

УДК 697.12.13

Маляренко В.А., Орлова Н.А.

**АНАЛИЗ КРИТЕРИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ**

*Харьковская национальная академия городского хозяйства,  
Институт проблем машиностроения НАН Украины им. А.Н. Подгорного*

Снижение энергопотребления для Украины – одна из самых актуальных проблем, так как ее обеспеченность собственными энергоресурсами не превышает 15 % (в основном за счет угля). Наряду с этим, энергоемкость единицы валового продукта превышает в 4-4.5 раза европейский уровень. Вместе с тем, энергоснабжение зданий составляет 2.26 млрд ГДж/год, т.е. более 26 % всей потребляемой энергии. Структура потребления тепловой энергии инженерными системами здания может быть охарактеризована следующими значениями: отопление – 80 %, вентиляция – 18.6 % горячее водоснабжение – 1.4 %.

Вся теплота, формирующаяся в оболочке жилых зданий, рано или поздно уходит через наружные ограждающие конструкции зданий в окружающую среду. При этом через стены теряется около 40 % теплоты, через окна – 35 % и через остальные элементы здания – 25 % [1].

Для оперативной оценки энергоэффективности зданий на протяжении всего жизненного цикла необходимо разработать единую характеристику, удовлетворяющую следующим требованиям:

- характеризовать соблюдение комфортных условий в жилом здании при изменении внешних условий до и после модернизации зданий;
- учитывать временной фактор, т.е. использование подведенной к дому теплоты как в конкретный момент, так и за рассматриваемый период (сутки, месяц, отопительный сезон).
- параметры тепло - и влагопередачи ограждающих конструкций;
- изменение физического состояния ограждающих конструкций при одинаковых внешних условиях;
- экономичность использования топлива в различные периоды;

В качестве такой характеристики может служить макроэнергетический критерий, который отражал бы экономические аспекты эксплуатации зданий: затраты на модернизацию, реконструкцию, изменение цены топлива, оценку окупаемости затрат и др.

Снижение энергопотребления в зданиях связано с применением современных исследований в области технической теплофизики ограждающих конструкций зданий и сооружений, что, прежде всего, находит отражение в необходимости создания новых расчетных методик, позволяющих оценить энергетическую и экономическую эффективность здания, которая, в свою очередь, зависит от выбранных конструктивных решений, применения новых теплоизоляционных материалов, цен на энергоносители, тарифов на тепловую энергию.

Целью данного исследования является проведение анализа теплового состояния жилого здания с привлечением различных методик и выбор наиболее рациональной из них, расчетное исследование, а также оценка факторов, необходимых для формирования макроэнергетического критерия.

Расчетные методики для определения тепловых потерь можно условно разделить на четыре группы:

- СНиП II.3.-79\*\*. Строительная теплотехника;
- модельная, с уточнением параметров[2];
- аналитическая модель[3];
- расчетная на основе трехмерных моделей газообразных и твердых тел.

В настоящее время в Украине тепловые потери в зданиях определяются по заданным стационарным температурам внутри и снаружи помещения, усредненным нормативам сопротивления теплопередачи конструктивных элементов здания и величинам добавочных теплопотерь к основным к основным потерям тепла.

Использование данной методики для анализа теплопотерь в жилых зданиях сопряжено с проблемой точности задания коэффициентов добавочных теплопотерь и параметров тепло - и массообмена.

Модельная, с уточнением параметров, методика является расчетно-экспериментальной, в которой для определения теплопотерь используется «настроенная» модель. Рассматриваемый расчетно-экспериментальный подход предполагает нахождение параметров (температур, удельных теплопотерь) и энергетического баланса зданий с помощью решения обратных задач теплопроводности на основе предварительно полученных ограниченных экспериментальных данных. Модельная методика для детального теплового анализа требует экспериментального исследования.

В основе аналитической модели лежит решение уравнения Фурье в трехмерной системе координат. Ее главной трудностью является сложность достоверного задания граничных условий. Расчеты, согласно аналитической модели и методики, основанной на трехмерных моделях, требуют сложного программного обеспечения для решения сопряженной задачи теплообмена.

В основу методики расчета теплопотерь, построенной на основе трехмерных моделей газообразных и твердых тел, положена система уравнений в частных производных Навье-Стокса и Фурье. Данная модель описывает поля температур, скоростей и давления в газовой среде помещения, поля температур в ограждающих конструкциях и поля температур и скоростей внешней среды. Связь между узлами определяется физическими свойствами моделируемых сред и параметрами сетки.

Для проведения исследования энергоэффективности зданий из рассмотренных методик на первом этапе применялись основные соотношения строительной теплофизики [4] с уточнением параметров на аналитической модели.

При определении вида макроэнергетического критерия была проведена оценка применимости эксергетического метода анализа к процессам, протекающим в жилых зданиях.

Применение эксергетического анализа для оценки энергоэффективности здания показало, что при условии исследования теплового потока в здании целесообразно рассматривать его деление на эксергию и анергию:

$$q = e_q + a_q, \quad (1)$$

где эксергию ( $e_q$ ) можно трактовать как способность теплового потока ( $q$ ) произвести максимальную работу, а анергию ( $a_q$ ) как необходимый фактор обеспечения комфортных условий в помещениях.

При условии принятия комфортной температуры в помещениях, равной  $T_k = 293 \text{ K}$ , и изменяющейся температуры окружающей среды  $T_{o.c.}$  эксергия и анергия теплового потока могут быть представлены как:

$$e_q = q \cdot \left(1 - \frac{T_{o.c.}}{T_k}\right); \quad (2)$$
$$a_q = q \cdot \frac{T_{o.c.}}{T_k},$$

$T_{o.c}$ ,  $T_k$  – температуры окружающей среды и воздуха в жилых комнатах, К.

В качестве характеристики эффективности использования топлива может быть принят коэффициент  $\tau_e = 1 - \frac{T_{o.c}}{T_k}$ , изменение которого в диапазоне температур  $250 \text{ K} \leq T_{o.c} \leq 281 \text{ K}$  представлено на рис 1.

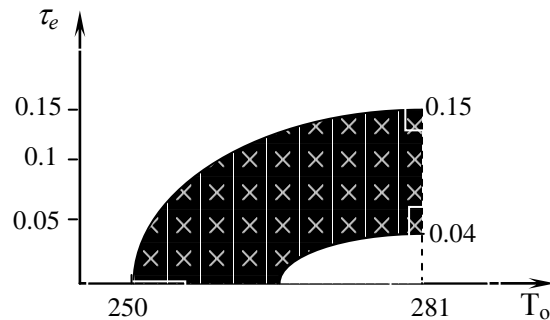


Рисунок 1 – Изменение показателя эффективности использования топлива в зависимости от различных температур окружающей среды

Из рис. 1 видно, что доля энергии теплового потока, способного к превращению в механическую работу, тем больше, чем выше температура окружающей среды. Так как весь тепловой поток, полученный зданием, переходит в окружающую среду, а энергия играет роль фактора комфортности, можно отметить, что в указанном диапазоне изменения температур  $T_{o.c}$  и  $T_k$ , необходима минимально возможная эксергия. В этом случае соотношение эксергии и анергии теплового потока имеет следующий вид:

$$e_q/a_q = \frac{T_k}{T_{o.c}} - 1. \quad (3)$$

Как видно из уравнения (3), при заданных параметрах внутреннего воздуха  $T_k$  данное соотношение зависит от температуры окружающей среды и является гиперболической функцией, (рис. 2). Величина  $e_q/a_q$  при понижении  $T_{o.c}$  несколько опережает увеличение мощности теплового потока, потребляемого зданием. Но при этом следует отметить, что перераспределение энергии между эксергией и анергией в пользу первой не позволяет ее использовать.

В настоящее время появились предложения проводить оплату за потребленную тепловую энергию, используя эксергетический метод в теплоэнергетике [5]. Оплату за подаваемое тепло предлагается производить по потребленной эксергии, при условии установления на нее тарифов.

Из рис. 2 видно, что по мере повышения температуры наружного воздуха соотношение между эксергией и анергией уменьшается до нуля (при  $T_{o.c} = T_k$ ). Но поскольку эксергия потока тепла, проходящего через жилой дом, не может быть реализована в виде работы, то ее смысл как фактора, по которому должна производиться оплата потребителем за полученное тепло, непонятен. Тем более что разность эксергий теплового потока, предлагаемая авторами [5] как величина, для которой необходимо установить тариф, при отсутствии в жилом здании потерь теплоносителя и постоянстве его теплоемкости, представляет собой выражение:

$$\Delta E = E_1 - E_2 = M \left[ h_1 \left( 1 - \frac{T_{o.c}}{T_1} \right) - h_2 \left( 1 - \frac{T_{o.c}}{T_2} \right) \right] = M C \cdot (T_1 - T_2) = q, \quad (4)$$

где  $\Delta E$  – потребленная эксергия, Вт;  $E_1, E_2$  – эксергия потока теплоносителя в подающем и обратном трубопроводах, Вт;  $h_1, h_2$  – удельные энтальпии теплоносителя в подающем

и обратном трубопроводах, Дж/с;  $M$  – расход теплоносителя, кг/с;  $C$  – удельная теплоемкость теплоносителя, Дж/кг К.

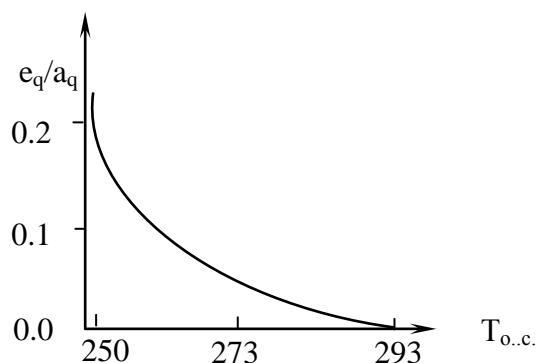


Рисунок 2 – Зависимость соотношения  $e_q/a_q$  от температуры окружающей среды

Т.е. это количество теплоты, потребляемое системой отопления здания, за которое в настоящее время рассчитывается потребитель согласно действующих тарифов.

В то же время для оценки эффективности работы энергетического оборудования предполагается использовать эксергетический анализ, при котором выработка электроэнергии является эффективной полезной работой, а анализ производится с материальными потоками, несущими тепловую энергию [6]. Этот анализ применяется в основном при создании нового эффективного энергетического оборудования.

Так, эксергетический КПД ТЭЦ как источника централизованного теплоснабжения при одинаковых начальных параметрах равен энергетическому КПД станции в конденсационном режиме, т.е. ТЭЦ имеет одинаковую степень совершенства, обусловленную ценностью вырабатываемой энергии. Для анализа работы ТЭЦ в теплофикационном режиме более приемлем такой показатель, как коэффициент использования энергии топлива, который позволяет кроме оценки эксергетических характеристик совершенства процесса, выделить ту часть энергии, с помощью которой поддерживаются в квартирах комфортные условия.

С учетом сказанного выше, для оценки снижения энергопотребления в жилом секторе более целесообразно использовать энергетический критерий.

При составлении теплового баланса жилого дома учитывались следующие параметры: затраты тепла на отопление, выбросы тепла с вентиляцией, теплота, создаваемая бытовыми приборами и живыми организмами. Влияние системы горячего водоснабжения и отвод тепла со сточными водами не рассматривается. Дополнительным фактором поступления тепла можно считать солнечную инсоляцию, воздействующую на наружную поверхность ограждающих конструкций и отдельные внутренние поверхности комнат при их освещении солнцем через оконные проемы. Учитывая эпизодичность солнечной погоды в течении отопительного периода влияние теплоты солнечной инсоляции на процесс регулирования подачи тепла в систему централизованного теплоснабжения можно оценить при наличии надежного краткосрочного прогноза.

Уравнение теплового баланса для жилого здания может быть представлено в виде:

$$\begin{aligned} Q_{\text{подв}} + Q_{\text{отв}} &= 0; \\ Q_{\text{подв}} &= Q_{\text{от}} + Q_{\text{вент1}} + Q_{\text{быт}} + Q_{\text{ж.о}}; \\ Q_{\text{отв}} &= Q_{\text{гр}} + Q_{\text{вент2}}, \end{aligned} \quad (5)$$

где  $Q_{\text{подв}}$ ,  $Q_{\text{отв}}$ , – теплоступления и теплотери здания, кВт;  $Q_{\text{ж.о}}$  – теплота, выделяемая живыми организмами при их нахождении в жилом помещении, кВт;  $Q_{\text{от}}$  – теплоступления от системы отопления, кВт;  $Q_{\text{вент1}}$  – теплота, подаваемая из системы вент-

ляции при условии использования теплоты воздуха, отводимого из помещения, кВт;  $Q_{\text{быт}}$  – теплота, создаваемая в помещении бытовыми приборами постоянного действия (холодильник, телевизор, электролампочки и др.), за исключением специальных теплонагревающих устройств (теповентиляторы, электрорадиаторы), кВт;  $Q_{\text{вент2}}$  – теплота, отводимая системой вентиляции, включая теплоту, затрачиваемую на нагрев воздуха, поступающего в помещение в результате инфильтрации, кВт  $Q_{\text{тр}}$  – трансмиссионные потери тепла, кВт

В качестве макроэнергетического критерия в этом случае может рассматриваться отношение  $\eta = Q_{\text{подв}} / Q_{\text{отв}}$ .

Первичный анализ этого критерия показывает, что при  $Q_{\text{подв}} > Q_{\text{отв}}$ , т.е.  $\eta > 1.0$  происходит перетоп здания и, наоборот при  $\eta < 1$  – недотоп. Изменение в диапазоне от 0.97 до 1.03 свидетельствует о поддержании комфортных условий внутри жилого дома.

В качестве примера использования этого критерия рассмотрим жилое здание г. Харькова типовой серии I-464А-15, параметры которого приведены в таблице.

Таблица – Основные параметры жилого дома типовой серии I-464А-15

Тип дома	многоквартирный
Год возведения	1965
Тип конструкции	панельный
Количество этажей	5
Количество жилых единиц (ЖЕ)	120
Количество жилых единиц на этаже	4
Общая жилая площадь, м <sup>2</sup>	4347
Средний размер квартир, м <sup>2</sup> /ЖЕ	36.3
Площадь фундамента (кровли), м <sup>2</sup>	869.4
Общая площадь поверхности внешних стен, м <sup>2</sup>	2829.1
Общая площадь окон, м <sup>2</sup>	565.8

Модернизация данного здания была проведена после 34 лет эксплуатации без отселения жильцов и заключалась в следующем:

- утеплению и облицовке наружных ограждающих конструкций жилого здания по технологии навесных вентилируемых фасадов, что улучшило тепловой режим квартир, внешний облик здания и обеспечило экономию энергоресурсов;
- замене санитарно-технических систем и перекладке инженерных сетей;
- строительстве лоджий первого этажа;
- надстройке мансардного этажа;

С точки зрения экономии энергоресурсов особый интерес представляет теплоизоляция наружных ограждающих конструкций. Анализ, проведенный для установившегося процесса теплоснабжения при температуре окружающей среды  $T_{\text{о.с.}} = 250 \text{ К}$ , показал следующее: до реконструкции трансмиссионные потери тепла и потери тепла с уходящим воздухом вентиляции составили  $Q_{\text{отв}}^{\text{max}} = 702.8 \text{ кВт}$ ; теплопоступления от системы отопления –  $Q_{\text{от}} = 323.6 \text{ кВт}$ , от бытовых приборов –  $149.0 \text{ кВт}$ , от живых организмов –  $66.0 \text{ кВт}$ .

Макроэнергетический критерий в этом режиме равен 0.77, что свидетельствует о существенном недотопе при данной температуре окружающей среды.

После реконструкции здания за счет увеличения термического сопротивления теплопередаче наружных ограждающих конструкций теплопоступления от системы отопления составили  $Q_{\text{от}} = 295.6 \text{ кВт}$ , теплопотери через ограждающие конструкции и с уходящим воздухом вентиляции –  $579.0 \text{ кВт}$ . При тех же поступлениях от бытовых приборов и живых организмов  $\eta = 0.88$ .

После проведения модернизации ограждающих конструкций рассматриваемого жилого здания его недотоп снизился на 15 %, однако реконструкция только наружных ограждающих поверхностей оказалась недостаточно эффективной.

Анализ тепловых потерь показывает, что выброс тепла с вентиляцией соизмерим с трансмиссионными потерями через ограждающие конструкции. Поэтому следует считать, что возврат тепла, выбрасываемого вентиляцией, позволит сократить энергопотери здания.

С этой целью возможен переход от естественной вентиляции здания к принудительной на основе использования тонкостенных теплообменных аппаратов (ТО). При расчете ТО температура наружного воздуха принималась  $-23^{\circ}\text{C}$ , температура внутреннего воздуха  $20^{\circ}\text{C}$ , температура воздуха на выходе из теплообменника  $1^{\circ}\text{C}$  (по условию обмерзания). Тепловая энергия, возвращаемая системой вентиляции, составила 49 кВт, а отводимая – 250.3 кВт.

Макроэнергетический критерий в этом случае составит  $\eta=1.36$ . Это свидетельствует о том, что использование замкнутой системы вентиляции с подогревом наружного воздуха за счет теплоты отводимого позволяет дополнительно снизить необходимое для поддержания комфортных условий количество теплоты, подводимое в здание централизованной системой отопления.

Проведенное исследование возможности использования эксергетического метода для анализа теплового состояния жилых зданий показало, что эксергия как фактор работоспособности теплового потока не может быть использован при формировании макроэнергетического критерия.

В качестве макроэнергетического показателя с учетом необходимости поддержания комфортных условий в здании более приемлемым является отношение отводимой теплоты к подаваемой.

### Литература

1. Маляренко В.А., Редько А.Ф., Чайка Ю.И., Поволочко В.Б. Техническая теплофизика ограждающих конструкций зданий и сооружений / Под общей редакцией В.А. Маляренко. – Харьков: Рубикон, 2001. – 280 с.
2. Круковский П. Г., Судак О. Ю. Расчетно-экспериментальный подход к анализу теплового состояния и теплопотерь помещений. //Промышленная теплотехника. – 2001.–№6, Т. 23. – С. 136-142.
3. Богословский В.Н. Строительная теплофизика. – М:Высш. школа, 1985.
4. МГСН 2.01-99. Энергосбережение в зданиях. МГСН 2.01-99 Энергосбережение в зданиях. Госстрой России.–М.: ЦИТП Госстроя России,1999 г, 109 с.
5. Репин С.Г., Васильев Н.К. Эксергетический метод в теплоэнергетике //Труды 17-й Междунар. научно-практической конф. «Коммерческий учет теплоносителей». – Санкт-Петербург. – СПб.:–Борей-Арт, 2003.– С. 235-239.
6. Бродянский В.М., Фратшер В., Михалек К. Эксергетический метод и его приложения. М.:Энергоиздат, 1988. 287 с.