

## Моделирование процесса нагрева стены при пожаре

*Я.А. Алексеевская, А.П. Суворов*

*Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Москва*

**Аннотация:** В статье рассматривается задача нагрева стены в связи с возникновением источника пожара. На поверхности стены рассматриваются условия конвективного теплообмена с окружающей средой. При известной температуре возгорания древесины найдено время, которое требуется для достижения этой температуры поверхностью стены, и таким образом, оценивается сопротивление к возгоранию. Задача решается для однородной стены, выполненной из одного материала, а также для неоднородной стены, в которой за тонким слоем древесины следует толстый теплоизоляционный слой. Задача решается аналитическим способом, а также методом конечных элементов. Также рассматривается решение задачи методом конечных разностей. В результате исследования данной задачи получена приближенная простая формула для зависимости температуры на поверхности стены от времени для любых характеристик материалов. Также получена приближенная формула для оценки толщины приграничной зоны, в которой температура имеет повышенное по сравнению с начальной температурой значение.

**Ключевые слова:** древесина, теплоизоляционный слой, температура возгорания, конвекция, метод конечных элементов, метод конечных разностей, задача теплопроводности

### Введение

В данной статье рассматривается задача теплопроводности для стены, выполненной из древесины. Рядом со стеной находится источник возгорания при повышенной и фиксированной температуре. Решается задача нестационарной теплопроводности для стены при условии, что на поверхности стены задано условие конвективного теплообмена с нагретым газом (воздухом). В первой задаче стенка считается однородной, выполненной из одного материала – древесины твердых пород, во второй задаче стена композитная: она выполнена из тонкого наружного слоя древесины и толстого слоя теплоизоляции, следующего за наружным слоем. При заданной температуре возгорания древесины находится время, необходимое для достижения этой температуры поверхностью стены.

Аналитическое решение задачи нестационарной теплопроводности для полубесконечного тела представлено в [1–3]. В работе [4] приведен и вывод

этого решения. В статье [5] рассматривается решение задачи теплопроводности для неоднородного тела, являющееся аналитическим по времени, но численным по пространственной координате. Ниже отметим отдельно те работы, которые посвящены решению задачи теплопроводности при существовании очага пожара.

Одним из параметров, который характеризует строительную конструкцию по степени сопротивлению пожару, является предел огнестойкости. Предел огнестойкости определяется как время в минутах после начала пожара, которое соответствует потере несущей способности конструкции (она разрушается) или нарушению ее целостности (в конструкции возникают трещины, через которые огонь может распространяться далее). Самый низкий предел огнестойкости для ненесущих стен равен 15 мин. Отметим, что свойство огнестойкости конструкции не следует путать с сопротивлением к возгоранию или распространению пламени (невоспламеняемостью) [6], так как, например, сталь имеет низкую воспламеняемость и высокое сопротивление к возгоранию, однако она имеет низкий предел огнестойкости. Другой пример – это свойство невоспламеняемости минеральной ваты, отмеченное в [7]. В настоящей статье мы оцениваем именно сопротивление к возгоранию или невоспламеняемость для древесины.

В условиях реального пожара температура очага пожара возрастает до высоких значений не сразу, а постепенно. При проведении стандартных тестов по определению предела огнестойкости конструкций этот факт учитывается. Например, Канадский совет по древесине (Canadian Wood Council) в своем сборнике «Fire Safety Design in Buildings» отмечает, что температура в испытательной печи должна расти примерно следующим образом: 538 °C после 5 мин от начала возгорания, 704 °C после 10 мин, 843 °C после 30 мин, 927 °C после 60 мин. В настоящей работе мы принимаем,

---

что температура в источнике пожара возрастает мгновенно до 800 °С, что конечно, понижает оценку по сопротивлению к возгоранию.

В работе [1] предлагается и другой тест для определения огнестойкости конструкции. На стенку определенной толщины подается тепловой поток, мощность которого  $q$  фиксирована и равна 10 кВт/м<sup>2</sup>. (Этот тепловой поток создается за счет радиации со стороны другого нагретого тела.) Измеряется время достижения поверхностью стены, обращенной к источнику, температуры, равной 325 °С, и время, необходимое для того, чтобы поверхность, не обращенная к источнику пожара, превысила температуру в 25 °С. Как мы видим, в тестах используются заданные значения температур источника пожара и измеряется время достижения конкретной температуры у поверхности стены. Такой же метод предлагается и в работе [8], в которой приводится формула для расчета времени возгорания древесины  $t_{ig}$  в зависимости от приложенной мощности  $q$  в кВт/м<sup>2</sup> и плотности древесины  $\rho$

$$t_{ig} = \frac{130 \rho^{0.73}}{(q-11)^{1.82}} \quad (1)$$

Если  $q < 11$  кВт/м<sup>2</sup>, то возгорание вообще не происходит, и формула (1) не используется.

Важно отметить, что измерить тепловую мощность и время возгорания легче, чем измерить температуру поверхности при ее возгорании [8], поэтому представляется важным получение аналитической зависимости между временем возгорания и температурой возгорания.

Сосредоточимся теперь на работах, в которых учитывается конвективный теплообмен на поверхности стенки, обращенной к пожару. Коэффициент конвективной теплопередачи  $h$  при возгорании определяется в работе [9] путем численного решения задачи динамики жидкости/газа. Для расчета была использована программа Fire Dynamics Simulator. Отмечено,

---

что программа редко выдает значение  $h$ , превышающее  $15 \text{ Вт}/(\text{К м}^2)$ , хотя рекомендованное американскими нормами значение равно  $30 \text{ Вт}/(\text{К м}^2)$ . В данной работе используется значение коэффициента теплопередачи  $h$ , равное  $20 \text{ Вт}/(\text{К м}^2)$ .

Аналитическое решение задачи нагрева стены определенной толщины при пожаре было получено в [10] методом разделения переменных. Коэффициент теплопередачи для поверхности со стороны пожара был принят равным  $27.1 \text{ Вт}/(\text{К м}^2)$ , в то время как для стороны, не обращенной к пожару, он был принят равным  $9 \text{ Вт}/(\text{К м}^2)$ . Была получена зависимость между температурой и временем достижения этой температуры нагретой поверхностью стены в виде

$$T = 15.873 + 200.8 \ln(t) \quad (2)$$

Здесь время измеряется в минутах, а температура в градусах. Огнестойкость конструкции определяется как время достижения температуры  $160 \text{ }^\circ\text{C}$  (превышение, равное  $140 \text{ }^\circ\text{C}$ , над начальной температурой в  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ ) поверхностью, которая *не обращена* к пожару. Это время, конечно, значительно и равно  $90$  мин для бетонной стены толщиной в  $100$  мм.

В работе [11] в качестве граничного условия у нагретой поверхности конструкции предлагается использовать сумму тепловых мощностей, поступающих за счет конвекции и за счет радиации. Конвективная мощность теплообмена пропорциональна разности температур нагретой поверхности конструкции и газа: коэффициент теплопередачи принимает значения от  $9$  до  $35 \text{ Вт}/(\text{К м}^2)$ . Значение, равное  $35 \text{ Вт}/(\text{К м}^2)$ , рекомендовано нормами Еврокода EN 1991-1-2 «Часть 1-2: Основные воздействия – воздействия на конструкции при пожаре». Теплообмен за счет радиации пропорционален разности между температурой поверхности конструкции, возведенной в 4-ю степень, и температурой радиации, возведенной в 4-ю степень.

В работе [12] получено аналитическое решение для задачи нестационарной теплопроводности, решенной для случая двумерных конструкций, подверженных воздействию пожара, как произведение соответствующих одномерных решений.

Учитывая имеющиеся результаты, нам представляется интересным внести некоторые уточнения в них и получить следующие новые результаты: (а) следует уточнить формулу (2) и получить простую зависимость температуры от времени на поверхности стены для любых материалов и для широкого диапазона значений времени; (б) следует определить зону повышенных температур вблизи нагретой поверхности стены (приграничный слой) как зону, в которой безразмерная температура принимала бы значение выше чем, скажем, 0.002, и далее получить простую формулу для расчета толщины этой зоны; (в) следует получить конечно-разностную схему решения этой задачи и установить условие устойчивости этой схемы; (г) следует разработать конечно-элементную модель и получить результаты для нагрева не только однородной стены, но и для неоднородной (состоящей из разных слоев) стены. Следует отметить, что не стоит недооценивать пункт (а), так как простая зависимость температуры от времени позволит нам получить и обратную зависимость времени возгорания от температуры.

### Формулировка задачи

Для определения сопротивления к возгоранию стены, выполненной из древесины, может быть сформулирована следующая задача нестационарной теплопроводности. Допустим, что стена подвержена воздействию повышенной температуры в связи с возникновением источника пожара, находящегося на удалении от стены (рис. 1). Начальная температура стены  $T_i$  принимается равной, например, 25 °С, в то время как температура источника пожара  $T_\infty$  принимается равной 800 °С. Стенка считается толстой, поэтому

при моделировании может рассматриваться как полубесконечное тело. Известна температура возгорания данной породы древесины  $T_{ig}$ , равная, например, 400 °С. Требуется определить время, необходимое для достижения температуры возгорания на внешней поверхности стены  $x = 0$ . Теплотехнические свойства древесины, такие как плотность  $\rho$ , коэффициент теплопроводности  $k$  и удельная теплоемкость  $c$  для древесины принимаются в соответствии с таблицей 1.

Как уже отмечалось, время, необходимое для достижения температуры возгорания, можно определить, как сопротивление к возгоранию древесины, и его не следует путать с другим параметром – пределом огнестойкости.

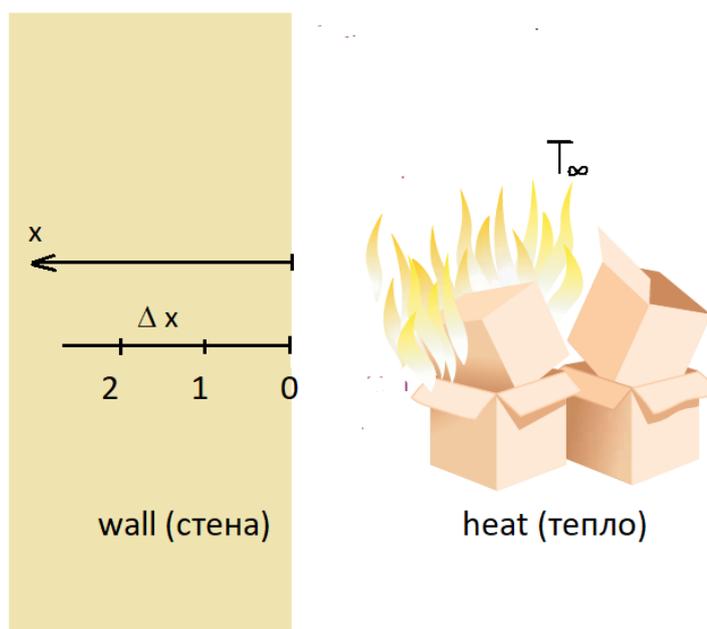


Рис. 1. – Стена, подверженная нагреву со стороны окружающей среды

Таблица № 1

## Теплотехнические свойства материалов

№ п/п	Материал	Плотность, $\rho$ [кг/м <sup>3</sup> ]	Коэффициент теплопроводности, $k$ [Вт/(м К)]	Удельная теплоемкость, $c$ [Дж/(кг К)]
1	Древесина	720	0,16	1255
2	Теплоизоляционный слой	16	0,046	835

Будем считать, что стенка занимает часть полупространства  $x \geq 0$ .

Будем искать температуру как функцию от координаты  $x$  и времени  $t$ , т. е.

$$T = T(x, t).$$

Чтобы решить данную задачу, необходимо решить уравнение теплопроводности

$$\rho c \frac{dT}{dt} = k \frac{d^2T}{dx^2} \quad (3)$$

в области  $x \geq 0$ . Вводя коэффициент диффузии  $\alpha = \frac{k}{\rho c}$ , это уравнение можно

также записать в виде

$$\frac{dT}{dt} = \alpha \frac{d^2T}{dx^2} \quad (4)$$

Начальная температура стены считается заданной

$$T(x, t = 0) = T_i \quad (5)$$

Граничное условие на поверхности  $x = 0$  задается как условие конвекции с окружающей средой

$$-k \frac{dT}{dx} = h(T_\infty - T) \quad (6)$$

В этой формуле температура и ее градиент вычисляются на поверхности стены, т. е. при  $x = 0$ . В левой части мы имеем поток тепла от поверхности стены в сторону ее внутренней части (он положительный), а в правой части – поток тепла к поверхности стены со стороны окружающей среды (он тоже положительный). Эти два потока должны быть равны, если на поверхности тела нет внутренних источников тепла (их нет). В формуле (6)  $h$  – коэффициент конвекции или теплопередачи, принимаемый для данной задачи  $h=20$  Вт/(К м<sup>2</sup>).

Запишем сперва аналитическое решение для данной задачи. Это решение представлено, например, в [1]. Безразмерная температура в любой момент времени может быть найдена по формуле

$$\frac{T-T_i}{T_{\infty}-T_i} = \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{at}}\right) - \exp\left(\frac{hx}{k} + \frac{h^2 at}{k^2}\right) \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{at}} + \frac{h\sqrt{at}}{k}\right) \quad (7)$$

На поверхности стены  $x = 0$ , и эта формула принимает более простой вид

$$\frac{T-T_i}{T_{\infty}-T_i} = 1 - \exp\left(\frac{h^2 at}{k^2}\right) \operatorname{erfc}\left(\frac{h\sqrt{at}}{k}\right) \quad (8)$$

Далее введем безразмерные параметры, известные как число Фурье и число Био

$$Fo = \frac{at}{L^2}, \quad Bi = \frac{hL}{k} \quad (9)$$

Хотя для бесконечного полупространства характерная длина  $L$  не определена, можно сформировать новый безразмерный параметр, в котором эта длина не будет фигурировать

$$\frac{h^2 at}{k^2} = FoBi^2 \quad (10)$$

Таким образом, мы получим у поверхности стены

$$\frac{T-T_i}{T_{\infty}-T_i} = 1 - \exp(FoBi^2) \operatorname{erfc}(Fo^{1/2} Bi) \quad (11)$$

На рис. 2 представлен график зависимости безразмерной температуры поверхности стены от безразмерного времени, определенного в соответствии с (10).

Из графика видно, что безразмерная температура, равная, например, 0.5, достигается на поверхности стены в момент времени, равный приблизительно 0.59. Для данных, которые приведены в начале раздела, при возгорании безразмерная температура принимает значение 0.48, и для этой температуры время равно 0.53. Также на графике точками показано численное решение, полученное методом конечных элементов, для задачи, сформулированной в начале раздела.

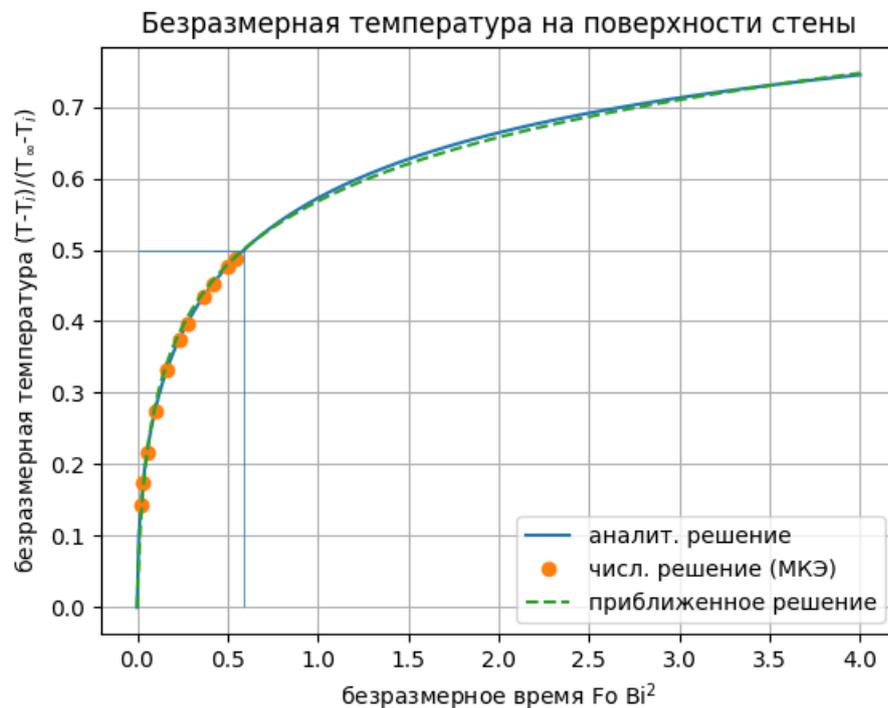


Рис. 2. – Зависимость безразмерной температуры от безразмерного времени на поверхности стены

Получим более простую формулу для зависимости температуры стены от времени, аналогичную (2), но применимую для любых материалов и для широкого диапазона значений времени

$$\frac{T-T_i}{T_\infty-T_i} = 0.13 \log(78FoBi^2 + 1) \quad (12)$$

Зависимость температуры от времени, полученная по этой приближенной формуле, показана на рисунке пунктиром, и видно хорошее совпадение с точной зависимостью. Из этой формулы теперь мы без труда можем найти безразмерное время как функцию от безразмерной температуры.

Далее вернемся к конкретной задаче, сформулированной в начале раздела. На рис. 3 представлен график распределения безразмерной температуры внутри стены в моменты времени, равные 100, 200 и 500 сек. Для момента времени  $t=200$  сек, точками показано и численное решение, полученное методом конечных элементов.

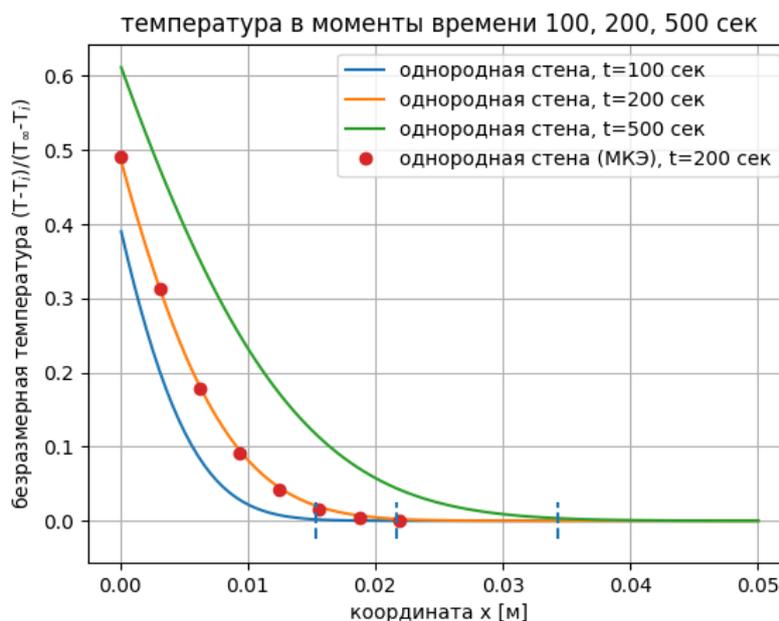


Рис. 3. – Распределение температуры в однородной стене в моменты времени 100, 200 и 500 сек.

Из графика видно, что температура имеет большой градиент у поверхности стены. Уже на небольшом расстоянии от поверхности стены температура становится приблизительно равной начальной температуре (и безразмерная температура становится практически равной нулю). Это говорит о том, что допущение о том, что стена является полубесконечным телом является верным для этих значений времени, и вопрос о влиянии толщины стены на результаты не стоит, так как большинство стен имеют гораздо большую толщину. Представляется полезным получить формулу для оценки толщины зоны повышенных температур, т. Е. зоны, в которой безразмерная температура имеет ненулевое значение, например, выше чем 0.002. Граница этой зоны на рисунке показана вертикальной чертой для трех значений времени. Подходящая формула для ширины этой зоны имеет вид

$$x = 3.65(at)^{1/2} \quad (13)$$

Похожее значение представлено в книге [3], но для другой задачи, в которой на поверхности стены задается фиксированная температура. Как видно из рисунка 3, данная формула хорошо подходит и для данной задачи, в которой на поверхности задано условие конвективного теплообмена. Данная формула дает достаточно точную оценку ширины зоны повышенных температур для всех практически значимых значений коэффициента теплопередачи  $h$  в пределах от 10 до 30 Вт/(К м<sup>2</sup>).

### Численное решение

Получим теперь численное решение данной задачи. Оно позволит нам рассмотреть более общие конструкции стен, например, композитных стен, состоящих из нескольких слоев разных материалов. Аналитическое решение для композитных конструкций найти трудно, поэтому нужно использовать численные подходы.

---

Опишем сначала решение методом конечных разностей. Введем сетку с размером шага  $\Delta x$ . Точки на этой сетке будем нумеровать, начиная с нуля 0, 1, 2 и т. д. (рис. 1). Точка 0 будет соответствовать поверхности стены  $x = 0$ . Введем также шаг по времени  $\Delta t$ . Искомая температура будет иметь два индекса  $T_i^p$ . Нижний индекс означает номер точки по оси  $x$ , а верхний индекс  $p$  означает номер шага по времени 0, 1, 2 и т. д. Таким образом, мы можем вычислять температуру в моменты времени 0,  $\Delta t$ ,  $2\Delta t$ ,  $3\Delta t$  и т. д. для каждой точки стены.

Уравнение теплового баланса в точке 0 в терминах конечных разностей можно составить следующим образом. Выделим небольшую приграничную область стены  $0 \leq x \leq \Delta x/2$ . Поток тепла в эту область со стороны внутренней части стены (от точки 1) равен

$$k \frac{T_1^p - T_0^p}{\Delta x}$$

Поток тепла в эту область со стороны окружающей среды равен

$$h(T_\infty - T_0^p)$$

Сумма этих двух потоков даст нам полный поток тепла, поступающий в эту область.

Полный поток тепла должен быть равен скорости изменения внутренней энергии внутри этой области. Скорость изменения внутренней энергии в небольшой области шириной  $\Delta x/2$  равна

$$c\rho \frac{\Delta x}{2} \frac{T_0^{p+1} - T_0^p}{\Delta t}$$

Таким образом получаем

$$k \frac{(T_1^p - T_0^p)}{\Delta x} + h(T_\infty - T_0^p) = c\rho \frac{\Delta x}{2} \frac{T_0^{p+1} - T_0^p}{\Delta t} \quad (14)$$

Разрешая данное уравнение относительно  $T_0^{p+1}$ , получим

$$T_0^{p+1} = 2fT_1^p + (1 - 2f)T_0^p + 2bf(T_\infty - T_0^p) \quad (15)$$

где были введены следующие обозначения

$$f = \frac{k\Delta t}{c\rho\Delta x^2}, \quad b = \frac{h\Delta x}{k} \quad (16)$$

Схема Эйлера, которая реализована здесь, является устойчивой, если коэффициент перед  $T_0^p$  в правой части (15) больше нуля [1]. Следовательно, при выборе шага по времени  $\Delta t$  мы должны обеспечить выполнение условия  $2f(1 + b) \leq 1$ . Зададим  $\Delta x = 0.003125$  м. Тогда при заданных свойствах материала стены и коэффициента конвекции мы получим  $0.0181\Delta t(1 + 0.39) \leq 0.5$ . Отсюда найдем максимально допустимый размер шага по времени:  $\Delta t \leq 19.87$  сек. Для обеспечения хорошей точности расчета потребуется еще меньшее значение шага по времени.

Для внутренних точек  $i = 1, 2$ , исходя из уравнения теплопроводности мы можем получить значения температуры на шаге  $p + 1$  по более простой формуле

$$T_i^{p+1} = f(T_{i-1}^p + T_{i+1}^p) + (1 - 2f)T_i^p \quad (17)$$

Исходя из этого уравнения для удовлетворения условия устойчивости требуется выполнение условия  $1 - 2f \geq 0$  или  $2f \leq 1$ . Но это условие менее обременительное, чем рассмотренное ранее условие для точки 0 на поверхности стены.

Рассмотрим теперь решение методом конечных элементов. На рис. 4 показана конечно-элементная модель для данной задачи, созданная в программе LISA. Хотя это одномерная задача, программа требует создания 3D модели. Размер элемента вдоль оси  $x$  был принят равным 0.003125 м. Шаг по времени был назначен равным 4 сек. Общая длина модели вдоль оси  $x$  принята равной 0.25 м; таким образом, количество элементов вдоль оси  $x$  равно 80. На границе области  $x = 0$  были заданы условия конвекции, а на другой границе  $x = 0.25$  м были заданы условия теплоизоляции. Первый и последний элементы модели выделены на рисунке цветом. Распределение температуры в однородной стене в момент времени  $t = 200$  сек показано на рис. 3 кружками. Как мы видим, наблюдается хорошее совпадение результатов с аналитическим решением.

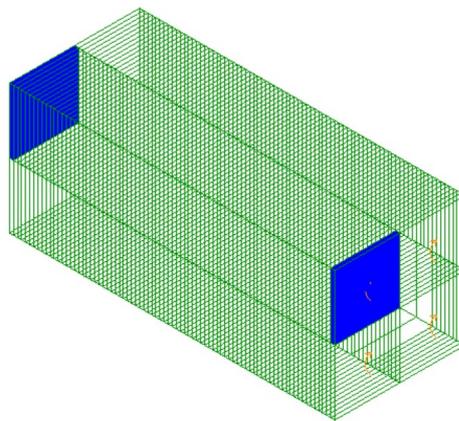


Рис. 4. – Конечно-элементная модель. Первый и последний элементы модели выделены цветом.

Использование метода конечных элементов позволяет нам рассматривать более сложные задачи, чем случай однородной среды (стены). Рассмотрим неоднородную стенку, в которой для  $x > 0.0125$  м был

установлен теплоизоляционный материал, а для  $x < 0.0125$  м мы по-прежнему используем дерево. Свойства теплоизоляционного слоя записаны в таблице 1. Распределение температуры в стене для этого случая в момент времени  $t = 200$  сек показано на рис. 5 звездами. Как мы видим, температура на поверхности стены не намного отличается от рассмотренного случая стены, полностью выполненной из древесины. Однако, в самом теплоизоляционном слое для точек, удаленных от поверхности стены на 0.0125 м и более, температура выше, чем в однородной стене для тех же значений координаты  $x$ .

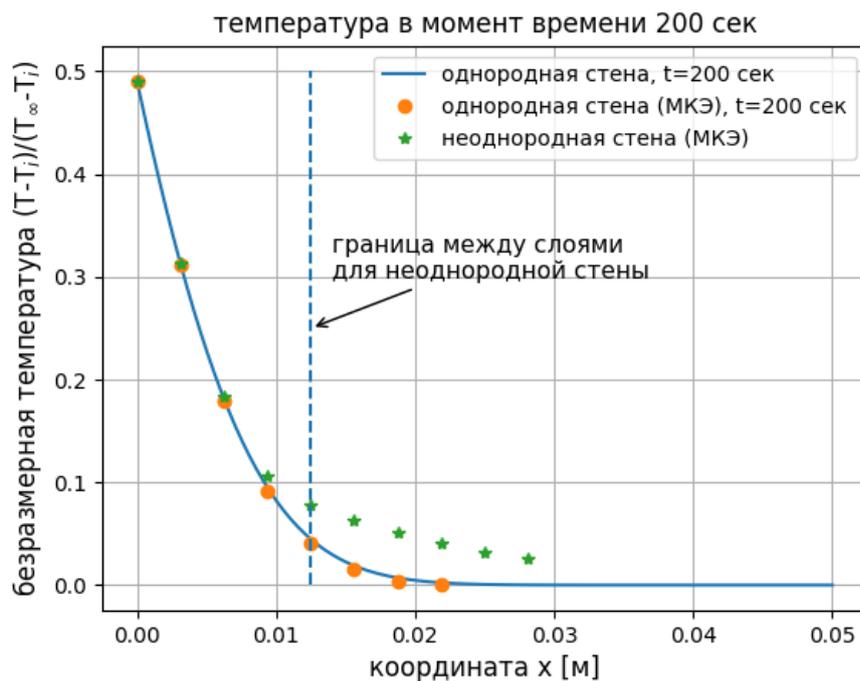


Рис. 5. Сравнение распределения температуры в однородной и неоднородной стене в момент времени 200 сек.

## Заключение

В данной статье было исследовано поле температур в толще стены, находящейся рядом с источником пожара. На поверхности стены, обращенной к пожару, было задано условие конвективного теплообмена.

Мы определили понятие безразмерного времени для данной задачи как произведение числа Фурье на квадрат числа Био (10). Далее мы получили приближенную, но достаточно точную формулу (12), которая позволяет найти безразмерную температуру на поверхности стены как функцию от безразмерного времени, а также получить обратную зависимость – зависимость времени от температуры. Таким образом, используя эту формулу, можно найти сопротивление к возгоранию, зная только один из параметров: или время возгорания, или температуру на поверхности стены в момент ее возгорания. Для конкретного численного примера, разобранный в статье, при заданной температуре возгорания древесины, равной 400 °С, было найдено время, необходимое для достижения поверхностью стены этой температуры. Это время оказалось равным около 200 сек при условии, что коэффициент конвекции с окружающей средой, в которой находится источник пожара, равен 20 Вт/(К м<sup>2</sup>).

Далее мы получили приближенную формулу (13) для ширины приграничной зоны, в которой наблюдается высокий градиент температур. Более конкретно, за пределами этой зоны безразмерная температура имеет значение менее чем 0.2% от своего максимального значения (равного 1). Другими словами, за пределами этой зоны температура в стенке остается равной своей начальной температуре. Эта формула позволяет для каждой конкретной задачи выяснить, можно ли использовать модель полубесконечного пространства для стенки заданной толщины. В большинстве случаев, ширина этой зоны незначительна по сравнению с толщиной стенки и модель полубесконечного пространства применима.

---

Мы разработали явную конечно-разностную схему Эйлера для решения данной задачи теплопроводности с условием конвекции на границе. В этой схеме мы сформулировали условие для ее устойчивости:  $2f(1 + b) \leq 1$ , где  $f$  и  $b$  определены как численное число Фурье и Био, соответственно.

С помощью конечно-элементной программы LISA мы также разработали конечно-элементную модель для решения данной задачи. Эта модель позволила нам получить результаты не только для однородной стены, но и для многослойной стены, в которой за тонким слоем древесины толщиной 12.5 мм следует толстый теплоизоляционный слой. Таким образом, было найдено время возгорания для такой многослойной стены. Это время возгорания оказалось примерно таким же, как и для случая однородной стены, однако температура внутри теплоизоляционного слоя оказалась немного выше температуры, наблюдаемой в однородной стене из древесины на том же удалении от поверхности стены.

### Литература

1. Incropera F.P., Dewitt D.P., Bergman T.L., Lavine A.S. Fundamentals of Heat and Mass Transfer. John Wiley & Sons. Inc. 2007. URL: [hyominsite.wordpress.com/wp-content/uploads/2015/03/fundamentals-of-heat-and-mass-transfer-6th-edition.pdf](http://hyominsite.wordpress.com/wp-content/uploads/2015/03/fundamentals-of-heat-and-mass-transfer-6th-edition.pdf).
2. Cengel Y.A. Heat Transfer: A Practical Approach. McGraw-Hill. 1997. 1006 p.
3. Pitts D., Sissom L. Theory and Problems of Heat Transfer. New York: McGraw-Hill. 1997. 365 p.
4. Карслоу Г., Егер Д. Теплопроводность твердых тел. М.: Наука. 1964. 448 с.

5. Сидоров В.Н., Примкулов А.М., Макарова Е.А. Нелинейная связанная задача нестационарной теплопроводности в двухмерном пространстве и ее численно-аналитическое решение // Инженерный вестник Дона. 2025. №5. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n5y2025/10092](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n5y2025/10092).

6. Hughes P., Ferrett E. Introduction to Health and Safety at Work. Elsevier Limited. 2007. 449 p.

7. Кряжевских Д.Ф., Волохин В.Ю., Кондрашов А.В., Шипилова Н.А. Выбор теплоизоляционного слоя для сэндвич-панелей на основе сравнения их параметров // Инженерный вестник Дона. 2025. №4. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2025/9993](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2025/9993).

8. Babrauskas V. Ignition of Wood: A Review of the State of the Art. Interflam 2001. Interscience Communications Ltd. London. 2001. pp. 71-88.

9. Hodges J.L., Hughes J., McDermott R.J. Convective Heat Transfer from Impinging Flames. URL: [files.thunderheadeng.com/femtc/2024\\_d1-08-hodges-paper.pdf](http://files.thunderheadeng.com/femtc/2024_d1-08-hodges-paper.pdf).

10. Casano G., Piva S. Transient Heat Conduction in a Wall Exposed to a Fire: an Analytic Approach. URL: [iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/796/1/012036/pdf](http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/796/1/012036/pdf).

11. DeSimone, A., Jeffers, A.E. Best Practices for Modelling Structural Boundary Conditions due to a Localized Fire, Fire Mater. 44. 2019. pp. 409-422.

12. Wang Z.H., Tan K.H. Temperature prediction for multi-dimensional domains in standard fire. Communications in Numerical Methods in Engineering 23. 2007. pp. 1035-1055.

## References

1. Incropera F.P., Dewitt D.P., Bergman T.L., Lavine A.S. Fundamentals of Heat and Mass Transfer. John Wiley & Sons. Inc. 2007. URL:

---

hyominsite.wordpress.com/wp-content/uploads/2015/03/fundamentals-of-heat-and-mass-transfer-6th-edition.pdf.

2. Cengel Y.A. Heat Transfer: A Practical Approach. McGraw-Hill. 1997. 1006 p.

3. Pitts D., Sissom L. Theory and Problems of Heat Transfer. New York: McGraw-Hill. 1997. 365 p.

4. Karslou G., Yeger D. Teploprovodnost' tverdykh tel [Conduction of Heat in Solids]. Moskva: Nauka. 1964. 448 p.

5. Sidorov V.N., Primkulov A.M., Makarova E.A. Inzhenernyj vestnik Dona. 2025. №5. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n5y2025/10092](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n5y2025/10092).

6. Hughes P., Ferrett E. Introduction to Health and Safety at Work. Elsevier Limited. 2007. 449 p.

7. Kryajevskikh D.F., Volokhin V.Yu., Kondrashov A.V., Shipilova N.A. Inzhenernyj vestnik Dona. 2025. №4. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2025/9993](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2025/9993).

8. Babrauskas V. Ignition of Wood: A Review of the State of the Art. Interflam 2001, Interscience Communications Ltd.. London. 2001. pp. 71-88.

9. Hodges J.L., Hughes J., McDermott R.J. Convective Heat Transfer from Impinging Flames. URL: [files.thunderheadeng.com/femtc/2024\\_d1-08-hodges-paper.pdf](http://files.thunderheadeng.com/femtc/2024_d1-08-hodges-paper.pdf).

10. Casano G., Piva S. Transient Heat Conduction in a Wall Exposed to a Fire: an Analytic Approach. URL: [iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/796/1/012036/pdf](http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/796/1/012036/pdf).

11. DeSimone, A., Jeffers, A.E., Best Practices for Modelling Structural Boundary Conditions due to a Localized Fire, Fire Mater. 44. 2019. pp. 409-422.



12. Wang Z.H., Tan K.H. Temperature prediction for multi-dimensional domains in standard fire. Communications in Numerical Methods in Engineering 23. 2007. pp. 1035-1055.

**Дата поступления: 12.05.2025**

**Дата публикации: 25.07.2025**