

# Контроль. Диагностика

TESTING. DIAGNOSTICS

9 (87) 2005  
сентябрь

**FLIR**  
SYSTEMS

**ТЕПЛОВИЗОР**



**ПЕРГАМ**

**ThermaCAM  
P65**



**Выбор  
профессиональных  
термографистов**

- Технология Bluetooth™ для записи голосовых комментариев
- Запись и передача цифрового видео через интерфейс FireWire®
- Автоматическая подсветка для встроенной фотокамеры
- Лазерный указатель LocatIR™ и выносной пульт ДУ
- Русифицированное меню и ПО Reporter Pro™ и ImageBuilder™
- Широкий выбор аксессуаров и объективов



ОАО "Пергам-Инжиниринг" – эксклюзивный представитель FLIR Systems в России и странах СНГ

**www.pergam.ru**  
**(095) 775 • 75 • 25**

Адрес:  
129085, Москва,  
проезд Ольминского,  
3А, 8 этаж

Тел.: (095) 682-0249  
682-7054; 682-1389  
Факс: (095) 216-6614  
E-mail: info@pergam.ru

Сервисный центр:  
Тел.: (095) 686-0578  
E-mail: support@pergam.ru  
www.myservice.ru



## Определение текущего фронта промерзания в наружных ограждающих конструкциях строительных сооружений

*Описан метод определения точки росы и положения фронта промерзания влаги, содержащейся в наружных ограждающих конструкциях зданий в реальных условиях их эксплуатации, на основе данных теплового (тепловизионного) неразрушающего контроля.*

*В основе лежит экспериментально-расчетный метод на базе математической модели, описывающий процесс нестационарной теплопередачи в наружных ограждающих конструкциях.*

*Экспериментальные исследования подтвердили достоверность проведенных расчетов и показали, что созданная модель адекватно описывает процесс распространения границ точки росы и плоскости промерзания в многослойных строительных конструкциях.*

*На основе результатов работы разработаны соответствующие нормативные документы (методики контроля с соответствующим программным обеспечением), на основании которых возможно производить исследования температурно-влажностного режима строительных объектов в реальных условиях их эксплуатации.*

Задача исследования движения фронта промерзания (или оттаивания) влаги, содержащейся в наружных ограждениях здания, имеет большое практическое значение, так как непосредственно связана с вопросами долговечности ограждающих конструкций, формирования их реального тепловлажностного режима и сопротивления теплопередаче. Последний фактор определяет эффективность энергосбережения здания. Чередование замерзания и оттаивания в зоне перемещения фронта промерзания постепенно приводит к снижению прочности, а в конечном счете и к разрушению конструкции.

В настоящей работе описан метод определения точки росы и положения фронта промерзания влаги, содержащейся в наружных ограждающих конструкциях зданий в реальных условиях их эксплуатации.

В его основе лежит экспериментально-расчетный метод на базе математической модели, описывающий процесс нестационарной теплопередачи в наружных ограждающих конструкциях и данные теплового неразрушающего контроля строительных конструкций [1].

Подробное описание общей методики и математической модели теплового неразрушающего контроля зданий и строительных сооружений приведено в [1, 2]. Методика заключается в определении приведенного сопротивления теплопередаче наружных ограждающих конструкций в реальных условиях их эксплуатации (в условиях процесса нестационарной теплопередачи). Ниже приведены особенности математического описания, дополняющие общую методику [1, 2], присущие конкретной решаемой задаче (определению точки росы и положения фронта промерзания стены).

Экспериментальная часть заключается в определении зависимости температурно-влажностных параметров ограждающей конструкции от времени (температурно-влажностной истории) и ее тепловизионном обсле-

довании программно-аппаратным комплексом ВЕМО-2000 [3].

Теоретическая часть задачи промерзания рассматривается как задача, в которой изменение агрегатного состояния (переход воды в лед) происходит при определенной температуре  $T_k$ . То есть имеется четкая изотермическая граница, отделяющая области затвердевшего льда и жидкости. В дальнейшем параметры затвердевшей области будем помечать индексом 1, а параметры *незатвердевшей области* — индексом 2.

Изменение агрегатного состояния тела в общем случае имеет два следствия, влияющие на его тепловой режим: а) при перемещении границы затвердевания выделяется скрытая теплота фазового перехода; б) изменяются теплофизические характеристики материала. Постановка таких задач существенно отличается от неустановившегося режима, а именно: появляется необходимость решать систему двух уравнений нестационарной теплопроводности (для *затвердевшей* и *незатвердевшей областей*) и помимо граничных условий на поверхности тела дополнительно задавать два условия на границе затвердевания:

теплового баланса:

$$\lambda_1 \frac{\partial T}{\partial x}(x = x_k - 0) - \lambda_2 \frac{\partial T}{\partial x}(x = x_k + 0) = L \frac{dx_k}{dt}, \quad (1)$$

где  $\lambda$  — коэффициент теплопроводности;  $t$  — текущее время;

равенства температур:

$$T_1(x = x_k - 0) = T_2(x = x_k + 0) = T_k. \quad (2)$$

(Продолжение статьи на стр. 39)



(Продолжение. Начало на стр. 34)

Первый член уравнения (1) выражает плотность теплового потока  $S_1$ , который отводится от границы раздела фаз через затвердевшую область; второй член — плотность теплового потока  $S_2$ , поступающего к границе раздела фаз из незатвердевшей области.

Правая часть уравнения (1) представляет собой плотность теплового потока, возникающего благодаря выделению скрытой теплоты фазового перехода. При затвердевании значение *объемной теплоты фазового перехода* выражается формулой

$$L = w r \rho, \quad (3)$$

где  $w$  — массовая доля влаги в материале;  $r$  — теплота фазового перехода единицы массы жидкости материала (например, для воды в лед  $r = 334\,000$  Дж/кг);  $\rho$  — плотность влажного материала.

Например, для кирпича с массовой долей влаги 2 %:

$$L = 0,02 \times 334\,000 \times 1800 = 12,024 \text{ МДж} / \text{м}^3.$$

Задача в такой формулировке называется **задачей Стефана о перемещении границы раздела фаз**.

Точное аналитическое решение *задачи Стефана* возможно только для ограниченного набора форм тел и граничных условий. Поскольку в реальных случаях используются многослойные, разнородные по теплофизическим характеристикам материалы (с заданием переменных во времени температуры среды и коэффициента теплоотдачи на поверхности), то аналитическое решение задачи затруднительно.

Для упрощения математического анализа без существенного снижения достоверности получаемых результатов введены допущения о *квазистационарности температурного режима в затвердевшей области*. В этом случае решение задач с фазовыми превращениями можно упростить, если заранее задаться распределением температуры в затвердевшей и незатвердевшей частях тела. Тем самым отпадает необходимость в вычислении температур. Остается только определить местоположение границы затвердевания. Такой прием не требует решения уравнения теплопроводности, так как для расчета перемещения границы затвердевания достаточно уравнения теплового баланса. При этом характер распределения температуры надо выбирать по возможности ближе к действительному. Следует заметить, что процесс затвердевания на практике идет довольно медленно. Поэтому температура в теле хотя и изменяется, но ее распределение в каждый момент времени можно принять соответствующим установившемуся состоянию. Безынерционный (мгновенный) переход от одного установившегося состояния к другому при перемещении границы затвердевания предполагает, что коэффициент температуропроводности затвердевшего тела бесконечно велик. Так как в расчетах

коэффициент теплопроводности имеет конечное значение, то тем самым предполагается, что объемная теплоемкость равна нулю. Физически это означает, что изменение температуры тела не связано с затратой или выделением тепла. В действительности это не так (теплоемкость тела не равна нулю), и по мере продвижения границы затвердевания теплосодержание тела изменяется. Тепловой поток от изменения теплосодержания затвердевшего тела может быть учтен, если вместо объемной теплоты фазового перехода в расчеты вводить ее эффективное значение:

$$L_{\text{эф}} = L + c_1 \rho_1 (T_k - T_n) / 2, \quad (4)$$

где  $c_1$  — удельная теплоемкость затвердевшей зоны;  $\rho_1$  — плотность затвердевшей зоны;  $T_n$  — температура на внешней поверхности тела.

Анализ точных аналитических решений, проведенный в [4], показывает, что приближенные решения в затвердевшей зоне, основанные на замене неустановившегося режима на квазистационарный режим с поправкой (4), соответствуют первым наиболее весомым членам ряда, которыми описывается текущее распределение температуры в теле с границей фазового перехода (в точном аналитическом решении).

В качестве примера использования данного приближения рассмотрим *задачу о движении границы замерзания в полуограниченном массиве*, на поверхности которого задана постоянная температура  $T_n$ , которая ниже температуры фазового перехода  $T_k$ . На границе фазового перехода плотность теплового потока из незатвердевшей области изменяется по закону  $S_2 = S_0 / \sqrt{t}$ . Начальная температура тела равна  $T_0$ .

Уравнение теплового баланса на границе затвердевания имеет вид

$$\lambda_1 \frac{T_k - T_n}{x_k} - \frac{S_0}{\sqrt{t}} = L_{\text{эф}} \frac{dx_k}{dt}. \quad (5)$$

Для определения величины теплового потока, подводящего из незатвердевшей области, можно воспользоваться решением задачи нестационарной теплопроводности в полуограниченном массиве с постоянной температурой на поверхности  $T_k$ . Текущая плотность теплового потока на поверхности такого массива имеет выражение

$$q = \frac{\lambda_2 (T_k - T_0)}{\sqrt{\pi a_2}} \frac{1}{\sqrt{t}}, \quad (6)$$

где  $a_2 = \frac{\lambda_2}{c_2 \rho_2}$  — коэффициент температуропроводности незатвердевшей зоны;  $\lambda_2$ ,  $c_2$ ,  $\rho_2$  — коэффициент теплопроводности, удельная теплоемкость и плотность незатвердевшей зоны.



Сравнивая выражения второго члена уравнения (5) с выражением (6), легко заметить, что  $S_0 = \frac{\lambda_2(T_0 - T_k)}{\sqrt{\pi a_2}}$  (смена знака указывает на то, что тепло поступает к границе раздела фаз из незатвердевшей зоны).

Из решения дифференциального уравнения (5) относительно  $x_k$  можно получить выражение для текущей во времени границы затвердевания:

$$x_k = \beta \frac{S_0 \sqrt{t}}{L_{эф}}, \quad (7)$$

где параметр

$$\beta = -1 + \sqrt{1 + \frac{2L_{эф}\lambda_1(T_k - T_n)}{S_0^2}}. \quad (8)$$

В качестве примеров, иллюстрирующих выведенные соотношения, рассмотрим две влажные стены большой толщины, выполненные из кирпича и пенополистирола, имеющие следующие теплофизические характеристики:

кирпич:  $\lambda = 0,81$  Вт/(м·К),  $c = 880$  Дж/(кг·К),  $\rho = 1800$  кг/м<sup>3</sup>,  $w = 0,02$ ;

пенополистирол:  $\lambda = 0,052$  Вт/(м·К),  $c = 1340$  Дж/(кг·К),  $\rho = 100$  кг/м<sup>3</sup>,  $w = 0,10$ .

Для простоты положим, что теплофизические характеристики участков стены с замерзшей и незамерзшей влагой примерно равны (поэтому индексы 1 и 2 опущены). Температура на поверхности стены принимается равной  $T_n = -20$  °С, начальная температура  $T_0 = 20$  °С, а

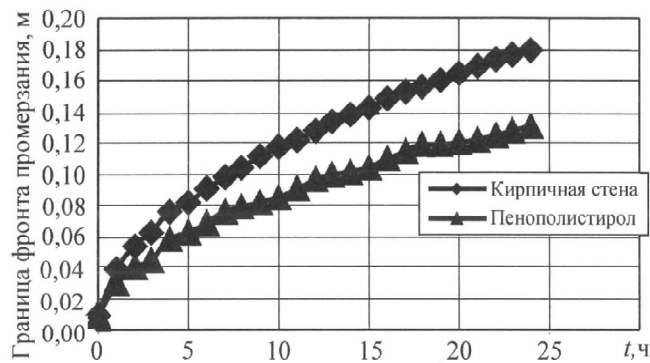


Рис. 1. Движение границы промерзания в толстой однородной стене из кирпича и пенополистирола с учетом эффектов скачка теплоемкости на границе

сти с условиями Стефана, когда имеет место существенная зависимость теплофизических материалов от температуры. В этом случае имеет смысл отказаться от ввода в задачу условий Стефана, а процесс фазового перехода учесть резким скачком удельной теплоемкости материала в окрестности температуры фазового перехода, которая рассчитывается по соотношению

$$c(T) = c_0(T) + wr \frac{d\chi}{dT}, \quad (9)$$

где  $\chi$  — функция процесса плавления льда (или замерзания воды), которая в табличном виде выражается следующими значениями:

$T, ^\circ\text{C}$	-1,5	-1,0	-0,5	0	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0
$\chi$	0	0,09	0,20	0,45	0,70	0,81	0,87	0,92	0,95	0,97	0,99	1,00

температура замерзания влаги  $T_k = 0$  °С. Процесс промерзания рассмотрен в течение 24 ч. При определении фронта промерзания строительных конструкций в реальных условиях их эксплуатации в качестве  $T_0$  и  $T_n$  используются температурные истории — значения температуры в различные моменты времени за период 3...5 суток.

Результаты расчетов показаны на рис. 1, из которого следует, что к исходу 24 ч глубина промерзания кирпича составляет 180 мм, а глубина промерзания пенополистирола — 130 мм.

Для численного моделирования процесса промерзания ограждения разработана специальная программа, реализованная на ЭВМ. При этом использовалась конечно-разностная аппроксимация дифференциального уравнения теплопроводности и условий Стефана (1) и (2).

Анализ показал, что рассмотренная схема конечно-разностной аппроксимации недостаточно эффективна для решения задачи нестационарной теплопроводности

В такой постановке математическая модель процесса охлаждения и промерзания стены имеет следующий вид:

$$\rho_m c_m(t) \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[ r \lambda_m(T) \frac{\partial T}{\partial r} \right], R_0 < r < R_n, t > 0, m = 1, \dots, n. \quad (10)$$

Система уравнений записана в цилиндрической системе координат в целях большей универсальности расчетной программы численного решения этой системы уравнений. При задании значения радиуса кривизны, значительно превышающего толщину стенки, задача решается практически в прямоугольной системе координат.

Система уравнений (10) является нелинейной, так как и удельная теплоемкость, и коэффициент теплопроводности каждого  $m$ -го слоя могут различным образом зависеть от температуры.



На внешней и внутренней поверхностях стенки (для большей универсальности расчетной программы) задается весь возможный набор граничных условий:

- а) теплообмен по закону Ньютона  $\alpha_{в(н)}[T_{в(н)} - T(r = R_{0(н)})]$ ;
- б) плотность теплового потока  $q_{в(н)}$ ;
- в) теплообмен излучением по закону Стефана–Больцмана

$$A_{эф.в(н)}\alpha[T_{в(н)}^4 - T^4(r = R_{0(н)})];$$

г) собственное излучение поверхностей стенки в окружающую среду  $\varepsilon_{в(н)}\sigma T_{в(н)}^4$ , т.е. при  $A_{эф.в(н)} = 0$ .

Граничные условия на внешней и внутренней поверхностях стенки формулируются следующим образом:

$$-\lambda \frac{\partial T(r=R_0)}{\partial r} = \alpha_n [T_n - T(r=R_0)] + A_{эф.в} \sigma [T_n^4 - T^4(r=R_0)] + q_n - \sigma \varepsilon_n T^4(r=R_0); \quad (11)$$

$$\lambda_n \frac{\partial T(r=R_n)}{\partial r} = \alpha_n [T_n - T(r=R_n)] + A_{эф.н} \sigma [T_n^4 - T^4(r=R_n)] + q_n - \sigma \varepsilon_n T^4(r=R_n). \quad (12)$$

В граничных условиях (11) и (12) коэффициенты конвективной теплоотдачи  $\alpha$ , температуры сред около внешней и внутренней поверхностей стены  $T$ , плотности тепловых потоков  $q$  и эффективные функции радиационных параметров (приведенные степени черноты поверхностей и излучающих сред)  $A_{эф}$  являются функциями времени.

На границах слоев стены, имеющих различные теплофизические характеристики, полагается идеальный контакт и, таким образом, имеют место условия теплового сопряжения:

$$\lambda_m \frac{\partial T(r=R_m-0)}{\partial r} = \lambda_{m+1} \frac{\partial T(r=R_m+0)}{\partial r}; \quad (13)$$

$$T(r=R_m-0) = T(r=R_m+0), R_m = \sum_{m=1}^m h_m. \quad (14)$$

Начальное условие

$$T(t=0) = T_0(r). \quad (15)$$

В начальный момент времени распределение в стене может быть либо равномерным и равно некоторой температуре  $T_{нач}$ , либо переменным вдоль поперечной координаты стенки  $r$ .

В качестве примера рассмотрим промерзание типичной строительной конструкции: наружный слой – кирпич толщиной 120 мм, второй слой – железобетон толщиной 100 мм, третий слой – пенополистирол толщиной 200 мм, четвертый слой – железобетон толщиной 100 мм. Температура холодной среды в течение суток колеблется



Рис. 2. Изменение во времени температуры на слоях стены

по линейному закону  $-20 \dots -10$  °С. Температура теплой среды  $+20$  °С. Результаты расчета в виде изменения температуры во времени на поверхностях и на границах слоев стены даны на рис. 2. Ход фронта замерзания показан на рис. 3.

Экспериментальные исследования подтвердили достоверность расчетов и показали, что созданная модель адекватно описывает процесс распространения границ точки росы и плоскости промерзания в многослойных строительных конструкциях.

На основе результатов работы разработаны нормативные документы (методики контроля с соответствующим программным обеспечением), на основании которых возможно проводить исследования температурно-влажностного режима строительных объектов в реальных условиях их эксплуатации. В качестве входных данных для расчетов использовались результаты исследований в соответствии с [3].

Таким образом, разработана методика, которая обеспечивает определение точки росы и положения фронта

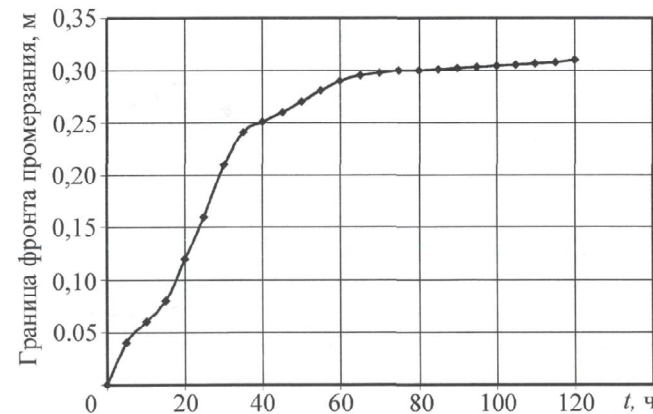


Рис. 3. Движение фронта промерзания в трехслойной бетонной стене с теплоизоляцией при суточных колебаниях температуры окружающей среды



промерзания строительной конструкции в реальных условиях ее эксплуатации.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Будадин О.Н., Потапов А.И., Колганов В.И и др. Тепловой неразрушающий контроль изделий. М.: Наука, 2002. 476 с.
2. Пат. 2151388. Способ неразрушающего контроля качества объекта / О.Н. Будадин, Т.Е. Троицкий-Марков, Е.В. Абрамова и др.; заявл. 22.12.99; № 99126444/28; опубл. 20.06.2000; Бюл. № 17.
3. Методика диагностики и энергетических обследований наружных ограждающих конструкций и строительных сооружений тепловизионным бесконтактным методом / О.Н. Буда-

дин, Е.В. Абрамова, В.И. Сучков. М.: Технологический институт энергетических обследований, диагностики и неразрушающего контроля "ВЕМО", 2001. 43 с.

4. Пехович А.И., Жидких В.М. Расчеты теплового режима твердых тел. Л.: Энергия, 1976. 352 с.
5. Парфентьева Н.А., Самарин О.Д. О колебаниях фронта промерзания в ограждениях и численном моделировании задачи Стефана // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI. 2002. № 11. С. 46–47.
6. Прусаков Г.М. Математические модели в расчетах на ЭВМ. М.: Наука, 1993. 144 с.
7. Теория тепломассообмена / под ред. А.И. Леонтьева. М.: Высш. шк., 1979. 495 с.

В.Н. Илюшенов, А.В. Илюшенов, В.П. Вавилов, Д.Г. Капаница

## Тепловизионный анализ процесса разрушения кости при монотонном механическом нагружении

*Приведены феноменологические данные по анализу процесса разрушения костной ткани при монотонном сжатии методом ИК-тепловидения. Показано, что в очагах разрушения температурные сигналы достигают 13 °С, что может быть объяснено в рамках теории Гриффитса.*

В процессе остеосинтеза трубчатых костей фиксаторами с памятью формы, которые предварительно выдерживают при температуре жидкого азота (77 °С), костная ткань испытывает локальные тепловые и механические нагрузки, которые, в свою очередь, подвержены перераспределению внутри кости с включением механизма внутрискелетальных связей. Упругие и пластические деформации, выходя за пределы критического уровня, способны привести к разрушению кости подобно тому, как это происходит с конструкционными материалами. Анализ термомеханических процессов, сопровождающих остеосинтез, может подсказать приемы повышения витальности (жизнеспособности) костной ткани и в конечном счете улучшить качество лечения.

Известны работы в области инфракрасного (ИК) термографического анализа процесса разрушения материалов при циклическом нагружении, которые иллюстрируют связь механических и тепловых эффектов [1–5]. В 90-х гг. прошлого века был предложен метод анализа нагрузок по тепловой эмиссии (Stress Pattern Analysis by Thermal Emission – SPATE), или просто термографического анализа нагрузок (Thermographic Stress Analysis – TSA). Метод основан на использовании феномена термоупругости, который связывает динамические изменения температуры и механических напряжений согласно формуле У. Томсона:

$$\frac{\delta T}{T_0} = -\frac{\beta \delta I_1}{\rho C_p} = -K \delta I_1, \quad (1)$$

где  $\delta T$  – циклическое изменение температуры;  $T_0$  – абсолютная температура образца;  $\beta$  – коэффициент линейного расширения;  $\delta I_1$  – изменение суммы основных напряжений;  $C_p$  – теплоемкость при постоянном давлении;  $K$  – константа термоупругости.

В конструкционных материалах амплитуда температурных сигналов, обусловленных термоупругостью, составляет от тысячных до десятых долей градуса, причем эти сигналы определяются только суммой главных напряжений  $I_1$ . Значение  $K$  для костной ткани в литературных источниках обнаружить не удалось, поэтому в соответствии с известными рекомендациями приняли, что костная ткань аналогична стеклу со следующими *теплофизическими характеристиками* (ТФХ): плотностью  $\rho = 2442 \text{ кг/м}^3$ , удельной теплоемкостью  $C = 837 \text{ Дж/(кг·К)}$ , коэффициентом теплопроводности  $\lambda = 0,88 \text{ Вт/(м·К)}$  и коэффициентом температуропроводности  $\alpha = 0,43 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ . Модуль упругости приняли  $E_1 = 18 \text{ ГПа}$  (большая берцовая кость человека) [6]. Следовательно, оценочное значение константы термоупругости для костной ткани равно  $K \approx 4,4 \cdot 10^{-12} \text{ 1/Па}$ . Согласно литературным данным напряжение разрушения сжатием для кости составляет около 128 МПа [6]. Тогда по формуле (1) температурный сигнал, соответствующий разрушению костной ткани, равен  $\Delta T \sim 0,17 \text{ °С}$  при температуре образца 27 °С (300 К). Сигналы такого уровня уверенно регистрируются современными тепловизорами.