

УДК 697.133

Применимость квазистационарного метода определения термического сопротивления стен

О. В. Коршунов,

Объединённый институт высоких температур РАН, старший научный сотрудник,
кандидат физико-математических наук

В. И. Зуев,

Технологический институт энергетических обследований,
диагностики и неразрушающего контроля «ВЕМО», заведующий лабораторией

На основе физического анализа процесса теплопередачи и решения нестационарного уравнения теплопроводности выведен и систематизирован целый ряд критериев, устанавливающих наличие квазистационарных и нестационарных тепловых состояний наружных стен при разных видах тепловых возмущений. Тем самым даны обоснованные методические рекомендации для теплового неразрушающего контроля стен путём выявления квазистационарных условий теплопередачи.

Ключевые слова: квазистационарность, термическое сопротивление стен, теплопередача, нестационарность.

Продолжая начатое в прошлом номере журнала [1] исследование перспектив квазистационарного подхода к определению термического сопротивления ограждающих конструкций и контролю параметров теплопередачи наружных стен зданий, рассмотрим условия применимости такого подхода, которые следуют из физического анализа процесса теплопередачи и решения нестационарного уравнения теплопроводности.

С целью разработки методических рекомендаций для теплового неразрушающего контроля найдём и систематизируем условия существования квазистационарных и нестационарных тепловых состояний наружных стен при разных видах тепловых возмущений. Сначала выведем условия квазистационарности, основанные на имеющихся в литературе [2–5] представлениях, а затем найдём главный, обобщающий их, критерий и проанализируем его.

Временной критерий квазистационарности

Как уже упоминалось нами в [1], из аналитических решений нестационарного уравнения теплопроводности с разными граничными условиями [2–4] следует одна важная характеристика процесса теплопередачи – время тепловой инерции стены (выражение (1) и табл. 1 [1]), определяющее временной критерий квазистационарности:

$$t > \tau_{\text{н}} = \pi^{-2} c \rho D^2 / \lambda, \quad (1)$$

или

$$F_0 > \pi^{-2} \cong 0,1,$$

где λ – теплопроводность;

c – теплоёмкость;

ρ – плотность;

D – толщина стены;

t – время, отсчитываемое от начала теплового возмущения;

$F_0 = t\lambda / c\rho D^2$ – число Фурье (безразмерное время).

Температурный критерий квазистационарности

Простейшим критерием квазистационарности является малость амплитуды температурных колебаний на наружной поверхности ограждения $\Delta T_{\text{н}}$ по сравнению с перепадом температуры в стене здания:

$$|\Delta T_{\text{н}}| \ll \Delta T = T_{\text{в}} - T_{\text{н}}, \quad (2)$$

где $T_{\text{в}}$ и $T_{\text{н}}$ – температуры внутренней и наружной поверхностей стены, соответственно (здесь и далее полагаем $T_{\text{в}} > T_{\text{н}}$).

Выполнение (2) означает, что если можно пренебречь самими изменениями температуры, то тем более допустимо считать эти изменения квазистационарными.

Временной и температурный критерии квазистационарности будут подробнее рассмотрены ниже в теоретических разделах данной работы. Однако некоторые выводы можно сделать уже сейчас. Рассмотрим неравенство (2) в численном выражении и найдём времена года, наиболее благоприятные для тепловых измерений.

Очевидно, что оно не выполняется при малых перепадах температуры $\Delta T \rightarrow 0$ °С. Относительная погрешность измерения $\delta T / \Delta T$ стремится к бесконечности, поскольку числитель определяется конечной величиной приборной погрешности δT . То же самое относится и к погрешности теплового потока. Говорить в этих условиях о достоверности измерений вообще не приходится. Это происходит летом, когда температуры наружного и внутреннего воздуха могут быть просто равны друг другу.

Отсюда следует очевидная рекомендация, данная ещё в нормативном документе [6], о проведении измерений в зимнее время при $\Delta T > 15$ °С, когда отно-

сительные погрешности измерений, обусловленные атмосферными колебаниями температуры наружного воздуха, сравнительно малы.

Всё сказанное в этом разделе относится и к внутренним колебаниям температуры, которые обусловлены, главным образом, неравномерным отоплением [5].

Условие (2) представляет собой первое приближение амплитудного критерия квазистационарности.

Частотный критерий квазистационарности

Итак, как видим, колебания температуры наружного и внутреннего воздуха не всегда отражаются на результатах исследований. Рассмотрим подробнее, как и какие колебания можно и нужно исключить при обработке экспериментальных данных.

В [5] вводится понятие «слой резких колебаний» температуры, который вдвое снижает мощность тепловой волны. Толщина слоя равна:

$$\Delta Z_{\text{срк}} = (\lambda\tau/2\pi c\rho)^{0,5}.$$

Здесь вместо частоты ν введён период температурных колебаний τ , предполагая, что они носят гармонический или хотя бы квазипериодический характер.

Оценка, сделанная в [5] с использованием этого выражения для кирпичной стены и суточного цикла тепловых потоков, дала: $\Delta Z_{\text{срк}} = 8,4$ см, т. е. около 10–15 % толщины обычного ограждения. Следовательно, колебания с небольшими амплитудами, а тем более удовлетворяющими условию (2), вообще не будут сказываться на противоположной поверхности ограждения.

Быстрые колебания оказываются совсем несущественными. Так, при периоде $\tau = 1$ ч толщина «слоя резких колебаний» тоньше в $24^{0,5}$ раз и равна всего 1,7 см. Такая же закономерность получена и в [2] путём точного математического решения уравнения теплопроводности для синусоидальной тепловой волны. Оказалось, что постоянно действующая волна не может глубоко проникнуть в массив при малых периодах колебаний (высокочастотное отражение). Она экспоненциально затухает с показателем экспоненты $Z/\Delta Z_{\text{срк}}^{2,0,5}$, так что при $\tau = 1$ ч на глубине всего 7 см той же кирпичной стены амплитуда колебаний уменьшается в 20 раз. Следовательно, мощнейшая тепловая волна амплитудой 20 °С даже на этой глубине изменит температуру стены лишь на один градус.

Такие колебания временного хода поверхностной температуры легко учесть в измерениях, поскольку они происходят вокруг среднего значения, которое и определяет тепловой режим ограждения.

Краткое тепловое воздействие не нарушает тепловой баланс стены, который «не замечает» кратковременных и неглубоко проникающих воздействий. Их мощность (температурная амплитуда) может быть достаточно велика, но энергия, в силу кратковременности, слишком мала, чтобы изменить температурный режим всего ограждения. Такое тепловое воздействие является локальным и рассеивается прямо с поверхности.

На практике резкие колебания температуры будут выражаться в виде шумов или биений, главным образом, на кривых наружных измерений и никак не повлияют на измеряемые внутри помещения величины $T_{\text{в}}(t)$ и $q(t)$.

Следует полагать, что численная обработка экспериментальных данных заключается именно в том, чтобы с помощью статистики исключить эти высокочастотные колебания, не прибегая к решению нестационарной задачи.

Таким образом, обычные температурные колебания, наблюдаемые в теплофизическом эксперименте, не должны препятствовать применению стационарной методики измерений основных параметров теплопередачи при условии:

$$\nu^{-1} - \tau < \tau_{\text{и}} \quad (3)$$

Так в первом приближении определяется частотный критерий квазистационарности.

Критерии нестационарности

Сопоставляя условия (1) и (3), видим, что и медленные, и быстрые тепловые процессы слабо отражаются на тепловом балансе всей стены, который либо квазистационарен при медленном изменении температуры (1), либо не реагирует на её быстрые колебания (3). Следовательно, область преобладания нестационарных условий, к которой неприемлем квазистационарный подход, является промежуточной между (1) и (3), соответствуя временам температурной неустойчивости, близким времени тепловой инерции:

$$t \leq \tau_{\text{и}} \quad (4 \text{ а})$$

Второй критерий нестационарности является обратным условию (2):

$$|\Delta T_{\text{н}}| \leq \Delta T. \quad (4 \text{ б})$$

Температурно-скоростной критерий квазистационарности

В одномерном случае уравнение нестационарной теплопроводности для твёрдого тела записывается в полных производных и, при отсутствии внутренних источников тепла, имеет вид [2–4]

$$c\rho D^2 dT/dt = d(\lambda dT/dz)/dz, \quad (5)$$

где z – безразмерная поперечная координата стенки ($z = Z/D$).

Найдём его приблизительное решение относительно термосопротивления для плоской однородной стенки, задаваясь начальным условием, связанным с изменением наружной температуры $T_{\text{н}}(t)$, которое будем считать единственной причиной нестационарности. Задача заключается в том, чтобы определить, когда это происходит квазистационарно, и в уравнении (5) можно пренебречь производной по времени, а когда – нет.

Проинтегрируем (5) по координате z , принимая нулевым значение координаты на внутренней поверхности стенки:

$$c\rho D^2 \int_0^z (dT(z,t)/dt) dz = \lambda dT/dz - \lambda (dT/dz)_{z=0}, \quad (6)$$

где $-\lambda(dT/dz)_{z=0}=q$ – плотность теплового потока через внутреннюю поверхность стенки, для которой предполагаются стабильные условия теплосодержания ($T_B(t) \approx \text{const}$).

Второе интегрирование проведём по всей толщине стенки D от 0 до 1:

$$c\rho D^2 \int_0^1 dz \int_0^z (dT(z,t)/dt) dz = -\lambda \Delta T + qD, \quad (7)$$

где $\Delta T = T_B - T_H$ – температурный перепад в стене.

Изменяя порядок интегрирования и дифференцирования в левой части, получим скорость изменения дважды усреднённой температуры стенки:

$$d \langle T \rangle / dt = \langle T(t) \rangle' = d \left[\int_0^1 dz \int_0^z T(z,t) dz \right] / dt. \quad (8)$$

Введённая здесь величина $\langle T \rangle$ представляет собой усреднённую по толщине среднemasсовую температуру стены (здесь и далее знаком « $\langle \rangle$ » обозначается производная по времени).

Из (7) с обозначением (8) следует нестационарный аналог уравнения (2) из [1]:

$$R = [\Delta T(t) + \langle T(t) \rangle' c\rho D^2 / \lambda] / q(t), \quad (9)$$

где $R = D / \lambda [1 - 6]$ – термическое сопротивление одной стенки.

Заметим, что сомножитель средней скорости изменения температуры с точностью до численного множителя π^{-2} совпадает с $\tau_{и}$ (1).

Выражение (9) можно преобразовать к другому виду, более удобному для анализа решений с граничными условиями II рода:

$$R = \Delta T(t) / [q(t) - \langle T(t) \rangle' c\rho D]. \quad (10)$$

Следует отметить, что при получении выражений (9) и (10) не использовалось граничное условие постоянства внутренней температуры и они применимы при гораздо более общей постановке задачи, чем предпринята здесь.

Полученные зависимости отражают влияние $T(z,t)$ в толще стены на соотношение $\Delta T(t)/q(t)$, определяя его отклонения от квазистационарного значения (2) [1]:

$$\Delta T(t)/q(t) = R. \quad (11)$$

Эти отклонения, как видно из уравнений (9), (10), бывают двух типов:

– стена греется, $\langle T \rangle' > 0$, текущие значения $\Delta T(t)/q(t) < R$ (разница температур уменьшается быстрее теплового потока);

– стена остывает, $\langle T \rangle' < 0$, текущие значения $\Delta T(t)/q(t) > R$ (разница температур растёт быстрее теплового потока).

Оба эти случая иллюстрируют рис. 1–3 из [1].

Условие квазистационарности, или пренебрежимо слабой зависимости искомого соотношения параметров от времени, следует из уравнения (9): правая часть должна с точностью до допустимой погрешности измерений (15 % [6]) не отличаться от $\Delta T(t)/q(t)$:

$$\Delta T(t)\beta \geq c\rho D^2 |\langle T(t) \rangle'| / \lambda, \quad (12)$$

или, учитывая (1),

$$|\langle T(t) \rangle'| \leq \Delta T(t)\beta / \pi^2 \tau_{и}, \quad (13)$$

где $\beta = 0,15$ – относительная погрешность измерений.

Это условие медленного изменения средней температуры. Его можно назвать температурно-скоростным, так как оно накладывается на скорость изменения температуры. Перейдём к его детальному исследованию.

Связь с внешними условиями

Найдём значение температуры из формулы (8), дважды усреднённое по толщине стены. Сделаем оценку в приближении квазистационарности, в рамках которого мы и проводим данный анализ, так как интересуемся лишь квазистационарными значениями исследуемых величин. Воспользуемся линейной зависимостью $T(z)$, имеющей место в стационарных условиях:

$$T = T_B \Delta z + T_H z, \quad (14)$$

где $\Delta z = 1 - z$.

Подставляя (14) в двойной интеграл из (8), получаем:

$$\langle T \rangle = \int_0^1 dz \int_0^z T dz = T_B / 3 + T_H / 6. \quad (15)$$

То есть в пределе линейного распределения температур среднее возмущение втрое меньше внутреннего ($z=0$) и вшестеро наружного ($z=1$), симметрия отсутствует. Учитывая, как и выше, лишь временную зависимость наружной температуры, из (15) получаем соотношение

$$d \langle T \rangle / dt = T_H(t)' / 6, \quad (16)$$

которое вместе с $\tau_{и}$ подставим в (9):

$$R = [\Delta T(t) + \pi^2 \tau_{и} T_H(t)' / 6] / q(t). \quad (17)$$

Такую же замену следует произвести в неравенстве (13), которое приобретает следующий, окончательный вид:

$$|T_n(t)'| \leq 0,09 \Delta T(t) / \tau_{и} = |T_n(t)'|^{max}. \quad (18)$$

Здесь упрощён численный множитель, с точностью до 1,3 % равный: $6\pi^{-2}\beta \approx 0,09$.

Полученное температурно-скоростное условие (18) дополняет условия (1)–(3), вместе составляя основу стационарной методики теплофизического эксперимента по измерению термического сопротивления наружных стен зданий. Отметим, что его можно включить прямо в численную обработку снимаемой «температурной истории», строя временной ход $dT_n(t)/dt$ и отсекая участки, не удовлетворяющие этому условию.

Уточнение критериев квазистационарности

Итак, вместо условия (13), ограничивающего среднюю скорость изменения температуры стенки, мы получили условие (18), ограничивающее скорость изменения наружной температуры, непосредственно измеряемой в экспериментах. Это позволяет уточ-

нить условия квазистационарности (1)–(3), получив последние критерии нашего исследования.

Производную $\langle T(t) \rangle'$ приближенно представим в усреднённом виде:

$$d\langle T(t) \rangle / dt \approx \Delta \langle T \rangle / \Delta t,$$

где Δt – время, за которое происходит изменение средней температуры стены на величину $\Delta \langle T(t) \rangle$.

Воспользоваться этим выражением можно, только доопределив $\Delta \langle T \rangle$ и Δt .

Из всего многообразия тепловых возмущений наружных стен мы выделили три характерных случая, иллюстрируемых рис. 1. Один из них соответствует медленным квазистационарным изменениям наружной температуры, отвечающим условию (1) (правая сторона рис. 1 а). В таком приближении и проведено наше рассмотрение с получением соотношения (16):

$$\Delta \langle T(t) \rangle = \Delta T_n / 6, \quad (19 а)$$

и итогового условия (18), в котором для T_n тоже полагаем:

$$dT_n(t) / dt \approx \Delta T_n / \Delta t.$$

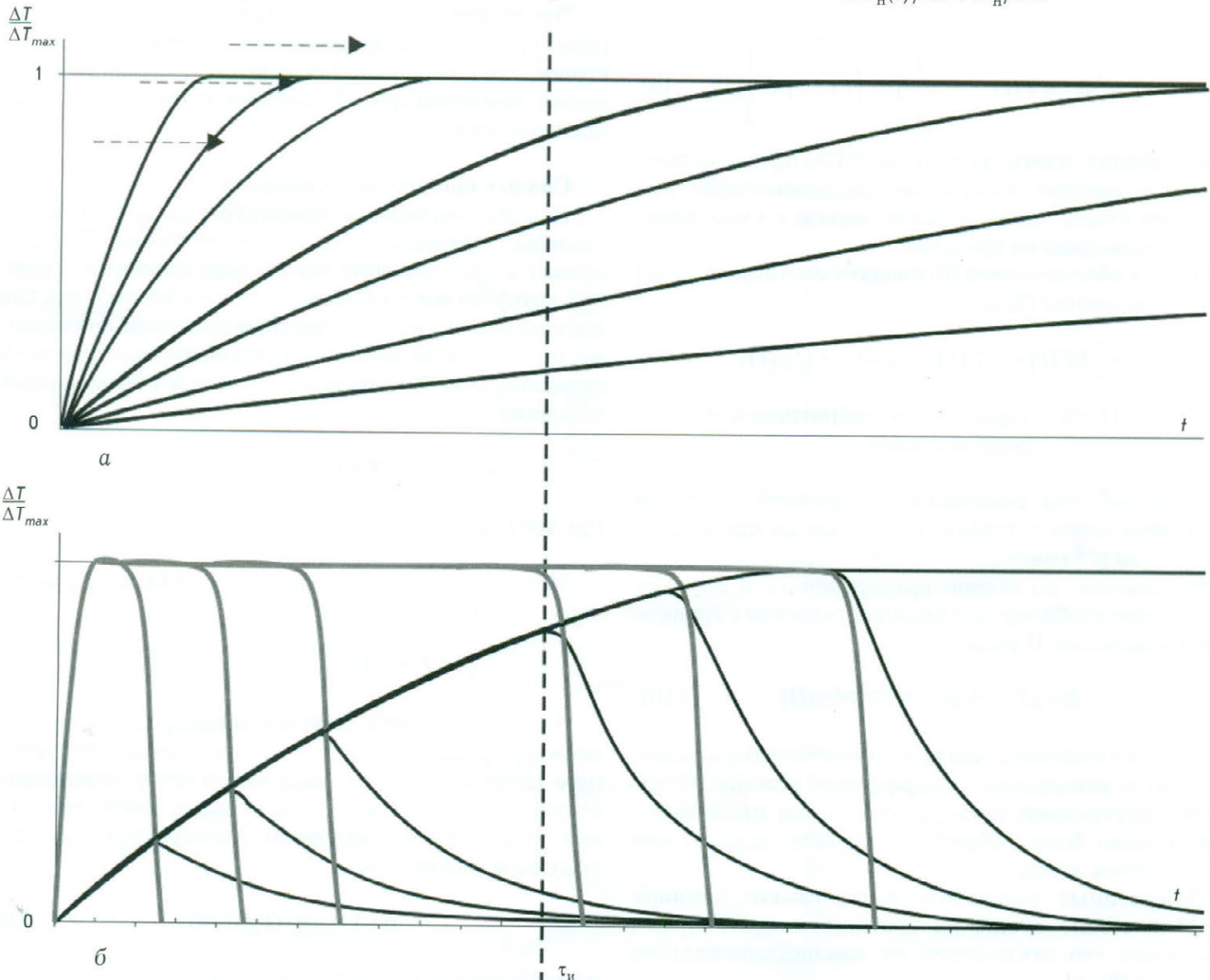


Рис. 1. Виды тепловых возмущений и реакция на них стены: а – температурные перепады с разным временем нарастания; б – тепловые импульсы разной продолжительности

Время усреднения Δt в данном случае просто отсчитывается от начала возмущения:

$$\Delta t = t, \quad (20 \text{ а})$$

и условие (18) принимает вид:

$$t \geq \tau_{и} \theta, \quad (21)$$

где $\theta = |\Delta T_{н}| / 0,09 \Delta T$.

Подобного результата и следовало ожидать: процесс теплопередачи становится квазистационарным только при достаточно медленно нарастающем внешнем воздействии. Температурно-скоростное условие (18) записано здесь в виде временного критерия.

Выполнение условия квазистационарности (21) иллюстрируют жирные кривые на рис. 1 а, совмещающие в себе при $t > \tau_{и}$ ход температуры снаружи и внутри стены, что и отражает квазистационарную реакцию стены на продолжительные тепловые возмущения.

Два других случая соответствуют нестационарным тепловым возмущениям малой длительности, отвечающим условию $t < \tau_{и}$, обратному (1). Они показаны в левой части рис. 1 тонкими линиями, для которых $\Delta T_{\max} = \Delta T_{н}$. Первый из них характеризуется резким изменением наружной температуры (рис. 1 а). Второй случай – это короткий тепловой импульс произвольной формы (рис. 1 б).

Время усреднения Δt при $t < \tau_{и}$ в обоих случаях определяется тепловым откликом стены, то есть $\tau_{и}$:

$$\Delta t = \tau_{и}, \quad (20 \text{ б})$$

поскольку средняя температура стены $\langle T \rangle$ быстрее изменяться просто не может, это предел для Δt .

Для первого нестационарного случая этим и ограничиваются отличия от квазистационарного состояния, так как изменение средней температуры стены $\Delta \langle T \rangle$ за время усреднения $\sim \tau_{и}$ тоже можно оценивать из квазистационарного соотношения (19 а) и применять условие (18). Тогда в неравенстве (21) надо лишь заменить t на $\tau_{и}$, что даёт условие для резкого изменения наружной температуры:

$$\theta = |\Delta T_{н}| / 0,09 \Delta T \leq 1. \quad (22)$$

Соответствующее поведение температуры внутри стены для таких тепловых возмущений, продолжительностью меньше $\tau_{и}$, описывает верхняя жирная кривая рис. 1 а. При выполнении (22) конечный перепад среднemasовых температур стены $\Delta \langle T \rangle = \Delta T_{\max}$ находится в пределах допустимой погрешности, так что даже сам нестационарный участок можно считать квазистационарным.

Во втором нестационарном случае дело обстоит сложнее, поскольку изменение наружной температуры равно 0 большую часть времени усреднения $\Delta t = \tau_{и}$ и говорить, что за это время наружная температура изменилась на $\Delta T_{н}$, нельзя. Изменение $\Delta T_{н}$

происходит в течение малого времени температурного импульса t , за которое стена успевает воспринять лишь долю его амплитуды, равную $t / \tau_{и}$. Для учёта этого обстоятельства в выражении (22) вместо $|\Delta T_{н}|$ надо подставить величину $|\Delta T_{н}| t / \tau_{и}$, которая в этом случае определяет изменение средней температуры стенки за время усреднения $\Delta t = \tau_{и}$. При этом вместо (19 а) имеем

$$\Delta \langle T \rangle \approx \Delta T_{н} t / 6 \tau_{и}. \quad (19 \text{ б})$$

В итоге получаем условие для одиночных импульсов:

$$t \leq \tau_{и} / \theta. \quad (23)$$

Поведение температуры внутри стены во время действия внешних тепловых импульсов описывают соответствующие этому времени участки жирной кривой рис. 1 б, а после окончания внешнего воздействия – кривые релаксации температуры до её прежнего стационарного уровня, отвечающего ординате 0. При выполнении (23) эти изменения не превышают погрешности измерений и ими можно пренебречь.

Сопоставление критериев

Сравнивая последние критерии (21)–(23) с критериями (1)–(3), введёнными в начале статьи, видим их попарную взаимосвязь. Условие (1) является прообразом условия (21), условие (2) – (22), условие (3) – (23). Таким образом, можно говорить об уточнении и дополнении полученных ранее критериев квазистационарности. Рассмотрим эти уточнения.

Наиболее просто преобразовался температурный критерий (2), став строже благодаря сомножителю 0,09 в левой части (22). Во временных критериях (21) и (23), в отличие от (1) и (3), появилось соотношение температурных перепадов θ' , связывающее их с температурным критерием. Более того, температурный критерий является необходимым и достаточным условием квазистационарности для всех рассматриваемых случаев, поскольку смягчает критерий (21) по отношению к условию (1), а критерий (23) – к (3). Этого и следовало ожидать, поскольку физическое влияние температурных колебаний должно слабеть с уменьшением их амплитуды независимо от других факторов, становясь несущественным при выполнении (22) даже, если условия (1) и (3) не выполняются.

При нарушении (22) условия (21) и (23) ещё могут соблюдаться, хотя и становятся более строгими, чем (1) и (3), соответственно. При таких больших температурных скачках квазистационарность достижима для медленно нарастающих или коротко-импульсных возмущений. Быстрое нарастание с нарушением условий (1) или (21) происходит нестационарно. Критерием квазистационарности после его прекращения является условие (1).

Таким образом, температурные критерии (22) и (2), требуя всегда своего учёта, напрямую применимы к случаю температурных скачков, продолжительность которых определяет временной критерий (21).

Частотно-временные критерии (23) и (3) применимы к случаю коротких импульсов, описанных в третьем разделе настоящей статьи, и позволяют исключить высокочастотные колебания наружной температуры. Критерий (1) применим во всех случаях как главный временной ориентир нестационарности, особенно на этапе релаксации.

Уточнение критериев нестационарности

Определим теперь условия нестационарности, начиная с простого случая резких скачков температуры: $t_{ск} < \tau_{и}$. Он уже был упомянут нами в этой связи как нестационарный при нарушении условия (22), то есть при

$$\theta > 1. \quad (24)$$

Выполнение (24) означает достаточно резкое изменение $T_{н}$, особенно зимой ($|\Delta T_{н}| \geq 1,5$ К). Этот случай отвечает верхней жирной кривой на рис. 1 а, 1 б, которая в своей левой нарастающей части описывает нестационарный этап. Условие (24) является уточнением температурного условия нестационарности (4 б).

Временное условие нестационарности (4 а) принимает следующий вид. Времена нестационарных температурных скачков и импульсов получаются из условий, обратных (21) и (23), соответственно:

$$0 < t_{ск}/\tau_{и} < \theta, \quad \theta^{-1} < t_{им}/\tau_{и} < 1. \quad (25)$$

Эти диапазоны имеют физический смысл только при выполнении (24). Тогда нестационарный режим теплопередачи возникает в соответствующих (25) окрестностях $\tau_{и}$, которые и являются уточнением условия (4 а). (Тепловые импульсы считаем нестационарными лишь при $t_{им}/\tau_{и} < 1$ (см. рис. 1 б).

Нестационарный этап на рис. 1 а включает в себя времена $t=0 \div \tau_{и}\theta$. Нестационарность на рис. 1 б отвечает временам $t=0 \div \tau_{и}$.

Следует отметить, что после окончания тепловых возмущений нестационарный этап релаксации тоже длится в течение времени $\sim \tau_{и}$ (рис. 1 б).

Итак, необходимым условием нестационарности всех видов тепловых возмущений является температурный критерий (24), при выполнении которого рост или спад наружной температуры за время $t < \tau_{и}\theta$ вызывает нестационарную тепловую реакцию стены. При этом температурные импульсы продолжительностью $t_{им}/\tau_{и} = \theta^{-1} \div 1$ тоже оказывают нестационарное влияние на теплопередачу.

Применение полученных критериев

Таким образом, теоретические оценки показывают, что при обычных исследованиях тепловых характеристик ограждающих конструкций зданий и сооружений можно пользоваться квазистационарной методикой. Время установления квазистационарного состояния теплопередачи, за редким исключением, составляет от нескольких часов до нескольких суток. В ещё большей мере это относится к практически безинерционным стеклозащитным конструкциям, проводящим тепло за доли минут.

Данный подход основан на поиске таких состояний, точнее, промежутков времени их существования. Вычислить термическое сопротивление в этих условиях можно просто по формуле (11). Её использование подразумевает измерение трёх главных параметров теплопередачи: наружной и внутренней температур стенки и теплового потока через неё.

При обработке результатов измерений необходимо исключить поверхностные высокочастотные колебания, шумы и биения статистическими методами, задавая время тепловой инерции и в качестве масштаба усреднения. В соответствии с нормативной методикой, конечные значения термического сопротивления R ещё раз усредняются уже по всему времени жизни квазистационарного состояния, которое для достоверности получаемых результатов должно быть не меньше того же времени тепловой инерции:

$$t > \tau_{и}$$

Анализ экспериментальных данных следует делать на основе полученных выше условий квазистационарности:

- временным критериям (1), (21) и (3), (23);
- температурному критерию (2), (22);
- температурно-скоростному критерию (13), (18).

Временные критерии дают численные ориентиры времени релаксации тепловых возмущений, необходимые как для предварительного анализа применимости квазистационарной методики, так и для понимания тепловых свойств исследуемых стен. В простых случаях они могут применяться вместо остальных критериев (например, для высокочастотных колебаний).

Температурный критерий, в случае его выполнения, самодостаточен. Небольшие изменения температуры в пределах допустимой погрешности не влияют на результат, даже если они происходят нестационарно.

Температурно-скоростной критерий позволяет ввести в численную обработку данных отсечение нестационарных участков температурной истории. Для этого надо по измеренному временному ходу наружной температуры $T_{н}(t)$ построить временной ход её производной $dT_{н}(t)/dt$, к которому условие (18) применимо непосредственно. Остаётся только определить область допустимых значений $dT_{н}(t)/dt$, соответствующую погрешности метода, и исключить нестационарные участки.

Эти критерии выполняются в зимних условиях, обеспечивающих мощный тепловой поток через стены, на фоне которого несущественны температурные флуктуации. Летом тепловой поток практически отсутствует, в связи с чем чрезмерно возрастает погрешность измерений, делающая любую методику теплового обследования неэффективной.

Далеко не все флуктуации температуры наружного воздуха нарушают тепловой режим внешнего ограждения зданий. Различаются тепловые возмущения трёх видов: длительные, коротко-импульсные и резконарастающие (рис. 1). Для каждого из них существует своё условие квазистационарности (21)–(23). Высокочастотные (кратковременные) колебания

затрагивают только поверхностные слои ограждений, создавая лишь шум и биения на измеряемой температурной кривой. Медленные тепловые изменения происходят квазистационарно. Нестационарность как релаксация мощных тепловых воздействий возникает при наличии температурного скачка.

Результаты теплофизического эксперимента, приведённые в [1], подтверждают изложенные здесь представления.

Выводы

Исследование систематизирует условия существования квазистационарных и нестационарных состояний теплопередачи наружных стен, давая тем

самым определённые методические рекомендации для их теплового неразрушающего контроля. Однако работу нельзя считать завершённой, поскольку здесь не охвачены следующие проблемы:

1. Конкретизация известных математических решений применительно к большому числу случаев, соответствующих многообразию тепловых возмущений наружных стен.

2. Учёт двух, трёх и более слоёв в стене и влияние слоистости на условия квазистационарности.

3. Проведение подробного сопоставления с натурным и численным экспериментом.

4. Разработка на этой основе квазистационарной методики теплового неразрушающего контроля.

Литература

1. Коршунов О. В., Зуев В. И. Измерения термического сопротивления наружных стен зданий // Энергобезопасность и энергосбережение. – 2011. – № 2. – С. 40–45.
2. Телегин А. С., Швыдкий В. С., Ярошенко Ю. Г. Тепломассоперенос: Учебник для вузов. 2-е изд. / Под ред. Ю. Г. Ярошенко. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2002. – 455 с.
3. Петухов Б. С., Генин Л. Г., Ковалев С. А., Соловьев С. Л. Теплообмен в ядерных энергетических установках. 3-е изд. Гл. 2. Уравнение теплопроводности и методы его решения. – М.: Изд. МЭИ, 2003.
4. Лыков А. В. Теория теплопроводности. – М.: Высшая школа, 1967.
5. Фокин К. Ф. Строительная теплотехника ограждающих частей зданий. 5-е изд. – М.: АВОК-ПРЕСС, 2006. – 256 с.
6. ГОСТ 26254-84. Здания и сооружения. Метод определения сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций. Введ. пост. Гос. ком. СССР по делам строительства 2.08.84, № 127. – М., 1985.

Applicability of the quasi-stationary method for determining the thermal resistance of walls

O. V. Korshunov,

Ph.D., Senior Researcher, Joint Institute for High Temperatures

V. I. Zuev,

Head of Laboratory of the Technological Institute of Energy survey, diagnosis and nondestructive testing «Vemo»

On the basis of physical analysis of heat transfer process and solution of unsteady heat conduction equation derived and systematized a set of criteria to determine the existence of quasi-steady and non-steady thermal states of external walls for various types of heat disturbances. Thus, given reasonable guidelines for the thermal non-destructive testing of walls through the identification of quasi-stationary conditions of heat transfer.

Keywords: *quasi-steady, thermal resistance of walls, heat transfer, unsteady.*

ЭНЕРГОБЕЗОПАСНОСТЬ И ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ

2011 **3**

май -
июнь



О нормативном регулировании
и стандартизации в охране труда
(стр. 3)



Mathcad на службе инженера-электрика.
Оптимизация аварийного запаса оборудования
с учетом экономического фактора
(стр. 41)

Санитарно-эпидемиологические требования к
условиям проживания в жилых зданиях и помещениях
(стр. 52)