Комплексный тепловой контроль зданий и строительных сооружений

Будадин Олег Николаевич

Директор Технологического института энергетических обследований, диагностики и НК «ВЕМО», г. Москва, д. т. н., академик Российской академии космонавтики.

Троицкий-Марков Тимур Евгеньевич

Председатель Совета Директоров Технологического института энергетических обследований, диагностики и НК «ВЕМО», г. Москва.

Абрамова Елена Вячеславовна

С. н. с. «ВЕМО», к. т н.
Научные интересы: голографическая интерферометрия, тепловой НК.

Задачи обеспечения требований энергоэффективности зданий и строительных сооружений решаются благодаря:

- созданию энергоэффективных проектов строительства новых зданий и строительных сооружений и реконструкции эксплуатируемого фонда в соответствии с принятыми нормативными требованиями к их энергопотреблению;
- высокой культуре производства при использовании современных материалов и технологий;
- своевременной и обязательной диагностике реального состояния вновь возводимых, эксплуатирующихся и реконструируемых объектов.

Если два первых условия выполняются проектными и строительными фирмами, то последнее должно осуществляться независимыми экспертными организациями, обладающими соответствующими полномочиями, квалифицированными специалистами и аппаратурой.

В целях определения энергосберегающих характеристик и тепловых потерь объекты в различных

отраслях промышленности (энергетике, металлургии, машиностроении) и жилищном хозяйстве могут с высокой эффективностью диагностироваться на основе анализа их температурных полей. Регистрация и анализ изменения температуры во времени и по поверхности позволяют выявлять наличие дефектов или повреждений в контролируемом объекте, признаки нештатных ситуаций при эксплуатации, а также определять реальные теплотехнические характеристики ограждающих конструкций.

Определяющими теплотехническими характеристиками качества строительства являются **величина приведенного сопротивления теплопередаче ограждающей конструкции здания, положение точки росы, глубина промерзания, промежуток времени, в течение которого возможно функционирование здания при аварийном отключении теплоснабжения и др.**

В настоящее время эти характеристики рассчитываются на стадии проектирования объекта и, согласно [1–9], должны определяться и в реальных условиях эксплуатации.

Следует учитывать, что каждый из конструктивных элементов наружных ограждающих конструкций (НОК) зданий вносит свой вклад в его тепловой баланс, который необходимо учитывать при разработке проектов повышения энергоэффективности НОК. В качестве примера в табл. 1 представлены данные Госстроя России и Московского правительства по средним потерям тепла в домах массовых серий.

Расчетные результаты имеют слишком большую погрешность и не отражают фактические эксплуатационные характеристики строительной конструкции, так как не учитывают наиболее важный этап между ее проектированием и эксплуатацией — этап строительства.

Табл. 1

Конструктивные элементы зданий, через которые происходят потери тепла, в т. ч. сверхнормативные	Доля потерь, %
Стены	32,0 – 36,0
Окна	24,0 – 29,0
Кровля	24,0 (в т. ч. через потолок верхнего этажа – 1,0)
Воздухообмен	9,0 – 37,0
Фундамент	6,0 (в т. ч. через пол первого этажа – 2,0)

На этом этапе проектные характеристики могут быть существенно искажены как в лучшую, так и в худшую сторону, что подтверждается данными, приведенными в табл. 1. Многолетний опыт практической работы по тепловизионному обследованию зданий и строительных конструкций показывает, что сдаваемые в эксплуатацию строительные сооружения часто не соответствуют существующим нормам, например, по энергосбережению. Причина этого — отступления в процессе строительства от проектной документации, изменения в технологии, замена стройматериалов и др., что можно определить только на стадии натурных обследований. В дальнейшей эксплуатации по этой причине может произойти ухудшение характеристик объекта.

Опыт работы авторов в рамках соответствующих постановлений и нормативных документов [6, 7], предусматривающих, в частности, обязательное составление энергетического паспорта здания, показывает, что можно добиться эффективного сокращения теплопотребления на отопление зданий и улучшения качества строительства (рис. 1).

Особо следует отметить необходимость предварительной диагностики перед разработкой проекта ремонта, реконструкции, восстановления требуемых характеристик объекта для определения реального состояния его параметров. Например, перед разработкой проекта утепления фасадов эксплуатирующихся и восстанавливаемых зданий старого фонда, так называемой «санации», надо провести обязательное комплексное тепловизионное обследование НОК с целью определения их реального сопротивления теплопередаче и определения плоскости промерзания как в целом по зданию, так и отдельных его частей.

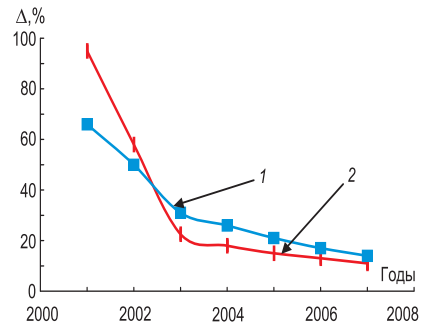

Рис. 1. Изменение доли Δ объектов, не соответствующих нормам энергосбережения, после введения обследований тепловизионным методом с прогнозированием результатов: *1* — административные здания; *2* — жилые здания

Рис. 2 иллюстрирует взаимосвязь качества конструкции (теплопотери через стены) и величины приведенного сопротивления теплопередаче согласно МГСН 2.01–99. Например, увеличение сопротивления

теплопередаче стен до требуемых норм 2-го этапа энергосбережения — 3,16 м^2 град/Вт по сравнению с распространенными в настоящее время характеристиками теплозащиты — 1 м^2 град/Вт позволит снизить теплопотери через стены на 70 %.

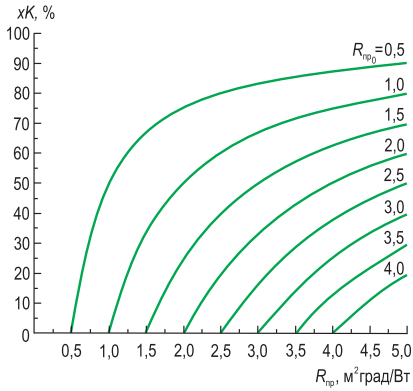

Рис. 2. Зависимость относительных теплопотерь *xK* от приведенного сопротивления теплопередаче $R_{пр}$ для разных начальных значений сопротивления теплопередаче (*K* — коэффициент нормировки, равный 0,32; 0,29; 0,24; 0,09 и 0,08 для стен, окон, кровли, воздухообмена и фундамента соответственно)

Для определения **фактического** состояния строительных объектов авторами разработана и внедрена в практику технология комплексного теплового обследования зданий и строительных сооружений в реальных условиях эксплуатации (в летний и зимний периоды) с определением их характеристик, включающая:

- комплексные тепловизионные обследования строительных конструкций (с определением приведенного сопротивления теплопередаче по стенам и окнам и выявлением дефектов по этому критерию);
- определение положения точки росы и координаты плоскости промерзания;
- определение времени охлаждения воздуха внутри здания при аварийных ситуациях;
- выявление дефектов строительных конструкций;
- рекомендуемую технологию санации для ликвидации сверхнормативных теплопотерь в целом по стенам и окнам и в дефектных зонах.

Кроме того, разработаны и внедрены технологии тепловизионного обследования качества электросилового оборудования строительных сооружений.

Порядок определения $R_{пр}$ на реальных зданиях регламентирован стандартами, строительными нормами и правилами [1, 2, 5]. Однако изложенные в них процедуры основаны на прямых измерениях температур и плотностей тепловых потоков и применимы лишь в ограниченные периоды времени (при стационарной низкой температуре

наружного воздуха). На практике такое наблюдается крайне редко, поэтому данные технологии не могут быть использованы для обследований зданий при массовом строительстве.

Авторами разработаны технология и комплекс программно-аппаратных средств для определения $R_{пр}$ наружных ограждающих конструкций строительных сооружений **в реальных условиях эксплуатации** как в осенне-зимний (отопительный), так и в летний периоды [10, 11]. Затем эта технология, в основе которой лежит решение обратной задачи теплового НК в многослойной пространственной области с подобластями, имитирующими дефекты, в условиях нестационарного процесса теплопередачи [12–14], была усовершенствована с учетом опыта более 250 натурных обследований зданий.

Полученное реальное значение $R_{пр}$ с определенными экспериментально на исследуемом объекте начальными и граничными условиями лежит в основе технологии определения точки росы, положения плоскости промерзания и определения теплового состояния строительной конструкции при аварийном отключении теплоснабжения (с определением максимально допустимого интервала времени отключения).

Анализ движения фронта промерзания (или оттаивания) влаги, содержащейся в НОК, и координаты точки росы также имеет большое практическое значение, так как непосредственно связан с вопросами долговечности и надежности НОК, формирования их реального тепловлажностного режима и сопротивления теплопередаче. Последний фактор определяет эффективность энергосбережения здания. При этом в зоне перемещения фронта промерзания вследствие знакопеременных климатических нагрузок создаются крайне неблагоприятные условия эксплуатации — чередование замерзания и оттаивания постепенно приводит к снижению прочности, разрушению теплоизоляции и, в конечном счете, к разрушению конструкции.

Анализ процесса промерзания рассматривается как задача, в которой изменение агрегатного состояния воды происходит при определенной температуре $T_к$. То есть имеется четкая изотермическая граница, отделяющая область затвердевшего льда и жидкости. В этом случае решается система двух уравнений нестационарной теплопроводности, и помимо граничных условий на поверхности тела дополнительно задаются условия теплового баланса и равенства температур на границе затвердевания (задача Стефана о перемещении границы

раздела фаз). В качестве примера, иллюстрирующего разработанный метод, на рис. 3 приведен график движения фронта промерзания для двух видов стен: из кирпича и пенополистирола. Температура на внешней поверхности стены принимается равной – 20 °С, а на внутренней поверхности — + 20 °С, температура замерзания влаги 0 °С. За 24 час глубина промерзания кирпича достигает 180 мм, а пенополистирола — 130 мм.

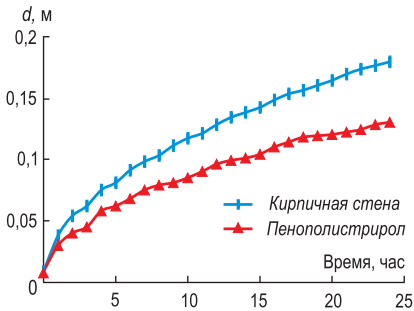

Рис. 3. Движение границы промерзания по толщине *d* однородной стены из кирпича (*1*) и пенополистирола (*2*) с учетом скачкообразного изменения теплоемкости на границе

Одной из крайне важных характеристик жилых зданий является интервал времени, в течение которого жилой дом может находиться без отопления (плановый эксплуатационный интервал времени, Δt), например, при аварийном отключении системы теплоснабжения. В течение этого времени необходимо успеть провести ремонтные работы или провести дренирование систем теплопотребления.

Для определения Δt используется математическая модель, описывающая процесс нестационарной теплопередачи в наружных ограждающих и внутренних конструкциях, цокольном этаже и чердачном помещении жилого дома с учетом граничных и начальных условий и внутренних источников энергии. Тепловое состояние дома при возможной аварии в зимний период определяется расчетно-экспериментальным методом, который включает в себя совместное решение системы *n* дифференциальных уравнений нестационарной теплопроводности в частных производных и связывающей их системы (*n*–1) обыкновенных дифференциальных уравнений теплового баланса с учетом соответствующих граничных и начальных условий. Например, первая система описывает процесс распределения температуры во времени в наружных стенах дома, а вторая — изменения температуры во времени в цокольной части дома и в других «критических» помещениях. Размерность системы (количество дифференциальных уравнений) определяется сложностью обследуемой строительной конструкции и требуемой точностью получения результатов.

Проведение экспериментальных (контактных и бесконтактных, в т. ч. тепловизионных) обследований с последующим анализом полученных данных по разработанным методикам позволяет определить основные теплотехнические характеристики НОК. На рис. 4 приведена структурная схема комплексного обследования зданий и строительных конструкций. Оно включает три основных этапа:

Рис. 4. Структурная схема комплексного тепловизионного контроля зданий и строительных конструкций (в летний и зимний периоды)

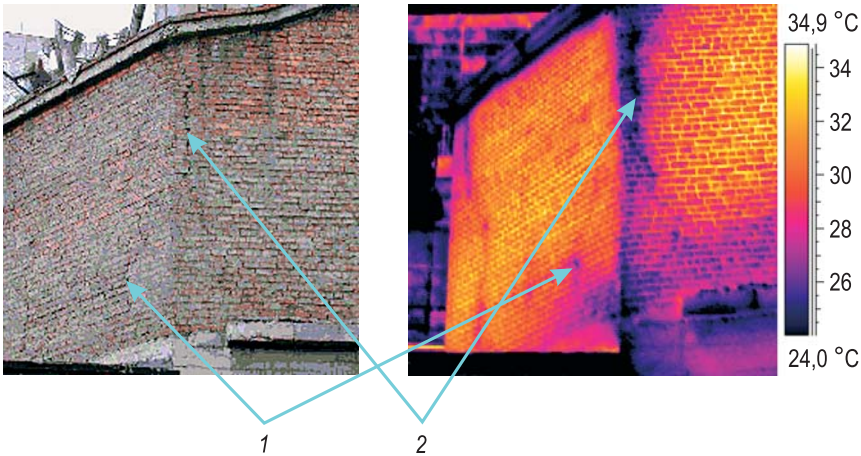

Рис. 5. Тепловой контроль газоходов: *1* — внутренняя трещина; *2* — присос воздуха через трещину в кирпичной кладке (разрушение теплоизоляции внутри газохода)

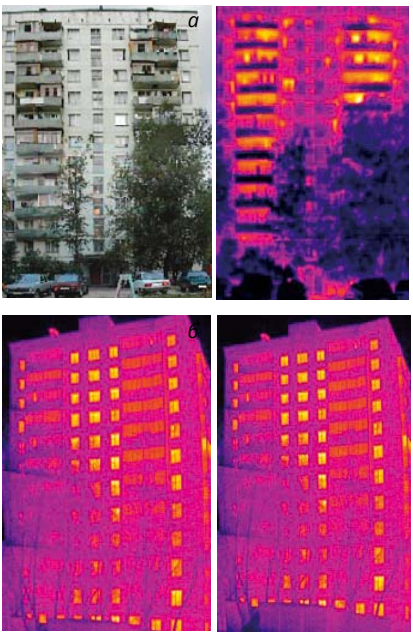

Рис. 6. Санация старого жилого фонда:
а — до реконструкции, $R_{пр}$ = 1,0 м^2 град/Вт;
б — после реконструкции, $R_{пр}$ = 3,0 м^2 град/Вт

- регистрация первичной информации с контролируемого объекта в реальных условиях эксплуатации;
- определение теплотехнических характеристик обследуемого объекта;
- подготовка отчетных материалов и заключений с оформлением вкладыша к энергетическому паспорту здания.

На рис. 5, 6 приведены примеры комплексного теплового контроля строительных сооружений. Все методики теплового контроля утверждены соответствующими министерствами и ведомствами и аттестованы Госстандартом РФ. Достоверность и надежность эксплуатации методик подтвержде-

на 4-х летним опытом работы при обследовании более 250 строительных объектов.

Литература

1. ГОСТ 26254–84. Здания и сооружения. Методы определения сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций.

2. ГОСТ 26629–85. Метод тепловизионного контроля качества теплоизоляции ограждающих конструкций.

3. ГОСТ Р. 51380–99. Энергосбережение. Методы подтверждения соответствия показателей энергетической эффективности энергопотребляющей продукции их нормативным значениям.

4. ГОСТ Р. 51388–99. Энергосбережение. Информирование потребителей об энергоэффективности изделий бытового и коммунального назначения.

5. СНиП 11-3-79 (в редакции 1998 г.).

6. Московские городские строительные нормы. Энергосбережение в зданиях. Нормативы по теплозащите и тепловодоэлетроснабжению / МГСН 02.01. 1999 г.

7. О городской программе по энергосбережению на 2001–2003 годы в г. Москва / Постановление правительства Москвы № 912-ПП от 9 октября 2001 г.

8. Правила проведения энергетических обследований организаций, утвержденные Министерством топлива и энергетики РФ 25 марта 1998 г.

9. О проведении обязательных энергетических обследований на предприятиях и в организациях / Приказ Госэнергонадзора № 10 от 16.02.2001.

10. Методика диагностики и энергетических обследований наружных ограждающих конструкций строительных сооружений тепловизионным бесконтактным методом. / Свидетельство об аттестации Госстандарта РФ № 09 / 442–2001 от 09.07.2001. // ВЕМО 04.00.00.000 ДМ (с изменениями 2004 г.)

11. Методика диагностики и энергетических обследований наружных ограждающих конструкций строительных сооружений тепловизионным бесконтактным методом (летний вариант). / Свидетельство об аттестации Госстандарта РФ № 02 / 442–2002 от 09.08.2002. // ВЕМО 05.00.00.000 ДМ (с изменениями 2004 г.)

12. Будадин О. Н., Вавилов В. П., Абрамова Е. В. и др. Автоматизированный тепловизионный комплекс оперативного мониторинга теплотехнических зданий и сооружений. — В мире НК. 2001. № 2 (12). С. 40–43.

13. Будадин О. Н., Потапов А. И., Колганов В. И. и др. Тепловой неразрушающий контроль изделий. — М.: Наука, 2002. — 476 с.

14. Будадин О. Н., Абрамова Е. В., Родин М. А., Лебедев О. В. Тепловой неразрушающий контроль зданий и строительных сооружений. — Дефектоскопия. 2003. № 5. С. 77–94.