

## Исследование тепловой инерционности ограждающих конструкций

*М.А. Разаков, Р.В. Разакова*

*Московский Энергетический Институт, Москва*

**Аннотация:** В работе рассмотрены тепловые инерционные свойства некоторых ограждающих конструкций зданий и сооружения (преимущественно гражданского назначения) с учетом изменения материалов внутреннего облицовочного слоя. Подробно описаны теплофизические характеристики 6 видов строительных облицовочных материалов. Определена радиационная температура внутренней поверхности ограждающей конструкции с учетом изменения материала облицовочного слоя после 225 часов охлаждения и начальной температуре равной  $+23\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Определено время охлаждения внутренней части ограждающей конструкции до температуры, равной  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ , при различных видах внутреннего облицовочного слоя ограждающей конструкции. Численный эксперимент выполнен с помощью современного программного комплекса "Stf". Моделирование процесса в программе реализовано с помощью метода конечных разностей с постоянными коэффициентами теплоотдачи. Рассмотрены новые результаты, которые были определены в ходе исследования и реализации математической модели нестационарного охлаждения элементов. Работа будет интересна для исследователей тепловых явлений в ограждающих конструкциях и проектировщиков инженерных систем поддержания микроклимата в зданиях и сооружениях.

**Ключевые слова:** Температура воздуха, радиационная температура, стационарный режим, нестационарный режим, ограждающая конструкция, аварийный режим, тепловая инерция, внутренняя облицовка, программный комплекс, строительные материалы.

Комфортность человека в здании зависит от многих факторов и подразделяется на следующие виды: эмоциональная комфортность, психологически комфортность, световая комфортность, влажностная комфортность, воздушная комфортность и тепловая комфортность [1-3]. В каждом виде зданий и сооружений в зависимости от его назначения к данным показателям предъявляются разные требования [1,4]. Для «Северных» стран особенно актуальным является обеспечение тепловой

комфортности, так как без данного условия невозможно соблюдать остальные показатели.

Современный человек всегда пытается улучшить место своего время проведения. Главным местом, где человек хочет иметь максимальную комфортность, является его жилой дом или квартира. Поэтому именно в данном здании он прикладывает максимальное усилие к повышению своего личного комфорта. Данный процесс начинается уже с момента выбора жилья и заканчивается внутренним расположением объектов интерьера. Но человек может менять свои предпочтения в течение своей жизни и поэтому полностью изменить своё жилое пространство. Одним из кардинальных решений является изменение стиля помещения посредством перепланировки или изменения облицовочного слоя ограждающих конструкций. Данные материалы могут иметь различную структуру. Сегодня наибольшее распространение получили многокомпонентные органические материалы [5,6]. В данной работе проанализированы изменения различных показателей, характеризующих тепловой комфорт в помещении при изменении материалов внутреннего облицовочного слоя наружного ограждения и различных режимах работы системы поддержания теплового микроклимата.

## **Материалы и методы**

Главными показателями, которые характеризуют тепловой комфорт в помещении, являются температура внутреннего воздуха и радиационная температура. Обычно они считаются основными и единственными. В работах П.О. Фангера и В.Н. Богословского данные показатели были определены статистическим и эмпирическим путем [7,8]. Эти показатели главные лишь при обычных условиях работы инженерных систем, поддерживающих тепловой комфорт. При аварийных режимах работы, т.е. при снижении

---

подачи теплоносителя в систему отопления или при полном её отключении, данные показатели дополняются следующими показателями: массивность ограждающей конструкции и периодом остывания ограждения до определенной температуры. Последний показатель характеризуется тепловыми потерями или временем процесса теплообмена.

Процесс конвективного теплообмена между воздухом внутри здания и уличным воздухом через ограждающую конструкцию может описываться общей формулой теплопередачи Фурье-Ньютона-Рихмана (1) [8]:

$$Q = \frac{\delta t \cdot \delta F \cdot \delta \tau}{\frac{(\alpha_{л1} + \alpha_{к1}) \cdot \delta F + \sum_{i=1}^n \frac{\delta x_i}{\lambda_i}}{(\alpha_{л1} + \alpha_{к1}) + (\alpha_{л2} + \alpha_{к2})}}, \text{ J}, \quad (1)$$

где:  $\delta t$  – температурный напор, °С;  $\delta F$  – площадь теплообмена, м<sup>2</sup>;  $\delta \tau$  – время процесса теплообмена, час;  $\alpha_{лn}$  – коэффициент лучистой теплоотдачи n-ой поверхности, Вт/м<sup>2</sup> °С;  $\alpha_{кn}$  – коэффициент конвективной теплоотдачи n-ой поверхности, Вт/м<sup>2</sup> °С;  $\delta x_i$  – толщина i – слоя многослойной стенки, м;  $\lambda_i$  – теплопроводность i – слоя многослойной стенки, Вт / м К.

В данной работе данные показатели были приняты на основании эмпирических данных, которые используются при проектировании систем отопления в Российской Федерации. Теплофизические характеристики различных материалов внутреннего облицовочного слоя и иных конструктивных элементов были приняты по СП 50.13330.2012 «Тепловая защита зданий» и данным И. Левицкого и Е. Дятловой [10].

Для описания конвективной составляющей теплообмена можно воспользоваться эмпирическими данными В.Н. Богословского или теорией подобия. Для описания лучистой составляющей теплообмена необходимо использование формулы Стефана-Больцмана (2) [8,9]:

$$\alpha_{лi} = \frac{Q_{лi}}{t_{пов.1} - t_{пов.2}} = \frac{1}{[(1/\varepsilon_1) + (1/\varepsilon_2) - 1]} \cdot \varphi \cdot \varphi_0 \cdot \varphi \left[ \left( \frac{T_{пов.1}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{пов.2}}{100} \right)^4 \right] \quad (2)$$

где:  $t_{пов.1}$  - температура теплообменной поверхности №1, °С;  $t_{пов.2}$  - температура теплообменной поверхности №2, °С;  $\varepsilon_1$  - степень черноты серого тела №1;  $\varepsilon_2$  - степень черноты серого тела №2;  $C_0$  - коэффициент излучения абсолютного черного тела, Вт/м<sup>2</sup> К<sup>4</sup>;  $\varphi$  - коэффициент облученности одного тела другим телом;

В таблице 1 представлены характеристики рассматриваемых ограждающих конструкций.

Таблица №1

Принятые характеристики элементов конструкции

Тип слоя	Принятое значение теплопроводности $\lambda_i$ слоя многослойной стенки, Вт / м К ( $\lambda_i$ )	Толщина $i$ слоя многослойной стенки, м ( $\delta x_i$ )
Внутренняя штукатурка (слой А)	0,93	0,02
Железобетон (слой В)	2,04	0,2
Утеплитель (слой С)	0,076	0,12
Наружная штукатурка (слой D)	0,93	0,02
Керамическая плитка (слой E)	0,9	0,01

В качестве базовой конструкции принято наружное ограждение без внутреннего облицовочного слоя. На рисунке 1 представлена данная конструкция.

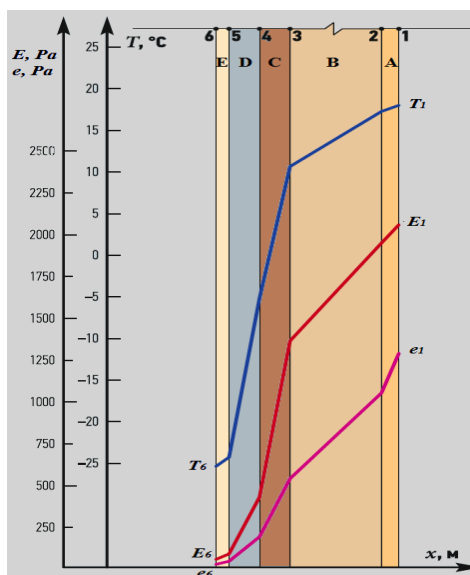


Рис. 1. - Базовая конструкция

А- Слой внутренней штукатурки; В – Железобетонная панель; С – Слой утеплителя; D – Наружный слой штукатурки; E – Наружный облицовочный слой

В таблице 2 представлены материалы и их теплофизические характеристики, которые будут смонтированы на ограждающую конструкцию с внутренней стороны. Данные характеристики будут использованы для моделирования времени остывания внутренней поверхности до 0 °С.

Таблица №2

Принятые характеристики элементов конструкции

Тип слоя	Принятое значение теплопроводности $i$ слоя многослойной стенки, Вт / м К ( $\lambda_i$ )	Толщина $i$ слоя многослойной стенки, м ( $\delta x_i$ )
Гранитная плитка	3,49	0,03
Мрамор	2,91	0,03
Керамическая плитка	0,9	0,01
Сосна или ель	0,35	0,02
Облицовочный картон или стеновые обои	0,23	0,01
Известково-песчаный раствор	0,81	0,02

Для численного моделирования теоретического процесса нестационарного охлаждения наружной стены при полном отключении системы отопления был использован программный комплекс, разработанный в НИУ МГСУ Е.Г. Малявиной и другими авторами [8]. В данном программном комплексе реализован метод конечных разностей с постоянными коэффициентами теплоотдачи. В реальных условиях коэффициент конвективной теплоотдачи является непостоянной величиной. Согласно работам В.Н. Богословского данный показатель определялся экспериментально с помощью изменения скорости наружного воздуха [8]. Снижение коэффициента наружной теплоотдачи влечет за собой снижение тепловых потерь здания. В современной архитектуре данный способ снижения тепловых потерь реализован в Санкт-Петербурге в крытых дворах.

Расчет радиационной температуры ограждения проводится при стационарном режиме с помощью уравнений (1), (2) [8]:

$$t_{\text{ног.1}} = t_{\text{мс}} + \frac{q \times \delta F}{\alpha_{\text{л1}} + \alpha_{\text{к1}}} \quad (3)$$

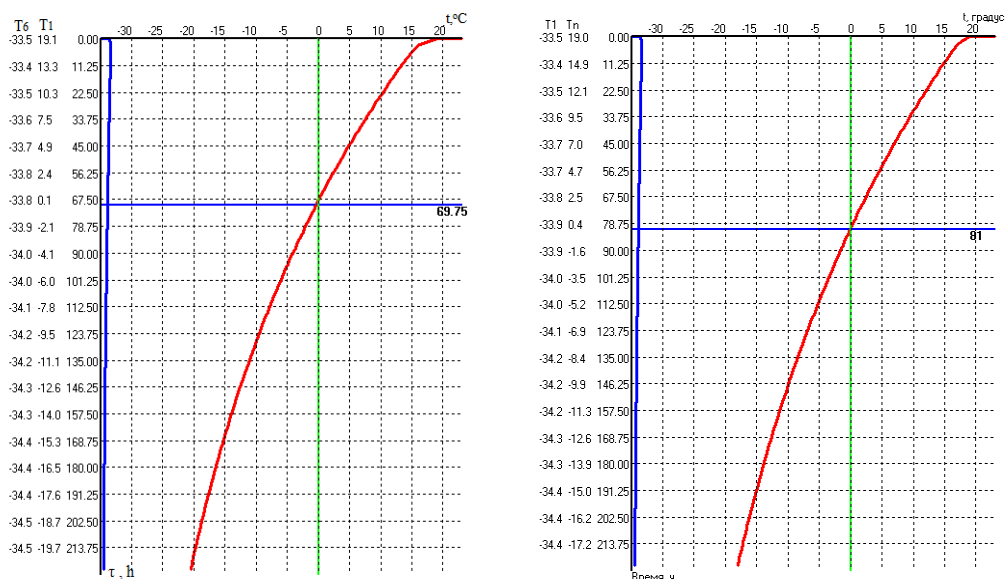
где:  $t_{\text{вн}}$  – средняя внутренняя температура воздуха, °С;

$q$  – тепловой поток через ограждающую конструкцию, Вт/м<sup>2</sup>;

Данная радиационная температура будет характеризовать температуру ограждающей конструкции с определенным видом внутреннего облицовочного слоя перед отключением системы отопления.

### Результаты

На рисунках 2 и 3 представлено время, за которое внутренняя поверхность ограждающей конструкции площадью 1 м<sup>2</sup> охладится до 0 °С с 23 °С. Данная температура была принята, потому что в помещении возможен монтаж трубопровода системы холодного водоснабжения, в котором при принятой температуре, возможно образование льда. Температура наружного воздуха принята равной -35 °С. Для учета дополнительных потерь теплоты, коэффициент теплотехнической неоднородности принят равным 0,87. Коэффициенты теплоотдачи были приняты равными 8,7 и 23 Вт / м<sup>2</sup> К. Количество точек при реализации конечно-разностного метода расчета 100 штук. В таблице 3 представлены результаты численного эксперимента.



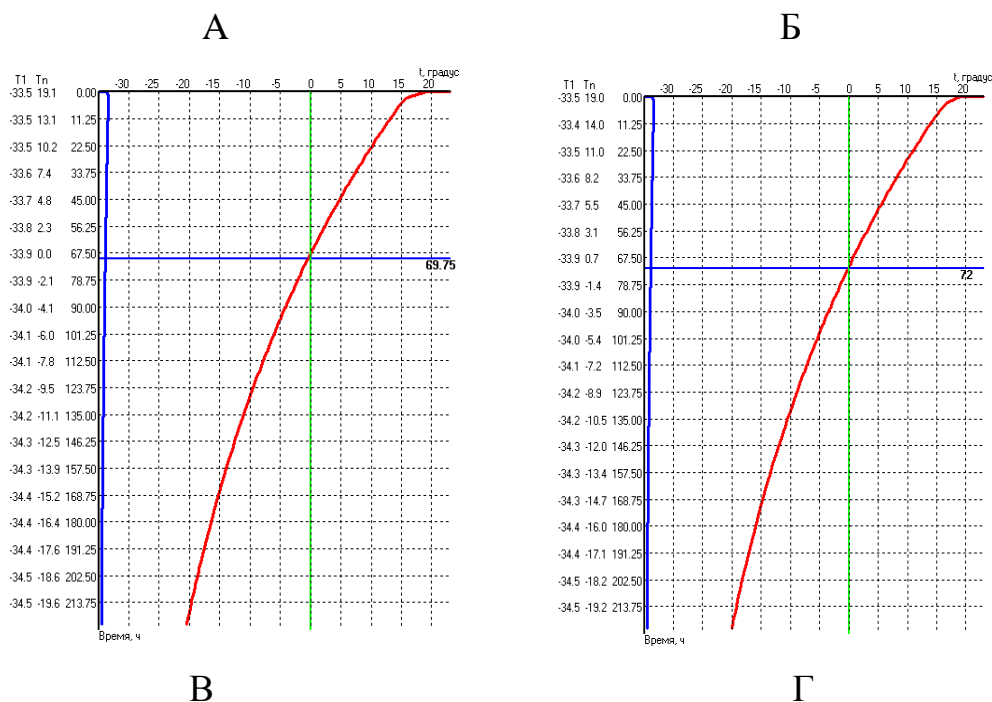


Рис. 2. - Время охлаждения ограждающих конструкций с различными внутренними облицовочными слоями

А- Базовая конструкция, а также конструкции с облицовочным картоном или стеновыми обоями; Б – конструкция с гранитным или мраморным внутренними облицовочными материалами; В – конструкция с деревянным (сосна или ель); Г – конструкция с керамической плиткой или известково-песчаным материалом

В таблице 3 представлены результаты определения времени охлаждения ограждающих конструкций с различными внутренними облицовочными слоями до 0 °С ( $\tau$ ), температуры поверхности ограждения с принятым внутренним облицовочным слоем после 225 часов и отключенной системой отопления ( $T_{225i}$ ), а также проведено сравнение данных показателей с базовой конструкцией.

Таблица №3

Результаты численного эксперимента

Тип слоя	$\tau$ , ч	$T_{225i}$ , °С	$\tau_i / \tau_{bas}$	$T_{225i} / T_{225.bas}$
Базовая конструкция без облицовочного материала	69,75	-21	1	1

---

---

Гранитная плитка	81	-18	1,16	0,86
Мрамор	81	-18	1,16	0,86
Керамическая плитка	72	-20,5	1,03	0,98
Сосна и ель поперек волокон	69,75	-21	1	1
Облицовочный картон	69,75	-21	1	1
Известково-песчаный раствор	72	-20	1,03	0,95

### **Заключение**

Помещения с гранитными и мраморными облицовочными материалами ограждающих конструкций менее теплоинерционны в сравнении с остальными видами рассматриваемых конструкций. Максимальное время охлаждения поверхности облицовочного слоя до 0 °С для рассматриваемых видов конструкций при температуре наружного воздуха равной -35 °С составляет 81 час. При использовании деревянных отделочных материалов характерна низкая температура слоя после 225 часов как при случаи с облицовочным картоном и базовой конструкцией. Данное явление связано с незначительными отличительными характеристиками теплофизических свойств деревянных конструкций и толщиной применяемого изделия. Керамическая плитка и известково-песчаный раствор также снижают инерционность конструкции на 3 %.

### **Литература**

1. Prohorov V., Gyuric V., Banihidi L., Kokorin O., Sztavickij L. Thermal comfort test of the energy-saving winter and summer application or air-conditioning convectors in offices // Bulletin. Sanitary engineering, environmental, protection, energy-policy. Vol. 65. ETI. pp. 1-31.
2. Nevins R. Thermal comfort and drafts // Journal de Psychologie. 1971. Т. 63. №3. С. 356-358.





3. Muraviova N., Soloviev A., Stetsky S. Comfort light environment under natural and combined lighting method of their characteristics definition with subjective expert // *Light & Engineering*. 2018. Т. 26. № 3. С. 124-131.

4. Стронгин А.С. Требования к система жизнеобеспечения зданий в северной строительно-климатической зоне // *АВОК: Вентиляция, отопления, кондиционирования воздуха, теплоснабжение и строительная теплофизика*. 2024. №3. С. 32-39.

5. Кудрявцев Г.П., Фиговский О.Л. Нанокompозитные органоминеральные гибридные материалы // *Инженерный вестник Дона*. 2014. №2. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2014/2476](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2014/2476)

6. Korol E., Shushunova N. Innovative modular greening system for modern buildings // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Т. 1030. №1. С. 012062. doi: 10.1088/1757-899X/1030/1/012062

7. Fanger P.O. *Thermal Comfort: Analysis and Applications in Environmental Engineering*. MC Grow Hill, 1970. 244 с.

8. Рюриков Т., Разаков М. Исследование нестационарной теплопередачи ограждающей конструкции жилого дома после применения энергосберегающих мероприятий // *Сборник докладов VIII Всероссийской научно-технической конференции «Теоретические основы теплогазоснабжения и вентиляции»*. М.: Изд-во НИУ МГСУ, 2020. С. 98 – 102.

9. Саламатин И.А., Логойда Т.И., Скорик Т.А., Пирожникова А.П. Математическое моделирование теплового режима помещений // *Инженерный вестник Дона*. 2022. №1. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2022/7381](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2022/7381)

10. Левицкий И., Дятлова Е. Использование гальванических шламов для изготовления керамических фасадных плиток // *Стекло и керамика*. 1992. № 11-12. С. 9-11.

---

## References

1. Prohorov V., Gyuric V., Banhidi L., Kokorin O., Sztavickij L. Bulletin. Sanitary engineering, environmental, protection, energy-policy. Vol. 65. ETI. pp. 1-31.
2. Nevins R. Journal de Psychologie. 1971. V. 63. №3. pp. 356-358.
3. Muraviova N., Soloviev A., Stetsky S. Light & Engineering. 2018. V. 26. №3. pp. 124-131.
4. Strongin A.S. AVOK: Ventilyatsiya, otopleniya, konditsionirovaniya vozdukhа, teplosnabzheniye i stroitel'naya teplofizika. №3. 2024. pp. 32-39.
5. Kudryavtsev P.G., Figovsky O.L. Inzhenernyj vestnik Dona. 2014. №1. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2014/2476](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2014/2476)
6. Korol E., Shushunova N. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 1030(1). P. 012062. doi: 10.1088/1757-899X/1030/1/012062
7. Fanger P.O. Thermal Comfort: Analysis and Applications in Environmental Engineering. MC Grow Hill, 1970. 244 p.
8. Ryurikov T., Razakov M. Teoreticheskie osnovi teplogazosnabgeniya i ventilyatsii. Sbornik dokladov VIII Vserossiyskoj nauchno-tehnicheskoy konferencii. 2020. pp. 98 – 102.
9. Salamatin I.A., Logoida T.I., Skorik T.A., Pirozhnikova A.P. Inzhenernyj vestnik Dona. 2022. №1. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2022/7381](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2022/7381)
10. Levickiy I., Dyatlova E. Steklo i keramika. 1992. №11-12. pp. 9-11.

**Дата поступления: 2.07.2024**

**Дата публикации: 16.08.2024**