ln \left(\frac{t_B - t'_H}{t'_B - t'_H} \right)}, \quad (1)$$

где z – время, прошедшее с момента нарушения нормального теплового режима, ч;

t_B – температура внутреннего воздуха к моменту нарушения нормального теплового режима, °C;

t'_B, t'_H – температуры внутреннего и наружного воздуха, измеряемые в момент времени z , °C.

В результате расчета был получен диапазон значений от 200 до 2800 часов, среднее значение за рассмотренный период – 800 часов.

В [4] был рассмотрен расчет теоретического коэффициента тепловой аккумуляции здания (жилого здания массовой застройки). В данной работе использован аналогичный способ определения коэффициента тепловой аккумуляции здания библиотеки.

Для определения численного значения теоретического коэффициента тепловой аккумуляции необходимо определить полные теплоемкости всех ограждений, которые обращены в помещение, и отопительных приборов, трансмиссионные тепловые потери и потери за счет инфильтрации. Результаты расчетов сведены в табл. 4.

Теоретическое значение коэффициента тепловой аккумуляции в результате расчета с использованием данных из табл. 4 составило 63 часа.

На основании полученного теоретического значения коэффициента тепловой аккумуляции можно построить график изменения температуры внутреннего воздуха. На рис. 3 на основании зависимостей из [3] построены графики изменения температуры внутреннего воздуха по теоретическому коэффициенту тепловой аккумуляции ($\beta = 63$ ч) и по осредненному экспериментальному коэффициенту тепловой аккумуляции ($\beta = 800$ ч).

Таблица 4

Результаты расчета полных теплоемкостей и тепловых потерь

Наименование параметра	Значение
Полная теплоемкость наружных ограждающих конструкций, кДж/°C	$1,19 \cdot 10^5$
Полная теплоемкость внутренних стен (перегородок), кДж/°C	$1,46 \cdot 10^5$
Полная теплоемкость перфорированных стальных межэтажных перекрытий книгохранилищ, кДж/°C	$1,11 \cdot 10^4$
Полная теплоемкость межэтажных перекрытий остальных помещений, кДж/°C	$1,48 \cdot 10^5$
Полная теплоемкость колонн, кДж/°C	$1,44 \cdot 10^4$
Полная теплоемкость перекрытия второго и третьего этажей, кДж/°C	$3,33 \cdot 10^5$
Полная теплоемкость отопительных приборов (радиаторы MC-140), кДж/°C	$3,32 \cdot 10^3$
Расчетные тепловые потери, кВт	72,6

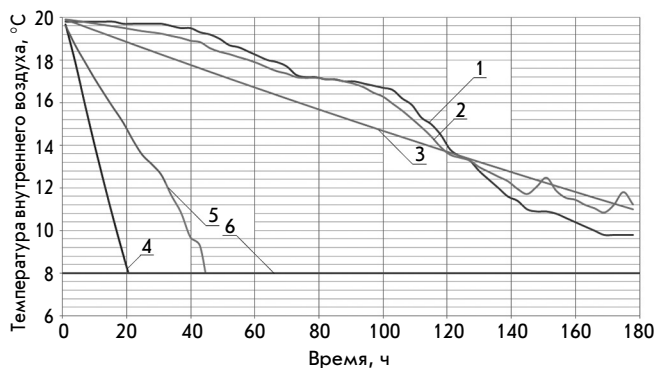


Рис. 3. Графики изменения температуры внутреннего воздуха во времени:

- 1 — результаты экспериментальных замеров температуры внутреннего воздуха;**
- 2 — изменение температуры внутреннего воздуха при $\beta_{\text{экс}} = 800$ ч и $t'_n = \text{var}$;**
- 3 — изменение температуры внутреннего воздуха при $\beta_{\text{экс}} = 800$ ч и $t'_n = -25$ °C;**
- 4 — изменение температуры внутреннего воздуха при $\beta_{\text{теор}} = 63$ ч и $t'_n = -25$ °C;**
- 5 — изменение температуры внутреннего воздуха при $\beta_{\text{теор}} = 63$ ч и $t'_n = \text{var}$;**
- 6 — минимально допустимая температура в отапливаемом помещении**

На рис. 3 линией 6 обозначена минимально допустимая температура воздуха в отапливаемом помещении, которая соответствует значению 8 °C. Снижение температуры внутреннего воздуха ниже этого значения грозит выходом из строя системы отопления, так как часть трубопроводов системы проложена в неотапливаемых помещениях (чердаках и т. д.). В неотапливаемых помещениях температура воздуха приближается в этом случае к нулю.

Кривые 2–4 на рис. 3 построены по формуле, которая описывает процесс охлаждения с учетом темпа охлаждения отопительного прибора [3]:

$$t'_b = t'_n + \left(\frac{t_b - t'_n}{1 - \beta \cdot m} \cdot e^{-z \cdot m} + \left((t_b - t'_n) - \frac{t_b - t'_n}{1 - \beta \cdot m} \right) \cdot e^{-\frac{z}{\beta}} \right), \quad (2)$$

где m — темп охлаждения отопительного прибора, ч⁻¹.

Значения темпа остывания наиболее распространенных отопительных приборов были определены ранее в работе [4].

Кривые 3 и 4 на рис. 3 построены при температуре наружного воздуха -25 °C, которая используется при проектировании системы отопления (температура воздуха наиболее холодной пятидневки с обеспеченностью 0,92).

Кривые 2 и 5 на рис. 3 построены при температурах наружного воздуха, которые были определены в момент времени z .

Время остывания помещения до температуры 8 °C при $\beta_{\text{теор}} = 63$ ч и $t'_n = -25$ °C составляет 20 ч, а при $\beta_{\text{теор}} = 63$ ч и $t'_n = \text{var}$ — 44 ч соответственно. Температура 8 °C внутри помещения при эксперименте, расчетах при $\beta_{\text{экс}} = 800$ ч и $t'_n = -25$ °C и $t'_n = \text{var}$ не достигается за рассмотренный период времени, то есть 178 ч.

Анализ результатов экспериментального исследования и расчетов времени остывания помещения книгохранилища при различных исходных данных позволяет сделать вывод о том, что помещение остывает быстрее при меньшем значении коэффициента тепловой аккумуляции. На характер изменения температуры и время остывания помещения также оказывает влияние изменение температуры наружного воздуха.

Расхождение между полученными значениями коэффициента тепловой аккумуляции $\beta_{\text{экс}}$ и $\beta_{\text{теор}}$ объясняется неучетом в значении $\beta_{\text{теор}}$ наполнения помещения книгохранилища (книги, металлические стеллажи, инженерные системы, элементы декора).

В нормативных документах используется термин «коэффициент аккумуляции» применительно к помещению. В условиях части общественных и промышленных зданий данный термин с точки зрения авторов является неприменимым. В случае настоящего эксперимента коэффициент тепловой аккумуляции рассчитать для помещения, где были установлены логгеры данных, затруднительно из-за конструкции перекрытий. Перекрытия книгохранилища представляли собой перфорированные металлические листы для циркуляции воздуха между помещениями книгохранилищ различных этажей. Поэтому книгохранилище второго этажа представляло собой больший объем, чем принято при расчете. В условиях данного объекта целесообразно рассматривать коэффициент тепловой аккумуляции здания.

В настоящей работе были обработаны результаты экспериментальных исследований процесса остывания помещения книгохранилища библиотеки. На основании результатов экспериментальных исследований определен коэффициент тепловой аккумуляции $\beta_{\text{экс}}$. Также на основании технического паспорта здания, оценки мощности системы отопления определено теоретическое значение коэффициента тепловой аккумуляции $\beta_{\text{теор}}$. Значение $\beta_{\text{экс}}$ превышает $\beta_{\text{теор}}$ на порядок, так как при расчете $\beta_{\text{теор}}$ использовались только полные теплоемкости ограждающих конструкций, обращенных в помещение, и полные теплоемкости отопительных приборов с водой.

Сравнение двух полученных коэффициентов тепловой аккумуляции позволяет сделать вывод о том, что проведение натурных испытаний по определению теплоаккумулирующей способности в соответствии с п. 9.3.25 Правил технической эксплуатации тепловых энергоустановок может быть ограничено только определением свойств ограждающих конструкций. На основании определения свойств ограждающих конструкций (неразрушающий контроль качества тепловой защиты здания) можно определить теоретическое значение коэффициента тепловой аккумуляции. При эксплуатации здания, когда помещения будут заполнены

производственным оборудованием, мебелью и орг- ловой аккумуляции будет значительно выше, что и техникой, реальное значение коэффициента теп- подтверждено настоящим экспериментом.

Литература

1. Мирам А. О. Расширение области использования теплоаккумулирующей способности здания для покрытия пиковых расходов теплоты в системах горячего водоснабжения: дисс. ... канд. техн. наук: 05.23.03 / Московский инженерно-строительный институт им. В. В. Куйбышева, 1983.
2. Соколов Е. Я. Теплофикация и тепловые сети. – М.: МЭИ, 2001. – 472 с.
3. Бурцев В. В. Оптимизация теплоснабжения зданий с помощью систем автоматического регулирования: дисс. ... канд. техн. наук: 05.23.03 / Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет, 2007.
4. Горелов М. В., Горячева Е. М., Юркина М. Ю. Сравнение коэффициентов тепловой аккумуляции многоэтажных зданий / / Энергобезопасность и энергосбережение. – 2018. – № 3. – С. 16–20. <https://dx.doi.org/10.18635/2071-2219-2018-3-16-20>.

Experimental research of the cooling time in case of a building heat supply shutdown

M. V. Gorelov,
Moscow Power Engineering Institute, Russia, PhD

S. V. Guzhov,
Moscow Power Engineering Institute, Russia, PhD, associate professor

E. M. Goryacheva,
Moscow Power Engineering Institute, Russia, senior lecturer

M. Yu. Yurkina,
Moscow Power Engineering Institute, Russia, PhD

A heat accumulation factor is one of the basic parameters reflecting energy-efficiency of buildings. To study a public building heat accumulation factor in detail, we conducted experimental research as described in this paper. The value obtained by using our method was validated and compared with a calculated value. The difference between those two values has been analyzed. The graphical representation of indoor temperature changes in time has also been developed.

Keywords: *heat accumulation factor, thermal storage capacity, thermal protection of buildings, heat supply.*