



ТЕПЛОВАЯ ИНЕРЦИЯ ЗДАНИЙ: МЕТОДЫ РАСЧЕТА, ФАКТОРЫ ВЛИЯНИЯ И ПРАКТИЧЕСКАЯ ЗНАЧИМОСТЬ

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: тепловая инерция, микроклимат помещений, тепловой комфорт, энергоэффективность, энергопотребление зданий, нормирование теплового режима зданий, климатические условия

Г. П. Васильев, доктор техн. наук, профессор кафедры теплогазоснабжения и вентиляции Национального исследовательского Московского государственного строительного университета (НИУ МГСУ), главный научный сотрудник лаборатории «Инновационные технологии энергоэффективности» Научно-исследовательского института строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук (ФГБУ «НИИСФ РААСН»); **С. В. Саргсян**, канд. техн. наук, доцент, и. о. заведующего кафедрой «Теплогазоснабжение и вентиляция», директор НОЦ ТГВ, НИУ МГСУ; **В. А. Личман**, канд. физ.-мат. наук, начальник экспертно-методического отдела ГБУ «Мосстройразвитие», старший научный сотрудник ООО «ИЦ «ИНСОЛАР»»; **В. Ф. Горнов**, директор проектного отделения ОАО «ИНСОЛАР-ИНВЕСТ», заведующий лабораторией «Инновационные технологии энергоэффективности» ФГБУ «НИИСФ РААСН»»; **А. Н. Дмитриев**, доктор техн. наук, профессор кафедры «Управление проектами и программами Капитал Групп» Российского экономического университета им. Г. В. Плеханова; **М. В. Колесова**, заместитель генерального директора по устойчивому развитию ОАО «ИНСОЛАР-ИНВЕСТ», старший научный сотрудник лаборатории «Инновационные технологии энергоэффективности» ФГБУ «НИИСФ РААСН»»; **В. А. Лесков**, генеральный директор ООО «ИНСОЛАР-ЭНЕРГО», старший научный сотрудник лаборатории «Инновационные технологии энергоэффективности» ФГБУ «НИИСФ РААСН»»; **А. С. Стронгин**, канд. техн. наук, старший научный сотрудник, заведующий лабораторией ФГБУ «НИИСФ РААСН»»; **Е. В. Абрамова**, доктор техн. наук, главный научный сотрудник ФГБУ «НИИСФ РААСН»¹

Статья посвящена анализу методов определения тепловой инерции здания и направлена на достижение практической цели – обеспечение требований действующих нормативных документов в сфере безопасной эксплуатации зданий, а именно сохранение температуры воздуха внутри помещений в пределах нормы в ситуации аварийного прекращения подачи тепла в здание.

¹ Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Строительным конструкциям зданий, наряду с прочими их характеристиками, присуще такое свойство, как тепловая инерция, то есть способность объекта сохранять тепло и задерживать его передачу в окружающую среду, определяющее скорость, с которой температура объекта выравнивается температурой окружения. Одним из первых в истории отечественного строительства эту характеристику применительно к ограждающим конструкциям зданий применил К. Ф. Фокин в своей работе [1], вышедшей в 1933 году.

В настоящее время тема использования тепловой инерции в строительстве переживает новую волну интереса. В связи с растущим количеством и увеличивающимся разнообразием вариантов применения возобновляемых источников энергии, а также переходом к устойчивым решениям в области энергоснабжения зданий возрастает и потребность в решениях по накоплению, сохранению и использованию тепла в зданиях. Одним из путей удовлетворения данной потребности и является использование для целей накопления тепла самих строительных конструкций зданий.

Обзор действующей нормативно-правовой базы

Правовую основу нормирования теплового комфорта и энергопотребления зданий в РФ составляют федеральные законы и технические регламенты. Базовыми документами являются федеральные законы № 384-ФЗ² и № 261-ФЗ³, которые создали предпосылки для обновления строительных норм и стандартов в части повышения теплозащиты зданий и учета тепловой инерции как фактора снижения энергопотребления.

В Российской Федерации тепловая инерция зданий регламентируется СП 50.13330⁴, согласно которому тепловую инерцию конструкции следует определять по формуле (1) (см. Формулы). Тепловая инерция строительной конструкции проявляется в ситуации, когда происходит изменение температуры как минимум на одной из ее поверхностей. При этом коэффициент теплоусвоения s дает представление о потенциале конструкции поглощать тепло при возникновении описанной ситуации. Рассчитывается он по формуле (2).

Отечественная нормативная база предъявляет строгие требования к теплоизоляции зданий и предусматривает учет тепловой инерции на стадии проектирования. Ключевые документы СП 50.13330 и ГОСТ 30494⁵ обеспечивают достижение двух взаимосвязанных целей: минимизации теплопотерь (через нормирование сопротивления теплопередаче) и поддержания температурного режима внутри помещений (через установление разрешенного диапазона температур).

В практическом плане тепловая инерция оказывается чрезвычайно важна при расчете остывания помещений здания, например при возникновении аварийных ситуаций в системах отопления. Отечественные нормативы в такой ситуации не допускают понижения температуры воздуха

Формулы

Номер формулы	Формула
(1)	$D = \sum R_i \cdot S_i$
(2)	$s = \sqrt{\lambda \cdot c \cdot \rho \cdot \frac{2\pi}{Z}}$
(3)	$t_B(\tau) = t_H + (t_B^0 - t_H) \cdot \exp\left(-\frac{\tau}{\beta}\right)$
(4)	$\beta = C_{1/2\text{HC}} \cdot R$
(5)	$C_{1/2\text{HC}} = \frac{\delta_i}{2} \cdot \frac{c \cdot \rho \cdot A}{3600}$
(6)	$\beta = \frac{k_T \cdot \sum \delta_i \cdot c_i \cdot \rho_i \cdot S_i / 2}{3,6 \cdot [\sum k_i \cdot S_i + L(c_{\text{BВЗ}} \cdot \rho_{\text{BВЗ}})]}$
(7)	$t_B(\tau) = t_H + \frac{Q_o}{k_{\text{НОК}} \cdot S_{\text{НОК}}} + (t_B^0 - t_H - \frac{Q_o}{k_{\text{НОК}} \cdot S_{\text{НОК}}}) \cdot \exp\left(-\frac{\tau}{\beta}\right)$
Обозначения в формулах	

D – тепловая инерция конструкции, безразмерная величина

$R_i = \frac{\delta_i}{\lambda_i}$ – термическое сопротивление i -го слоя, $\text{м}^2 \cdot \text{°C} / \text{Вт}$, где δ_i – толщина, м, а λ_i – теплопроводность, $\text{Вт} / (\text{м} \cdot \text{°C})$, i -го слоя

$t_B(\tau)$ – значение температуры в требуемый момент времени после отключения подачи тепла в здание или помещение, °C

S_i – коэффициент теплоусвоения i -го слоя, $\text{Вт} / (\text{м}^2 \cdot \text{°C})$

t_B^0 – температура внутреннего воздуха в момент отключения подачи тепла, °C

t_H – температура наружного воздуха, °C

τ – время, прошедшее с момента отключения подачи тепла, ч

β – коэффициент аккумуляции, ч

$R = \frac{1}{\sum k_i \cdot A_i}$ – сопротивление теплопередаче, $\text{°C} / \text{Вт}$

$C_{1/2\text{HC}}$ – теплоемкость внутреннего слоя наружной стены, $\text{Вт} \cdot \text{ч} / \text{°C}$

$c \cdot \rho$ – объемная теплоемкость, $\text{Дж} / (\text{м}^3 \cdot \text{°C})$

k_i, A_i – соответственно, коэффициент теплопередачи ($\text{Вт} / (\text{м}^2 \cdot \text{°C})$) и площадь (м^2) i -го вида ограждающих конструкций (стен, окон, покрытий, перекрытий дверей и др.)

$A = \sum A_j$ – сумма площадей ограждающих конструкций, м^2

k_T – коэффициент, учитывающий способ обогрева

$\delta_i, c_i, \rho_i, S_i$ – соответственно, толщина, м; удельная массовая теплоемкость, $\text{кДж} / (\text{кг} \cdot \text{°C})$; плотность, $\text{кг} / \text{м}^3$; и площадь, м^2 , i -го ограждения помещения

L – расход инфильтрационного воздуха, $\text{м}^3 / \text{ч}$

$c_{\text{BВЗ}}, \rho_{\text{BВЗ}}$ – удельная массовая теплоемкость, $\text{кДж} / (\text{кг} \cdot \text{°C})$, и плотность инфильтрационного воздуха, $\text{кг} / \text{м}^3$

Q_o – количество энергии, которое расходуется на нагрев внутренних ограждающих конструкций, элементов интерьера, мебели, инженерного оборудования и компенсацию теплопотерь через наружные ограждающие конструкции (НОК), Вт

$k_{\text{НОК}}, S_{\text{НОК}}$ – коэффициент теплопередачи, $\text{Вт} / (\text{м}^2 \cdot \text{°C})$, и площадь поверхности, м^2 , наружных ограждающих конструкций

в помещении в течение регламентированного времени, отведенного на устранение аварии, ниже определенного минимального уровня. Данное требование содержится в нескольких действующих документах, но сформулировано в них по-разному, и числовые значения в них также разнятся:

² Федеральный закон от 30 декабря 2009 года № 384-ФЗ «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений».

³ Федеральный закон от 23 ноября 2009 года № 261-ФЗ «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации».

⁴ СП 50.13330.2024 «Тепловая защита зданий».

⁵ ГОСТ 30494–2011 «Здания жилые и общественные. Параметры микроклимата в помещениях».

• в соответствии с постановлением Правительства РФ № 354⁶ требуется, чтобы температура воздуха в жилых помещениях в течение 16 ч с момента прекращения подачи тепла не опускалась от нормативной ниже 12 °С;

• в СП 124.13330⁷ для потребителей теплоты второй категории по надежности теплоснабжения (допускающих снижение температуры в отапливаемых помещениях на период ликвидации аварии), к которым отнесены жилые и общественные здания, разрешается понижение температуры до тех же 12 °С, но время ликвидации аварии установлено значительно большее – до 54 ч;

• СП 60.13330⁸ устанавливает более высокие требования для жилых помещений, в которых не допускается снижение температуры воздуха ниже 15 °С;

• СП 253.1325800⁹ содержит комбинацию наиболее строгих требований, и помимо ограничения минимальной температуры внутреннего воздуха величиной 15 °С допускает понижение температуры воздуха до указанного значения в течение не более 54 ч.

Важно упомянуть, что, согласно СП 253.1325800, при отсутствии в высотном здании потребителей первой категории возможна организация теплоснабжения без резервного ввода тепловых сетей. Получается, что у девелопера может появиться механизм оптимизации затрат на строительство за счет выбора из вариантов конструкции здания с меньшей тепловой инерцией, но с организацией резервного ввода тепловой сети, и варианта с повышенной тепловой инерцией и отказом от устройства резервного ввода.



Методы расчета

При проведении практических вычислений для определения значения температуры $t_b(\tau)$ в требуемый момент времени после отключения подачи тепла в здание или помещение наиболее часто пользуются формулой (3), предложенной Е. Я. Соколовым в работе [2], и зависимостью В. Н. Богословского в [3], в которой вместо коэффициента β используется темп охлаждения $\alpha = 1/\beta$. То есть коэффициент аккумуляции β (см. формулу (4)) и темп охлаждения α взаимосвязаны и характеризуют, хотя и с очевидными отличиями, тепловую инерционность. Теплоемкость $C_{1/2,н.с.}$ определяется половиной толщины δ , м, внутреннего слоя наружной стены – по формуле (5) [3].

Ю. В. Кононович в [4] предлагает помимо рассмотрения внешних ограждений при расчете коэффициента аккумуляции учитывать также и наличие внутренних стен, перекрытий и перегородок. Кроме того, в его расчете учитывается поступление воздуха через неплотности окон и за счет воздухопроницаемости наружных ограждений (см. формулу (6)).

Влияние количества инфильтрующегося в здание воздуха рассматривалось О. Д. Самариным в [5, 6]. Показано, что при снижении внутренней температуры уменьшается перепад давлений снаружи и внутри здания, за счет чего сокращается количество попадающего с улицы в здание воздуха. В результате такого сокращения притока холодного воздуха падение внутренней температуры происходит менее интенсивно.

Авторами [7, 8] разработана методика расчета остывания высотного здания с высокой степенью остекленности, которое определяется по формуле (7). Данный подход отличается от ранее рассмотренных учетом сохраняющихся в здании источников тепла даже в аварийной ситуации. В качестве таких источников могут помимо системы отопления также рассматриваться люди, находящиеся в здании, работающее оборудование, резервные источники тепла. Источники могут быть и внешними, такими как солнечная радиация, проникающая в помещения через светопрозрачные наружные ограждения и способствующая сохранению внутренней температуры.

Фактор влияния теплоаккумулирующей способности внутренних конструкций, отделки, мебели и т. д. на тепловую инерцию зданий также имеет не последнее значение. В [9] рассматривается влияние внутренней тепловой массы (это произведение массы объекта на его теплоемкость) на тепловую инерцию. Согласно выводам авторов, внутренняя масса может составлять до 40 % от общей эффективной теплоемкости здания, особенно в легких конструкциях.

Инерционные свойства крупных зданий обычно выше, чем у малых, поскольку абсолютная масса больше. Заметно и влияние остекления, поскольку солнечные лучи, проходящие через окна, нагревают внутренние поверхности. На инерцию зданий влияет даже тип системы отопления: при теплых полах эффект тепловой инерции проявляется сильнее.

⁶ Постановление Правительства РФ от 6 мая 2011 года № 354 «О предоставлении коммунальных услуг собственникам и пользователям помещений в многоквартирных домах и жилых домов».

⁷ СП 124.13330.2012 «Тепловые сети».

⁸ СП 60.13330.2020 «Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха».

⁹ СП 253.1325800.2016 «Инженерные системы высотных зданий».

Выводы

Влияние таких факторов, как внутреннее наполнение (мебель, отделка), резервные источники тепла, вентиляция, остекление, может быть весьма существенным, но не находит отражения в нормативных способах определения тепловой инерции.

В практическом плане тепловая инерция влияет на выполнение нормативных требований безопасности, а именно на поддержание регламентированного уровня температур внутри отапливаемых помещений в периоды внезапного прекращения подачи тепла, вызванного, в частности, авариями на источниках и сетях теплоснабжения.

Для повышения степени инерционности наружных ограждений в целях поддержания температуры на требуемом уровне при перерывах в подаче тепла наиболее теплоинерционные материалы целесообразно размещать со стороны помещения.

При помощи управления параметрами тепловой инерции возможно оптимизировать технико-экономические показатели строительного проекта: в частности, в некоторых случаях отказаться от организации резервного ввода тепловой сети в высотное здание.

В настоящее время отсутствует утвержденная методика оценки тепловой инерции зданий, позволявшая бы проводить соответствующие расчеты и служившая бы достаточным основанием для подтверждения обоснованности принятых технических и проектных решений, в том числе и в органах экспертизы.

Литература

1. Фокин К. Ф. Строительная теплотехника ограждающих частей зданий. М.: Госстройиздат, 1933.
2. Соколов Е. Я. Теплофикация и тепловые сети: учебник для вузов. М.: МЭИ, 2001.
3. Богословский В. Н., Сканава А. Н. Отопление. М.: Стройиздат, 1991.
4. Кононович Ю. В. Тепловой режим зданий массовой застройки. М.: Стройиздат, 1986.
5. Самарин О. Д. Расчет остывания помещений здания в аварийных режимах при переменной температуре наружного воздуха // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. № 1. С. 77–83.
6. Самарин О. Д. Расчет остывания помещений здания в аварийных режимах для обеспечения надежности их теплоснабжения // Вестник МГСУ. 2019. Т. 14. № 4. С. 496–501.
7. Gorshkov, R., Nemova, D., Andreeva, D., Cherkashin, A. Thermal balance of the high-rise building with translucent modular glazing // Construction of Unique Buildings and Structures. 2023. 109. Article No 10905.
8. Н. В. Варламов, А. С. Горшков, Ю. В. Юферев и др. Теплоаккумулирующая способность здания башни многофункционального комплекса «Лахта центр» // Теплоэнергетика. 2023. № 1. С. 40–49.
9. Johra, Hicham, Heiselberg, Per. Influence of internal thermal mass on the indoor thermal dynamics and integration of phase change materials in furniture for building energy storage: A review // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2017. № 69. ■

СТАНДАРТ АВОК

РЕКОМЕНДАЦИИ АВОК

«СИСТЕМЫ И СРЕДСТВА ИНДИВИДУАЛЬНОГО УЧЕТА ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ. МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЛИЧЕСТВА ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ, ПОДЛЕЖАЩЕЙ ОПЛАТЕ ИНДИВИДУАЛЬНЫМИ ПОТРЕБИТЕЛЯМИ В ЖИЛЫХ МНОГOKВАРТИРНЫХ ДОМАХ»



Данные рекомендации АВОК содержат:

- уточненную методику определения объемов (количества) тепловой энергии, подлежащих оплате по данным средств (совокупности средств) индивидуального учета. Данная методика актуализирована по сравнению с действующей методикой, утвержденной Постановлением Правительства РФ от 6 мая 2011 года № 354 «О предоставлении коммунальных услуг собственникам и пользователям помещений в многоквартирных домах и жилых домов. Правила предоставления коммунальных услуг собственникам и пользователям помещений в многоквартирных домах и жилых домов»;
- разъяснения соответствующих требований СП 60.13330.2020 «СНиП 41-01–2003. Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха».

Методика обеспечивает объективную расчетную базу для справедливого начисления платы за отопление потребителям внутри многоквартирного дома, в котором установлены системы и средства индивидуального учета.

В рекомендациях также приведены описания систем и компонентов визуального и автоматизированного дистанционного сбора и передачи данных, а также сведения, касающиеся диспетчеризации и удаленного мониторинга отдельных узлов и систем учета тепловой энергии.

Приобрести или заказать рекомендации
можно на сайте abokbook.ru
или по электронной почте s.mironova@abok.ru