



Технологии НК

Сопротивление теплопередаче ограждающих конструкций R является основным показателем теплозащиты зданий, и его минимальное требуемое значение установлено строительными нормами (СНиП 23-02-2003 «Тепловая защита зданий»). Данные о проектом и фактическом значении R должны быть внесены в теплоэнергетический паспорт здания, являющийся обязательной частью технической документации.

Способ расчета R , определенный в ГОСТ 26254-84 «Здания и сооружения. Методы определения сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций», очень прост. Сопротивление теплопередаче вычисляют как $R = \Delta T / q$, где ΔT и q – соответственно средние значения температурного напора (разности температур воздуха внутри помещения и атмосферного воздуха) и плотности

Heat Transmission Resistance of Building Enclosing Structures: In-Situ Measurements

A. V. Shishkin

Сопротивление теплопередаче R можно определить по измеряемым средним значениям разности температур воздуха внутри помещения и атмосферного воздуха и плотности теплового потока с поверхности ограждающей конструкции с учетом динамики теплового поля. Иначе погрешность, обусловленная непериодическими изменениями природных условий, будет очень велика, и будут необходимы долговременные измерения.

теплового потока с поверхности ограждающей конструкции за длительный интервал времени.

Способ «средних значений» помимо долгого времени измерений нуждается в большой величине температурного напора. Последнее означает, что измерения можно выполнять только в холодное время года или же – специально разогреть помещения.

Необходимое значение величины ΔT определяется исходя из заданной относительной погрешности вычисления сопротивления теплопередаче, которая определяется, главным образом, аппаратурной погрешностью измерения средней плотности теплового потока: $\delta q = \Delta q / q$, где Δq , Вт/м², – абсолютная погрешность измерения плотности теплового потока. Относительной погрешностью измерения ΔT можно пренебречь, и тогда $\delta R = R \Delta q / \Delta T$.

При аппаратурной погрешности $\Delta q > 3$ Вт/м² (для серийных приборов ИТП-11, ИПТПЦ и пр.), $R = 3$ м² К/Вт и требуемой погрешности $\delta R \leq 15\%$ температурный напор должен превышать 60° С. Поэтому для определения R стен современных зданий необходимо с большой точностью измерять плотность теплового потока, а значит – использовать специальную аппаратуру.

Нормативные документы не содержат обоснования необходимой длительности измерений. В ГОСТ 26254-84, п. 5.3. указано: «Продолжительность измерений в натуральных условиях эксплуатации должна составлять не менее 15 суток». Однако

затем данные измерений в то время, когда температура атмосферного воздуха отличалась от средней более чем на 1,5° С, не рассматриваются. Общая продолжительность оставшихся «кусков» графиков $\Delta T(t)$ и $q(t)$, где t – время, должна быть 1–3 суток. В методиках различных фирм общая длительность измерений прямо сокращена до 1–3 суток и лишь при необходимости – увеличивается.

Цель статьи – показать, почему требуются длительные измерения, определить их продолжительность, а также указать на необходимость расчета нестационарного температурного поля, чтобы уменьшить время измерений и правильно определить величину R .

Расчет в способе «средних значений» строится на том, что за достаточно долгое время все отклонения значений $\Delta T(t)$ и $q(t)$ от средних стационарных величин взаимно компенсируются. Так будет только в том случае, если эти функции являются периодическими, и измерения выполняются в течение всего периода. При этом, конечно же, никакие значения нельзя выбрасывать из рассмотрения.

Пусть в течение времени $[t_{\text{start}}, t_{\text{fin}}]$ измеряются температурный напор $\Delta T(t)$ и плотность теплового потока $q(t)$ (с наружной или внутренней поверхностей ограждающей конструкции – не имеет значения).

Теплозащитные ограждающие конструкции обладают значительной «тепловой инерцией». Необходимо длительное время для того, чтобы температурное

Об авторе



Шишкин Андрей Викторович
Санкт-Петербург. Специалист по теплотехническому обследованию объектов жизнедеятельности человека, канд. техн. наук

поле преобразовалось под изменившиеся граничные условия (температуру воздуха). Это время релаксации зависит от температуропроводности (частного от деления теплопроводности на плотность и теплоемкость) и толщины ограждающей конструкции. Для типичных теплозащитных стен и перекрытий зданий в качестве длительности релаксации достаточно принять 2–3 суток.

риодического, равного стационарному, составляет от 0,9 до 2,8 Вт/м² для теплового потока с внутренней стороны стены. Для теплового потока с наружной стороны стены Δq_m изменялась в пределах 1,4–4,5 Вт/м². По окончании времени релаксации дальнейшее среднее систематическое отклонение Δq_m не превышало 0,6 Вт/м² для такого же интервала времени.

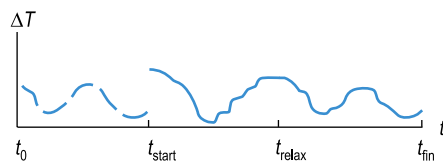


Рис. 1. График разности температуры воздуха с внутренней и наружной сторон ограждающей конструкции, $\Delta T(t)$; пунктирная линия – периодическое продолжение $\Delta T(t)$ до момента t_{start}

На это время приходится 90 % отличия величины плотности теплового потока или температуры поверхности стены от значений, соответствующих новым граничным условиям. Время релаксации можно назвать «переходным процессом», временем, по прошествии которого «забывается» начальное условие или за пределами которого предшествующая история не влияет на температурное поле.

Поэтому, если до момента t_{start} граничные условия не совпадали с пунктирной линией на рис. 1, то только по истечению времени релаксации, начиная с t_{relax} , плотность теплового потока будет соответствовать графику граничных условий – $\Delta T(t)$ на интервале времени $[t_{\text{start}}, t_{\text{fin}}]$. В зоне релаксации $[t_{\text{start}}, t_{\text{relax}}]$ график $q(t)$ будет отличаться от того, который был бы при периодическом процессе.

Это отличие, собственно, и обуславливает погрешность определения сопротивления теплопередаче по способу «средних значений». Ее можно непосредственно рассчитать на компьютере. Для этого необходимо рассматривать больший временной интервал, включающий предшествующее время релаксации (на рис. 1 – это интервал $[t_0, t_{\text{fin}}]$, где $[t_0, t_{\text{start}}] = [t_{\text{start}}, t_{\text{relax}}]$).

Такие расчеты для разных фактических «спокойных» графиков температуры атмосферного воздуха в течение 4–7 суток и постоянной температуры воздуха внутри помещения показали, что Δq_m – систематическое отклонение среднего значения плотности теплового потока в зоне релаксации $[t_{\text{start}}, t_{\text{relax}}]$ от среднепе-

Пример расчетов для максимально-го дополнительного теплового потока переходного процесса $\Delta q_m(t)$ показан на рис. 2. Конечно же, погрешность Δq_m , обусловленная отличием функции $\Delta T(t)$ от периодической, может быть различной в зависимости от природных условий. Кроме того, помимо непериодического изменения температуры атмосферного воздуха, дополнительную погрешность могут вызвать также изменения других условий теплообмена. Фактическое значение Δq_m следует вычислять для каждого конкретного случая. При этом можно оптимизировать выбор интервала $[t_{\text{start}}, t_{\text{fin}}]$, чтобы добиться минимальной погрешности.

Если такие расчеты не осуществлены, то в качестве ожидаемой погрешности в среднем значении плотности теплового потока на интервале релаксации можно использовать указанные выше максимальные величины, полученные по фактическим графикам температуры атмосферного воздуха. Для теплового потока, измеряемого с внутренней поверхности стен, $\Delta q_m = 3$ Вт/м², а для теплового потока с наружной стороны стены $\Delta q_m = 5$ Вт/м². Реальная величина Δq_m может оказаться еще больше.

Относительная погрешность δR_m определения сопротивления теплопередаче, обусловленная непериодичностью функций граничных условий, будет тем меньше, чем больше длительность интервала измерений: $\delta R_m = \delta q = \frac{\Delta t_{\text{relax}} \Delta q_m}{(\Delta t q_m)} = \frac{\Delta t_{\text{relax}} R \Delta q_m}{(\Delta t \Delta T)}$, где Δt_{relax} , сутки, – интервал времени релаксации; Δt , сутки, – интервал времени измерения графиков температуры воздуха

и плотности теплового потока $[t_{\text{start}}, t_{\text{fin}}]$; Δq_m , Вт/м², – систематическая погрешность в среднем значении плотности теплового потока на интервале релаксации; q_m , Вт/м², – средняя периодическая, стационарная плотность теплового потока; R , м²К/Вт, – сопротивление теплопередаче; ΔT – средняя разность температуры воздуха (среды) с внутренней и наружной сторон ограждающей конструкции.

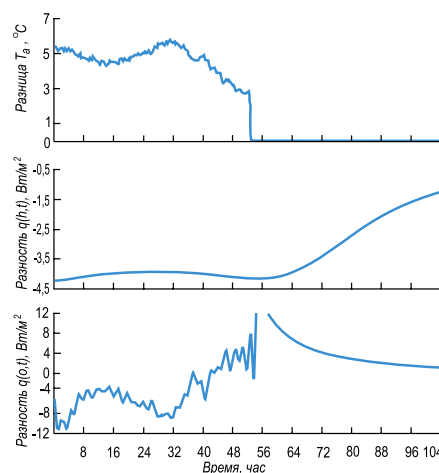


Рис. 2. Различия фактической и периодической функции температуры атмосферного воздуха $T_a(t)$ за 53 ч до начала измерений и вызванное им отличие в плотности теплового потока с внутренней $q(h,t)$ и наружной $q(0,t)$ поверхностей кирпичной стены толщиной 0,5 м (в течение времени релаксации от 53 до 106 ч с внутренней поверхности среднее значение $\Delta q_m = -2,8$ Вт/м², с наружной – $\Delta q_m = 4,5$ Вт/м²)

Чтобы определить R с погрешностью 10 % (учитывая, что еще имеется аппаратурная погрешность измерений), при $\Delta T = 20^\circ \text{C}$, ожидаемой величине $R = 3$ м²К/Вт, времени релаксации 2 суток и измерении плотности теплового потока изнутри, необходимо осуществлять измерения в течение 9 суток. Если $R = 3$ м²К/Вт, время релаксации 3 суток, $\Delta T = 10^\circ \text{C}$, то надо измерять 27 суток. При измерениях изнутри в течение 3 суток, ожидаемой величине $R = 3$ м²К/Вт, времени релаксации 3 суток, $\Delta T = 20^\circ \text{C}$ погрешность δR_m может составить 50 % и более. Учитывая аппаратурную погрешность измерения q при весьма высокой точности в 1 Вт/м², суммарная погрешность определения R может превысить 65 %. Соответственно и результаты определения сопротивления теплопередаче, полученные по данным измерений за трое суток, заранее можно считать неправильными. То же относится и к ГОСТ 26254-84, где расчет R выполняется по отдельным, еще более «коротким» кускам функций $\Delta T(t)$ и $q(t)$.

Окончание на стр. 61



Технологии НК

Detection of Stress Concentration Zones by Metal-Magnetic-Memory Technique

A. A. Dubov

Рассматривается возможность выявления зон концентрации напряжений на примере контроля участка паропровода на блоке № 1 Конаковской ГРЭС. Рекомендовано для сокращения объемов измерений напряженно-деформированного состояния трубопроводов, проводить их предварительное обследование сканирующими приборами, основанными на методе магнитной памяти металла.

Определение зон концентрации напряжений методом магнитной памяти металла

60

Современная диагностика состояния оборудования и конструкций все шире используется при решении задач определения фактических механических характеристик материалов.

При оценке ресурса оборудования, как известно, непременным условием является определение фактического напряженно-деформированного состояния (НДС) с выявлением зон концентрации напряжений (ЗКН) – основных источников развития повреждений – на основе 100 % обследования всего объема металла. Именно ЗКН определяют работоспособность любой конструкции*.

Известно [1], что под действием эксплуатационных нагрузок работа металла оборудования в основном определяется скоплением дислокаций и сдвиговой

деформацией. При этом накопление усталостной повреждаемости металла во многих случаях происходит в условиях мало- и многоциклового рабочей нагрузки. Очевидно, что для оценки фактического НДС конструкции в общем случае необходимо установить ЗКН, обусловленные сдвиговой деформацией. В ходе промышленных исследований показано, что «пассивные» методы диагностики НДС являются наиболее эффективными для выявления ЗКН.

К пассивным методам НК, использующим измерения собственных физических полей конструкций, прежде всего, следует отнести:

- метод акустической эмиссии;
- метод магнитной памяти металла (МПМ).

Эти два метода позволили обеспечить 100 % обследование оборудования в режиме экспресс – контроля и получили широкое распространение.

Как показала практика, применения метода МПМ не требует подготовительных работ на объекте контроля.

На метод МПМ имеются три стандарта России, в т. ч. ГОСТ Р 52005-2003 «Контроль неразрушающий. Метод магнитной памяти металла. Общие требования». С использованием этого метода подготовлено более 30 руководящих документов Госгортехнадзора РФ, действующих в различных отраслях промышленности.

Для определения локальных ЗКН непосредственно на оборудовании предприятием ООО «Энергодиагностика»

разработана серия магнитометрических приборов-измерителей концентрации напряжений (ИКН). Приборы прошли испытания во ВНИИОФИ и в Институте метрологии им. Д. И. Менделеева, и на них получены сертификаты.

При работе на оборудовании этими приборами используется естественная намагниченность (магнитная память металла), сложившаяся в условиях изготовления и эксплуатации оборудования. В качестве образца для сравнения (эталоны) в методе МПМ используется магнитограмма, измеряемая в зонах с удовлетворительным состоянием металла, т.е. вне ЗКН. Затем на основе сравнения магнитограмм в ЗКН и вне ее делается оценка НДС оборудования.

Основным диагностическим параметром НДС по методу МПМ является градиент магнитного поля рассеяния H_p (dH/dx), фиксируемый при сканировании датчиком прибора типа ИКН вдоль поверхности оборудования. Установлено, что этот диагностический параметр в силу магнитомеханического эффекта отображает энергетическое состояние поверхности и глубинных слоев металла в ЗКН.

На рис. 1 представлены результаты контроля участка паропровода острого пара (нитка Б), полученные на энергоблоке № 1 Конаковской ГРЭС. Из

* ЗКН – локальная зона изделия, в которой возникла большая деформация по сравнению со средней деформацией по всему объему изделия, обусловленная неудачным сочетанием особенностей конструкции, неоднородности структуры материала и рабочими нагрузками.

Об авторе

Дубов Анатолий Александрович
Генеральный директор ООО «Энергодиагностика» (г. Москва), доктор технических наук, профессор.

рис. 1б (нижняя часть графика) видно, что градиент нормальной составляющей поля (dH/dx) при пересечении трещины Tr_1 , имеющей длину 60 мм и большее раскрытие, имеет значение в 1,5 раза меньше, чем при пересечении трещины Tr_2 , имеющей длину 7 мм и меньшее раскрытие. Видно также, что градиент поля в зоне КН оказался примерно равным

величина (оценка велась по нормальной составляющей поля H_p) значительно превышает предел прочности металла паропровода (сталь 15Х1М1Ф, $\sigma_B \approx 500 \div 700$ МПа). Это хорошо согласуется с известным положением о том, что на острие трещины уровень концентрации напряжений может достигать критического значения.

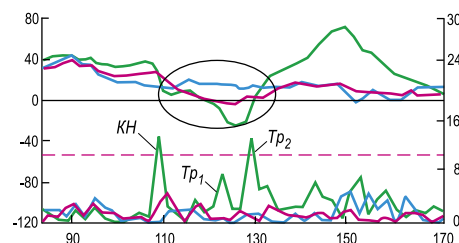
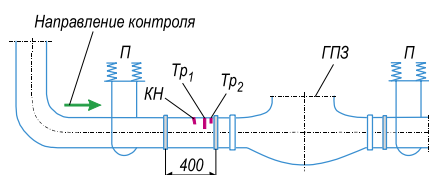


Рис. 1. Результаты контроля участка паропровода острого пара вблизи ГПЗ на блоке № 1 Конаковской ГРЭС: КН — концентрация напряжений; Tr_1 — трещина длиной 7 мм и глубиной до 1,5 мм; Tr_2 — трещина длиной 60 мм и глубиной до 10 мм; П — подвески; стрелкой указано направление сканирования датчиком при контроле

градиенту поля, полученному на трещине Tr_2 , находящейся в начальной стадии развития.

Оценка абсолютных значений уровня остаточных напряжений, в зоне КН (рис. 1), выполненная по разработанной ООО «Энергодиагностика» методике, показывает, что в данном случае эта

В работе [2] представлены различные примеры из практики, иллюстрирующие возможности метода МПМ при поиске ЗКН и оценке НДС не только трубопроводов, но и других различных узлов оборудования и конструкций.

В практических работах непосредственно на оборудовании показано,

что абсолютная величина напряжений в локальной ЗКН, характеризующаяся линиями скольжения с максимальными значениями градиента магнитного поля, перед началом развития микротрещины на порядок больше условного предела прочности металла.

В работе [3] изложен опыт испытаний газопроводов с использованием метода МПМ, в ходе которых были представлены различные методы и средства определения НДС. По результатам испытаний рекомендовано для сокращения объемов измерений НДС трубопроводов проводить их предварительное обследование сканирующими приборами, основанными на методе магнитной памяти металла.

Литература

1. Власов В. Т., Дубов А. А. Физические основы метода магнитной памяти металла. — М.: ЗАО «Тиссо», 2004. — 424 с.
2. Дубов А. А. Диагностика прочности оборудования и конструкций с использованием магнитной памяти металла. — Контроль. Диагностика. 2001. № 6. С. 19–30.
3. Дубов А. А., Демин Е. А., Миляев А. И., Стеклов О. И. Контроль напряженно-деформированного состояния газопроводов. — Газовая промышленность. 2004. № 2. С. 58–61.

Статья получена 1 февраля 2005 г.

А. В. Шишкин

Натурные измерения сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций зданий

Окончание. Начало на стр. 59

Для адекватной обработки данных измерений, расчета реального значения сопротивления теплопередаче и определения фактической погрешности даже при таком простом способе «средних значений» необходимо вычислять нестационарное температурное поле элементов ограждающих конструкций по измеренным граничным условиям (температуре воздуха). Другой путь — осуществлять измерения в течение вполне достаточного времени, например, 27 суток.

Таким образом, можно сформулировать правила, которые необходимо соблюдать для определения величины сопротивления теплопередаче различных элементов ограждающих конструкций в натурных условиях:

- аппаратную погрешность в величине ожидаемого сопротивления теплопередаче следует рассчитывать по формуле $\delta R = R \Delta q / \Delta T$, для чего доста-

точно знать приборную погрешность измерения плотности теплового потока и среднюю величину температурного напора — разности температуры воздуха внутри и снаружи здания;

- длительность измерений графиков температуры воздуха должна быть не менее двух периодов релаксации температурного поля ограждающей конструкции — от 2 до 6 суток; плотность теплового потока целесообразно измерять через 1–3 суток после начала измерений температуры; во время измерений не должно быть другого теплового воздействия на ограждающую конструкцию (солочной радиации, выпадения или испарения влаги, длительных и сильных изменений условий теплоотдачи);
- нестационарное температурное поле ограждающей конструкции следует рассчитывать по измеренным граничным условиям — графикам температуры воздуха, используя для расчета проек-

ные теплотехнические и геометрические параметры ограждающей конструкции;

- величину сопротивления теплопередаче следует определять по наилучшему совпадению расчетного и измеренного графиков плотности теплового потока после времени релаксации от начала графиков измеренной температуры; другой способ — по формуле $R = \Delta T / q$, но к среднему значению плотности теплового потока надо добавить расчетную поправку Δq_m ;
- без расчета нестационарного температурного поля ограждающей конструкции достоверность определения фактической величины сопротивления теплопередаче методом «средних значений» может быть достигнута только увеличением времени измерений, которое можно оценить по формуле $\delta R_m = \Delta t_{relax} R \Delta q_m / (\Delta t \Delta T)$.

Статья получена 4 ноября 2004 г.;
в окончательной редакции — 31 мая 2005 г.