

**ПОСТРОЕНИЕ КОМПЛЕКСНОГО ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО
БАЛАНСА СИСТЕМЫ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ И ЗДАНИЙ ДЛЯ
ОЦЕНКИ ПОТЕНЦИАЛА ПОВЫШЕНИЯ
ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ**

Институт газа НАН Украины

Построение энергетических балансов является базовым инструментом анализа энергетической эффективности всех технических систем, которые производят и потребляют энергию. Рассмотрим методологию использования этого инструмента для предварительного выбора проектов по повышению энергоэффективности теплоснабжения населенных пунктов.

Общий принцип заключается в сопоставлении отдельных составляющих фактического и нормализованного энергетических балансов и выявлении расхождений между ними. Наибольший потенциал экономии ТЭР и соответственно потенциал реализации энергоэффективных проектов заключается на тех участках технологического процесса производства, транспортировки и потребления тепловой энергии, на которых наблюдается наибольшее расхождение между фактической и нормализованной величиной.

Особенностью настоящего подхода является построение комплексного энергетического баланса системы теплоснабжения и подключенных к ней зданий. Известны методологии построения тепловых балансов различных энергетических агрегатов, в частности паровых и водогрейных котлов, зданий, определения потерь в тепловых сетях. Однако раздельное рассмотрение этих балансов не позволяет сопоставить потенциал реализации энергоэффективных проектов в тепловых источниках, тепловых сетях и тепловых потребителях. В настоящем исследовании эти составляющие тепловых потерь рассматриваются в комплексе, что позволяет сопоставить между собой потенциал реализации энергоэффективных проектов в системе теплоснабжения, включая и тепловых потребителей.

Поскольку в системе теплоснабжения используется топливо и электрическая энергия, необходимо рассматривать два баланса – использования теплоты топлива и электроэнергии. С точки зрения анализа потенциала энергосбережения основным является топливный баланс, поскольку затраты на топливо в себестоимости тепловой энергии составляют 50 - 65%, а затраты на электроэнергию 7 - 15%.

Рассмотрим методологию построения комплексного баланса использования теплоты топлива для типичного теплового района, включающего в себя газовую котельную, тепловую сеть и подключенные к ней здания. С целью упрощения рассматриваемого подхода будем полагать, что централизованное ГВС отсутствует, что соответствует реальной

ситуации во многих тепловых районах. В случае необходимости, учет этой составляющей не представляет затруднений.

Тепловой баланс может быть построен для различных интервалов времени. Наиболее представительным интервалом времени является отопительный сезон.

Рассмотрим локальные тепловые балансы для газовой водогрейной котельной, тепловой сети и подключенных к ней зданий. Каждое здание характеризуется собственным тепловым балансом. Однако настоящий подход предполагает рассмотрение агрегатированного теплового баланса комплекса рассматриваемых зданий.

Тепловой баланс котельной имеет вид:

$$Q_{\text{ТЛ}} = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_5, \quad (1)$$

или в относительных величинах:

$$1 = q_1 + q_2 + q_3 + q_5. \quad (2)$$

Для газовой котельной потери теплоты от механического недожога и со шлаком отсутствуют ($Q_4 = Q_6 = 0$).

Тепловой баланс тепловой сети можно записать в виде:

$$Q_1 = Q_{\text{т.с}} + Q_{\text{ут}} + Q_{\text{зд}}, \quad (3)$$

или в относительных величинах:

$$1 = q_{\text{т.с}} + q_{\text{ут}} + q_{\text{зд}}. \quad (4)$$

Потери теплоты с утечкой теплоносителя ($Q_{\text{ут}}$) могут происходить не только в тепловой сети, но и во внутридомовых системах отопления, однако с определенной долей условности будем относить их к тепловой сети.

Тепловой баланс здания при отсутствии централизованного горячего водоснабжения можно записать в виде:

$$Q_{\text{зд}} = Q_{\text{ог}} + Q_{\text{ок}} + Q_{\text{чер}} + Q_{\text{под}} + Q_{\text{инф}}, \quad (5)$$

или в относительных величинах:

$$1 = q_{\text{ог}} + q_{\text{ок}} + q_{\text{чер}} + q_{\text{под}} + q_{\text{инф}}. \quad (6)$$

В выражениях (1) – (6) приняты следующие обозначения:

$Q_{\text{ТЛ}}$ – теплота, поступившая в котельную с топливом, Гкал;

Q_1 – тепловая энергия, вырабатываемая котельной, Гкал;

Q_2 – потери теплоты с уходящими газами, Гкал;

Q_3 – потери теплоты от химической неполноты сгорания, Гкал;
 Q_5 – потери теплоты от ограждающих конструкций котлов, Гкал;
 $Q_{т.с}$ – потери теплоты от поверхности трубопроводов, Гкал;
 $Q_{ут}$ – потери теплоты с утечками теплоносителя в трубопроводах, Гкал;
 $Q_{ог}$ – потери теплоты от ограждающих конструкций зданий, Гкал;
 $Q_{ок}$ – потери теплоты через окна, Гкал;
 $Q_{чер}$ – потери теплоты через чердачные перекрытия, Гкал;
 $Q_{под}$ – потери теплоты через перекрытия подвалов, Гкал;
 $Q_{инф}$ – потери теплоты с вентиляционным воздухом, Гкал.

Относительные потери в балансах (2), (4) и (6) определяются по формулам:

$$q_1 = \eta = Q_1/Q_{тл}; q_2 = Q_2/Q_{тл}; q_3 = Q_3/Q_{тл}; q_5 = Q_5/Q_{тл}, \quad (7)$$

$$q_{т.с} = Q_{т.с}/Q_1; q_{ут} = Q_{ут}/Q_1; q_{зд} = Q_{зд}/Q_1, \quad (8)$$

$$q_{ог} = Q_{ог}/Q_{зд}; q_{ок} = Q_{ок}/Q_{зд}; q_{чер} = Q_{чер}/Q_{зд}; q_{под} = Q_{под}/Q_{зд}, \quad (9)$$

$$q_{инф} = Q_{инф}/Q_{зд}.$$

Как видно из выражений (7) – (9) в трех различных тепловых балансах относительные потери определяются по отношению к трем различным величинам $Q_{тл}$, Q_1 , $Q_{зд}$, что не позволяет сравнивать между собой потери тепловой энергии в котельной, тепловой сети и зданиях. Введем дополнительные обозначения:

$$Q_k = Q_2 + Q_3 + Q_5, \quad (10)$$

$$q_k = q_2 + q_3 + q_5, \quad (11)$$

$$Q_T = Q_{т.с} + Q_{ут}, \quad (12)$$

$$q_T = q_{т.с} + q_{ут}, \quad (13)$$

$$[Q_{тл}]/Q_{тл} = q, \quad (14)$$

$$[Q_{зд}]/Q_{зд} = k. \quad (15)$$

Нетрудно показать, что эти величины связаны между собой зависимостью

$$q = \{q_k + \eta q_T + (1 - k) \cdot (\eta - q_T) - 1\} / \{[q_k] + \eta [q_T] - 1\}. \quad (16)$$

Комплексный баланс можно записать в абсолютном:

$$Q_{\text{тл}} = Q_2 + Q_3 + Q_5 + Q_{\text{т.с}} + Q_{\text{ут}} + Q_{\text{ог}} + Q_{\text{ок}} + Q_{\text{чер}} + Q_{\text{подв}} + Q_{\text{инф}}, \quad (17)$$

или относительном виде

$$1 = p_2 + p_3 + p_5 + p_{\text{т.с}} + p_{\text{ут}} + p_{\text{ог}} + p_{\text{ок}} + p_{\text{чер}} + p_{\text{подв}} + p_{\text{инф}}, \quad (18)$$

где:

$$p_1 = Q_1/Q_{\text{тл}}; p_2 = Q_2/Q_{\text{тл}}; p_3 = Q_3/Q_{\text{тл}}; p_5 = Q_5/Q_{\text{тл}}, \quad (19)$$

$$p_{\text{т.с}} = Q_{\text{т.с}}/Q_{\text{тл}}; p_{\text{ут}} = Q_{\text{ут}}/Q_{\text{тл}}; p_{\text{зд}} = Q_{\text{зд}}/Q_{\text{тл}}, \quad (20)$$

$$p_{\text{ог}} = Q_{\text{ог}}/Q_{\text{тл}}; p_{\text{ок}} = Q_{\text{ок}}/Q_{\text{тл}}; p_{\text{чер}} = Q_{\text{чер}}/Q_{\text{тл}}; p_{\text{под}} = Q_{\text{под}}/Q_{\text{тл}}; \\ p_{\text{инф}} = Q_{\text{инф}}/Q_{\text{тл}}. \quad (21)$$

Как видно из вышеприведенных соотношений, все составляющие относительного комплексного баланса определяются по отношению к одной и той же величине – $Q_{\text{тл}}$, что позволяет сравнивать по величине все тепловые потери в котельной, тепловых сетях и зданиях.

Составляющие относительного комплексного баланса (15) можно выразить через составляющие локальных балансов (7) – (9), (11), (13) следующим образом:

$$p_2 = q_2; p_3 = q_3; p_5 = q_5, \quad (22)$$

$$p_{\text{т.с}} = \eta q_{\text{т.с}}; p_{\text{ут}} = \eta q_{\text{ут}}, \quad (23)$$

$$p_{\text{ог}} = q_{\text{ог}}\eta (1 - q_{\text{т.с}} - q_{\text{ут}}); p_{\text{ок}} = q_{\text{ок}}\eta (1 - q_{\text{т.с}} - q_{\text{ут}}); \\ p_{\text{чер}} = q_{\text{чер}}\eta (1 - q_{\text{т.с}} - q_{\text{ут}}); p_{\text{под}} = q_{\text{под}}\eta (1 - q_{\text{т.с}} - q_{\text{ут}}); \\ p_{\text{инф}} = q_{\text{инф}}\eta (1 - q_{\text{т.с}} - q_{\text{ут}}). \quad (24)$$

Аналогичный вид имеют нормализованные балансы, с той лишь разницей, что вместо фактических величин Q , q и p в него подставляются нормализованные величины $[Q]$, $[q]$ и $[p]$.

Потенциал экономии топлива в рассматриваемой системе может быть охарактеризован величиной $Q_{\text{тл}} - [Q_{\text{тл}}]$ или в относительном виде:

$$(Q_{\text{тл}} - [Q_{\text{тл}}])/Q_{\text{тл}} = 1 - q. \quad (25)$$

Подставляя в (25) фактические и нормализованные балансы (18) после несложных преобразований можно получить выражение:

$$1 - q = (p_2 - q[p_2]) + (p_3 - q[p_3]) + (p_5 - q[p_5]) + \\ + (p_{т.с} - q[p_{т.с}]) + (p_{ут} - q[p_{ут}]) + (p_{ог} - q[p_{ог}]) + \\ + (p_{чер} - q[p_{чер}]) + (p_{под} - q[p_{под}]) + (p_{инф} - q[p_{инф}]). \quad (26)$$

В практике теплотехнических расчетов котлов, трубопроводов и зданий общепринятыми являются относительные составляющие локальных балансов (2), (6), (8). Поэтому составляющие комплексного баланса экономии топлива (26) целесообразно выразить через традиционные показатели локальных балансов котлов, трубопроводов и зданий.

$$(p_2 - q[p_2]) = q_2 - q[q_2], \quad (27)$$

$$(p_3 - q[p_3]) = q_3 - q[q_3], \quad (28)$$

$$(p_5 - q[p_5]) = q_5 - q[q_5], \quad (29)$$

$$(p_{т.с} - q[p_{т.с}]) = \eta q_{т.с} - q[\eta][q_{т.с}], \quad (30)$$

$$(p_{ут} - q[p_{ут}]) = \eta q_{ут} - q[\eta][q_{ут}], \quad (31)$$

$$(p_{ог} - q[p_{ог}]) = q_{ог}\eta(1 - q_{т.с} - q_{ут}) - q[q_{ог}][\eta](1 - [q_{т.с}] - [q_{ут}]), \quad (32)$$

$$(p_{ок} - q[p_{ок}]) = q_{ок}\eta(1 - q_{т.с} - q_{ут}) - q[q_{ок}][\eta](1 - [q_{т.с}] - [q_{ут}]), \quad (33)$$

$$(p_{чер} - q[p_{чер}]) = q_{чер}\eta(1 - q_{т.с} - q_{ут}) - q[q_{чер}][\eta](1 - [q_{т.с}] - [q_{ут}]) \quad (34)$$

$$(p_{под} - q[p_{под}]) = q_{под}\eta(1 - q_{т.с} - q_{ут}) - q[q_{под}][\eta](1 - [q_{т.с}] - [q_{ут}]) \quad (35)$$

$$(p_{инф} - q[p_{инф}]) = q_{инф}\eta(1 - q_{т.с} - q_{ут}) - q[q_{инф}][\eta](1 - [q_{т.с}] - [q_{ут}]) \quad (36)$$

Левая часть выражения (26) характеризует долю экономии топлива, которая достигается за счет того, что все составляющие комплексного баланса (18) будут соответствовать нормализованным значениям. В правой части представлена каждая из составляющих экономии топлива. Полученное выражение характеризует потенциал экономии топлива в каждом из участков, где используется теплота топлива, поступающего в котельную системы теплоснабжения. Эта информация может быть использована для определения приоритетности реализации проектов, направленных на экономию топлива в системе теплоснабжения. Проекты с наибольшим потенциалом целесообразно рассматривать в качестве первоочередных. Примеры энергоэффективных проектов, направленных на снижение

составляющих тепловых потерь в отдельных элементах рассматриваемой системы, приведены в таблице 1.

Составляющие фактического баланса определяются на основании показаний стационарных и портативных приборов учета ТЭР: счетчика газа на входе в котельную, теплосчетчиков, установленных на выходе из котельной и на входе в здания, водосчетчиков для определения расхода горячей и подпиточной воды, газоанализатора для определения состава продуктов сгорания топлива и температуры уходящих газов котлов, тепловизора для определения температуры ограждающих конструкций котлов, регистраторов температуры наружного и внутреннего воздуха и других измерительных приборов. Величины, измеренные при определенной температуре наружного воздуха и на определенном интервале времени, должны быть приведены к средней расчетной температуре и расчетной продолжительности отопительного сезона. Для проведения измерений должны быть выбраны представительные объекты (котлы, трубопроводы, здания), характеристики которых можно использовать в качестве представительных параметров, характеризующих в целом тепловой район. Составление фактического баланса является трудоемкой процедурой, требующей проведения большого количества измерений. В случае невозможности получения фактических значений той или иной величины должны быть использованы расчетные значения. В этом случае баланс (17) и (18) будет носить расчетно-фактический характер.

Таблица 1

Примеры проектов, направленных на снижение тепловых потерь

Составляющая тепловых потерь	Проекты, направленные на снижение тепловой потери
p_2	установка САР «топливо – воздух», устранение присосов воздуха, установка теплоутилизаторов
p_3	установка САР «топливо – воздух»
p_5	ремонт обмуровки котлов
$p_{т.с}$	замена труб на предварительно изолированные
$p_{ут}$	выявление причин и устранение утечек теплоносителя
$p_{ог}$	утепление фасадов зданий
$p_{ок}$	установка энергосберегающих окон
$p_{чер}$	утепление чердачных перекрытий
$p_{под}$	утепление подвалов
$p_{инф}$	утилизация теплоты сбросного воздуха

Нормализованный баланс составляется расчетным путем с использованием проектных характеристик и нормативно-методических материалов. Большинство находящихся в эксплуатации зданий и систем теплоснабжения было создано достаточно давно, поэтому многие их проектные характеристики не соответствуют действующим нормативно-

методическим материалам. Составление нормализованного баланса должно осуществляться на основании действующих нормативно-методических требований, то есть должен составляться прогрессивный нормализованный баланс. Необходимо отметить, что, если фактическая величина теплоты топлива, поступившего в котельную $Q_{\text{тл}}$, может быть определена по показаниям счетчика газа, то нормативная величина $[Q_{\text{тл}}]$ может быть определена только по обратному балансу путем вычисления всех составляющих потерь тепловой энергии.

Таблица 2

Пример комплексного баланса экономии топлива в системе теплоснабжения

Составляющие баланса	Локальный баланс		Комплексный баланс		Потенциал экономии
	факт	норма	факт	норма	
источник					
с уходящими газами	0,090	0,060	0,090	0,060	0,065
от ограждений котла	0,040	0,020	0,040	0,020	0,032
от хим. недожога	0,010	0,000	0,010	0,000	0,010
КПД котла	0,860	0,920	0,860	0,920	
потери в котле	0,140	0,080	0,140	0,080	
трубопроводы					
от поверхности трубопроводов	0,200	0,120	0,172	0,110	0,126
с утечкой теплоносителя	0,060	0,010	0,052	0,009	0,048
всего потери в трубопроводе	0,260	0,130	0,224	0,120	
потребители					
доля теплоты, поступающей к потребителю			0,636	0,800	
стены	0,280	0,280	0,178	0,224	0,084
окна	0,140	0,140	0,089	0,112	0,042
чердак	0,050	0,050	0,032	0,040	0,015
подвал	0,030	0,030	0,019	0,024	0,009
инфильтрация	0,500	0,500	0,318	0,400	0,150
<i>всего у потребителя</i>	1,000	1,000	0,636	0,800	0,300
<i>итого по системе</i>			1,000	1,000	0,580
снижение энергопотребления здания	0,500				
соотношение нормализованного и фактического расхода топлива	0,420				

Рассмотрим пример построения комплексного относительного баланса экономии топлива в системе теплоснабжения, включающей в себя котельную, тепловую сеть и подключенные к ней здания на базе использования выражений (26), (27) – (36). Фактические и нормализованные относительные потери теплоты топлива в балансах котельной, тепловой сети и зданиях представлены в первых двух столбцах, фактические и нормализованные относительные потери теплоты топлива в комплексном балансе представлены в третьем и четвертом столбцах, потенциал экономии топлива – в пятом столбце таблицы 2.

Проведенный пример анализа комплексного энергетического баланса показал, что приведение фактических тепловых потерь к нормативному уровню позволяет сократить потребление топлива на 58%. При этом предполагается, что теплопотребление зданий сокращается в два раза. Наибольший потенциал экономии топлива заключается в реализации проектов по снижению тепловых потерь с вентиляционным воздухом (15%). Следующий по величине потенциал заключается в снижении тепловых потерь от поверхности трубопроводов (12,6%), от стен зданий (8,4%), с уходящими газами (6,5%), с утечкой теплоносителя (4,8%), через окна (4,2%) и с другими тепловыми потерями (табл.2). Приведенный пример является достаточно характерным для существующих систем теплоснабжения, однако не может рассматриваться в качестве универсальной оценки. Для каждой конкретной системы теплоснабжения эти цифры могут существенно отличаться. Определение конкретных величин тепловых потерь должно осуществляться на основании проведения комплексного энергоаудита систем теплоснабжения и зданий.