

УДК 621.643

ОЦЕНКА ФАКТИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ ТЕПЛА ПРИ ТРАНСПОРТИРОВКЕ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ С УЧЕТОМ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ И РЕАЛЬНЫХ УСЛОВИЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ ТЕПЛОВЫХ СЕТЕЙ

Г.В. Кузнецов¹, И.П. Озерова¹, В.Ю. Половников¹, Ю.С. Цыганкова^{1,2}

¹Томский политехнический университет

²ОАО «ТомскНИПИнефть», г. Томск

E-mail: tsygankovays@nipineft.tomsk.ru; polov@tpu.ru

Выполнен анализ влияния неоднородности состояния тепловой изоляции по длине трубопровода и учета реальных условий эксплуатации тепловых сетей на изменение транспортных потерь тепла. Проведено сравнение фактических потерь тепла с проектными и нормативными потерями. Сделан вывод о возможности ужесточения действующих норм.

Ключевые слова:

Фактические транспортные потери тепла, нестандартные условия эксплуатации, неоднородность изоляции по длине трубопровода, эффективная теплопроводность, тепловые сети.

Key words:

Real transport losses of heat, supernumerary working conditions, heterogeneity of isolation on length of the pipeline, effective thermal conductivity, heat network.

Введение

После выхода ФЗ № 261 от 23 ноября 2009 г. [1] одной из приоритетных задач долгосрочной энергетической политики РФ стал перевод экономики страны на энергосберегающий путь развития. Россия обладает уникальным потенциалом энергосбережения, который оценивается в 39...47 % [2] от годового потребления энергии. Почти третья часть его сосредоточена в топливно-энергетических отраслях (в том числе четверть – в электроэнергетике и теплоснабжении), еще 35 % в промышленности и 25 % в жилищно-коммунальном хозяйстве [2].

В ходе эксплуатации различные физико-химические воздействия окружающей среды вызывают деструктивные процессы в теплоизоляционных конструкциях теплопроводов, которые существенно изменяют структуру материала, увеличивая количество сквозных пор и их размеры, способствуя появлению трещин и других дефектов. Подобные изменения структуры тепловой изоляции приводят к увеличению эксплуатационной влажности и резкому снижению ее теплозащитных свойств [3].

Наблюдения за состоянием теплопроводов в проходных и непроходных каналах показывают [4], что объемная влажность теплоизоляции в каналах с воздушным зазором составляет величину до 6,5 %, а в каналах без воздушного зазора соответственно до 9,8 %. Таким образом, изоляция в каналах не бывает сухой.

На увеличение тепловых потерь в значительной степени сказывается разрушение изоляции в процессе эксплуатации теплопроводов. Исследования технического состояния трубопроводов показывают [5], что неизолированные или имеющие разрушенную теплоизоляцию участки часто составляют до 10 % их длины, в том числе неизолированные участки – до 5 %.

Аномальные тепловые потери наблюдаются в результате деформации конструкций тепловой изо-

ляции под воздействием собственного веса и деструктивных эксплуатационных факторов. В процессе эксплуатации происходит уплотнение и снижение толщины теплоизоляционного слоя в верхней части конструкции и провисание с образованием воздушной прослойки между теплоизоляционным слоем и трубопроводом в нижней ее части [5]. Вследствие уплотнения и уменьшения толщины теплоизоляционного слоя, а также увеличения конвективной составляющей переноса тепла в конструкции снижается ее приведенное термическое сопротивление, и существенно возрастают теплотехники [5].

Несмотря на то, что в современной научной литературе уделяется достаточно большое внимание вопросам, связанным с определением тепловых потерь в тепловых сетях различными способами [3, 4, 6–12], до настоящего времени отсутствовал целостный подход к расчетной оценке тепловых потерь реальных участков систем транспортировки тепла, учитывающий все возможные негативные факторы и процессы, возникающие при эксплуатации и влияющие на интенсификацию теплопереноса в рассматриваемых системах. Нет единой методики расчета тепловых потерь, учитывающей неоднородность теплоизоляции по длине трубопровода, а также факторы, снижающие теплозащитные свойства изоляционного покрытия: старение, изменение толщины изоляции, провисание, частичное отсутствие и увлажнение изоляции на некоторых участках теплотрассы от источника до потребителя.

Целью данной работы является анализ имеющихся подходов к расчету тепловых потерь теплопроводов и аналитическая оценка фактических потерь тепла при транспортировке теплоносителя с учетом технического состояния изоляции на каждом характерном участке трубопроводов и реальных условий эксплуатации тепловых сетей.

Постановка задачи

В нормативных документах [13, 14] предлагается два варианта расчетной оценки потерь тепловой энергии при транспортировке теплоносителя:

- по удельным нормативным потерям, сведенным в таблицы [13, 14] и зависящим от способа и года прокладки;
- по величинам термических сопротивлений, зависящим от способа прокладки, типа теплоизоляционной конструкции и ее фактического состояния [13–15].

Существует ряд программных продуктов [16–20], упрощающих теплогидравлический расчет участков тепловых сетей от источника до потребителя, которые различаются подходами к определению тепловых потерь.

Зарегистрированы программы [16, 19], основанные на расчете потерь тепла по удельным нормам. Такие программы предназначены в основном для прорисовки планов тепловых сетей и конструкторского расчета. Однако в [16, 19] имеются дополнительные модули для построения пьезометрических и температурных графиков, проведения гидравлических и тепловых расчетов. Расчет тепловых потерь в [16, 19] является дополнительной функцией.

Также существуют программные продукты [17, 20], в которых помимо определения тепловых потерь по удельным нормам есть возможность расчета потерь тепла по величинам термических сопротивлений в соответствии с нормами [13, 14].

Наиболее проработанным в настоящее время является коммерческий программный комплекс ZuluThermo [18]. Данный программный комплекс используется в ряде специализированных компаний при проектировании, прогностическом моделировании и проведении энергетических обследований тепловых сетей. С целью приближения расчетных значений тепловых потерь к фактическим в [18] есть возможность ввода поправочных коэффициентов на нештатные условия работы. Эти коэффициенты либо могут быть получены на основе испытаний, либо взяты путем экспертной оценки с существенным интервалом разброса [18].

Фактические потери, определенные на основе испытаний являются наиболее достоверными, но проведение тепловых испытаний по определению количественных значений тепловых потерь через изоляцию трубопроводов по существующим методикам требуют больших подготовительных работ, материальных ресурсов и прекращения теплоснабжения потребителей на время проведения испытаний. Очевидно, что подобные испытания невозможно провести на всех трубопроводах тепловых сетей. Следовательно, невозможно установить величины поправочных коэффициентов, которые, в соответствии с нормативными документами [13, 14, 21], предлагается использовать при определении тепловых потерь. Значения поправочных коэффициентов, определенных экспертным путем [18], имеют большой интервал разброса и вводят ощутимые погрешности в расчеты.

В настоящее время можно говорить о том, что ни в одном из имеющихся программных продуктов [16–20] нет возможности расчета фактических потерь тепла при транспортировке теплоносителя. Поэтому вопрос о расчетной оценке фактических потерь тепла трубопроводами с заданными характеристиками и учетом реальных условий эксплуатации остается открытым.

В данной работе в качестве примера рассматривается реальная однетрубная тепловая сеть в г. Кемерово. Схема фрагмента тепловой сети приведена на рисунке, характеристики ее отдельных участков сгруппированы в табл. 1.

Таблица 1. Характеристики участков тепловой сети

№	Условный диаметр, мм	Длина участка, м	Наружный диаметр изоляции, мм	Способ прокладки	Тип изоляции
1	400	300	560	Подземный	Пенополиуретан
2	200	30	315		
3	125	146	225		
4	50	50	125	Надземный	Пенополиуретан
5	50	15	125		
6	250	15	399		
7	250	520	399		
8	100	20	226		Минеральная вата
9	50	250	157		
10	50	660	157		
11	400	400	560	Подземный	Пенополиуретан
12	400	370	610		Минеральная вата
13	400	530	610		
14	400	150	610		Пенополиуретан
15	400	157	560		
16	400	100	610		
17	400	90	560		Минеральная вата
18	400	203	610		
19	400	110	610		Пенополиуретан
20	300	23	501		
21	50	17	125		
22	50	35	167		Минеральная вата

Потери тепла и снижение температуры теплоносителя при надземной и подземной в непроходных каналах прокладках тепловых сетей вычисляются по формулам, приведенным в [15].

При проведении исследований рассматривался ряд наиболее типичных [7, 22] нештатных режимов работы тепловых сетей:

- увлажнение тепловой изоляции (от незначительного (до 10 %) увлажнения и до полного (100 %) увлажнения изоляции с затоплением канала);
- отсутствие изоляции на теплопроводе;
- деформация теплоизоляционного покрытия.

В случае увлажненной изоляции потери тепла возрастают за счет увеличения теплопроводности слоя изоляции. Эффективная теплопроводность увлажненной изоляции рассчитывается по формуле [6]:

$$\lambda_{\text{эф}} = \lambda_{\text{из}} \varphi_{\text{из}} + \lambda_{\text{ж}} \varphi_{\text{ж}},$$

$$\varphi_{\text{из}} + \varphi_{\text{ж}} = 1,$$

$$\varphi_{\text{ж}}^{\text{max}} = f,$$

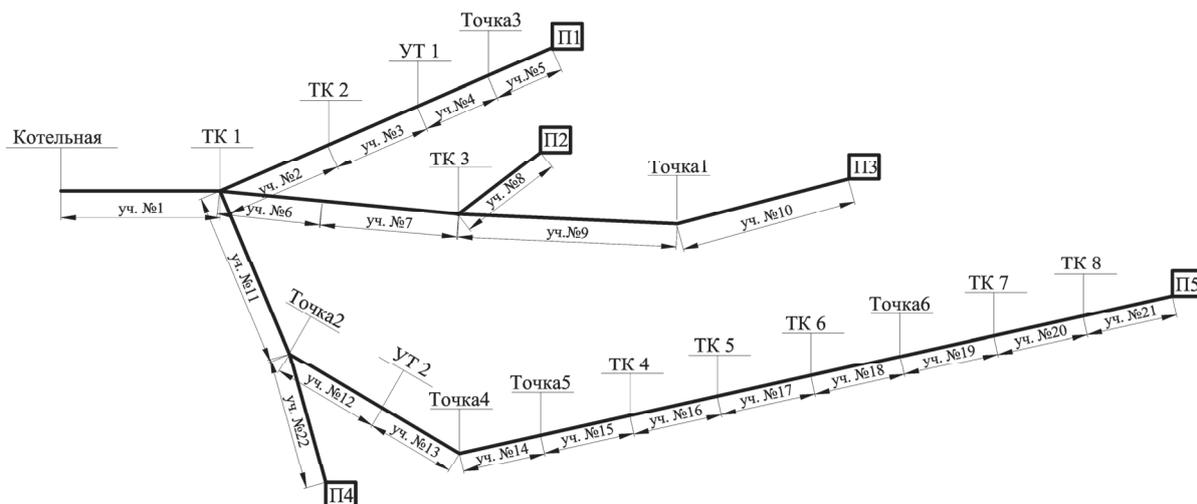


Рисунок. Схема тепловой сети: котельная – источник теплоснабжения; П1–П5 – потребители № 1–5; уч. № 1–22 – характерные участки тепловой сети с различными геометрическими размерами трубопроводов, условиями прокладки или состоянием изоляции; точки 1–6 – точки, обозначающие границу смены геометрических размеров трубопроводов, условий прокладки или изменения состояния изоляции; ТК 1–8 – тепловая камера № 1–8; УТ 1, 2 – узел тепловой № 1, 2

где $\varphi_{из}$, $\varphi_{ж}$ – долевые распределения теплоизоляции и жидкости; $\varphi_{ж}^{max}$ – предельная доля содержания жидкости в материале изоляции; $f=0...1,0$ – доля открытой пористости материала теплоизоляции.

Также рассматривался только вариант достаточно умеренной деформации слоя тепловой изоляции [22]. Наличие деформации изоляции теплопровода учитывалось уменьшением толщины слоя в верхней части и провисанием теплоизоляции в нижней части на величину, равную полутолщине изоляции [22]. Толщина воздушной прослойки соответствовала толщине слоя тепловой изоляции в верхней части конструкции [22]. Тепловые потери теплопровода в этих условиях вычислялись по методике [22].

Исходные данные

Для иллюстрации методики расчета тепловых потерь рассмотрим модельную задачу. Согласно [13] расчет тепловых потерь при качественном регулировании проводится при средних климатических условиях района. Для г. Кемерово средняя годовая температура наружного воздуха составляет 253 К [23]. Средняя температура теплоносителя равна 363 К, температура воздуха в канале, в соответствии с [15], составляет 296 К, а средняя температура грунта – 278 К.

Для оценки степени влияния нештатных условий работы теплопроводов на увеличение тепловых потерь по сравнению с нормативными потерями, принятыми по нормам [14], и проектными, рассчитанными по методике [13–15], используемой в перечисленных выше программных продуктах [16–20], рассматривалось несколько комбинаций типичных вариантов эксплуатации тепловых сетей.

Вариант 1. Воздух в непроходных каналах является влажным. Такая ситуация наиболее распространена, поскольку большинство каналов не вентилируются.

Вариант 2. Теплоизоляция на участке № 13 увлажнена на 30 %, на участке № 14 – на 100 %, на участке № 15 – на 30 %, на участке № 18 – на 70 %.

Вариант 3. Теплоизоляция на участке № 1 увлажнена на 100 %, на участке № 11 – на 70 %, на участке № 22 – на 10 %.

Вариант 4. На участках № 4, 6, 8, 20 отсутствует теплоизоляция.

Вариант 5. На участках № 1, 4, 19 наблюдается умеренная деформация слоя теплоизоляции.

Под проектным режимом подразумеваются идеальные условия эксплуатации тепловых сетей: трубопроводы изолированы в соответствии с [21], изоляция находится в сухом состоянии, воздух в каналах сухой.

Результаты исследований

Основные результаты расчетов потерь тепловой энергии и падения температуры теплоносителя приведены в табл. 2.

Из табл. 2 видно, что эксплуатация рассматриваемой тепловой сети (рисунок) в условиях, отличающихся от проектных, приводит к ожидаемому увеличению тепловых потерь. Например, при учете увлажнения воздуха в непроходных каналах, тепловые потери на пути к потребителям с преобладанием подземного способа прокладки теплопроводов возрастают в 1,12...1,25 раз по сравнению с проектными.

По варианту 2 при незначительном увлажнении (до 30 %) около 28 % протяженности тепловой сети до потребителя П5 и при полном увлажнении (100 %) 14 % протяженности тепловой сети тепловые потери на пути к потребителю П5, по сравнению с проектными, возрастают в 1,69 раз.

В варианте 3 при значительном увлажнении (более 70 %) 95 % протяженности трубопроводов до потребителя П4 и при незначительном увлаж-

Таблица 2. Результаты расчета тепловых потерь и температуры теплоносителя (модельная задача)

Расчет	Потребитель 1		Потребитель 2		Потребитель 3		Потребитель 4		Потребитель 5	
	$T_{п1}$, К	$Q_{п1}$, Вт	$T_{п2}$, К	$Q_{п2}$, Вт	$T_{п3}$, К	$Q_{п3}$, Вт	$T_{п4}$, К	$Q_{п4}$, Вт	$T_{п5}$, К	$Q_{п5}$, Вт
Нормативный	–	29500	–	51489	–	71601	–	49840	–	170488
Проектный	362,85	17290	362,77	30245	362,41	53274	362,81	29292	360,57	170030
Вариант 1	362,79	21748	362,76	33560	362,40	56587	362,76	37106	360,32	190220
Вариант 2	362,79	21748	362,75	33560	362,40	56587	362,76	37106	358,78	287170
Вариант 3	362,73	39939	362,69	51743	362,33	74752	362,56	72604	360,13	225000
Вариант 4	361,96	56711	361,78	94898	362,08	90338	362,76	37106	360,33	190220
Вариант 5	362,78	24669	362,75	36482	362,39	59350	362,75	39871	360,29	194530

нении 5 % трубопроводов потери тепла увеличиваются в 2,48 раза.

При отсутствии изоляции наблюдаются максимальные потери тепловой энергии. В частности, при разрушении изоляции всего на 9 % длины тепловой сети до потребителя П1 потери увеличиваются в 3,28 раза по сравнению с потерями при проектных условиях эксплуатации (вариант 4).

При деформации изоляции (вариант 5) на 64 % длины тепловой сети от общей протяженности трубопроводов до потребителя П1 теплотери возрастают в 1,43 раза.

Полученные результаты свидетельствуют о важности и необходимости учета реальных условий эксплуатации тепловых сетей при расчетной оценке потерь тепла. Расчет фактических тепловых потерь позволит оценить масштаб тепловых потерь, выявить «проблемные» места на участках тепловых сетей и принять соответствующие меры по устранению непроектных режимов работы. Своевременные ремонтные работы и оперативное реагирование теплоснабжающих компаний в свою очередь обеспечат частичное выполнение программы энергосбережения [1].

Следует обратить внимание на то, что нормативные потери для трубопроводов с изоляцией из пенополиуретана (табл. 2) на 30 % превышают проектные потери. Поэтому при учете неудовлетворительного состояния изоляции трубопроводов фактические потери, возрастая в среднем на 30...50 % по сравнению с проектными, в некоторых случаях не превышают нормативные (потребители П1–П4, вариант 2, табл. 2). Это обстоятельство позволяет говорить о возможном пересмотре и ужесточении нормативных потерь для участков тепловых сетей, имеющих изоляцию с высоким термическим сопротивлением.

Для трубопроводов с преобладанием теплоизоляции из минеральной ваты все закономерно – проектные потери близки к нормативным (потребитель П5, табл. 2).

На основании полученных результатов можно сделать вывод о том, что действующим нормам

удовлетворяют только устаревшие изоляционные конструкции с применением минеральной ваты. В настоящее время все большее распространение получают более эффективные изоляционные материалы с большим термическим сопротивлением, например, пенополиуретановая изоляция. Для таких материалов действующие нормы потерь тепла оказываются существенно завышенными, что позволяет относить к нормативным потерям даже потери, связанные с плохим техническим состоянием и непроектными условиями работы тепловых сетей. Завышенные нормативные тепловые потери не стимулируют теплоснабжающие компании к действиям в сторону сокращения потерь тепла, скорее наоборот, способствуют их бездействию.

Снижение температуры теплоносителя по длине для исследуемой системы (рисунок) при наличии загоплений, деформации и частичном разрушении изоляции трубопроводов относительно невелико (табл. 2). Это объясняется сравнительно малыми протяженностью рассматриваемой тепловой сети (рисунок) и масштабами введенных негативных факторов. Необходимо отметить, что типичными протяженностями трубопроводов в тепловых сетях являются длины в несколько десятков км [2]. В этих условиях снижение температуры теплоносителя может быть существенным.

Выводы

Проведена аналитическая оценка транспортных потерь тепла в тепловых сетях с учетом реальных условий эксплуатации тепловых сетей и неоднородности состояния теплоизоляции по длине трубопровода.

Показана необходимость ужесточения нормативных потерь для участков тепловых сетей, имеющих теплоизоляцию с высоким термическим сопротивлением.

Работа выполнена в рамках ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 гг. (ГК № П1445 от 03.09.09) и гранта президента РФ (грант № МК-1284.2011.8).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ФЗ № 261 от 23 ноября 2009 г. «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации».
2. Мельникова М.П. Теплоснабжение России: состояние и перспективы развития // ЭСКО. – 2010. – № 3. URL: <http://escosys.narod.ru> (дата обращения: 05.06.2011).
3. Слепченко В.С., Рондель А.Н., Шаповалов Н.Н. Влияние различных эксплуатационных факторов на тепловые потери в бесканальных подземных трубопроводах тепловой сети // Новости теплоснабжения. – 2002. – № 6. – С. 18–23.
4. Муныбин Л.И., Арефьев Н.Н. К вопросу о методике расчета тепловых потерь при различных вариантах тепловой изоляции // Новости теплоснабжения. – 2002. – № 4. – С. 35–38.
5. Шойхет Б.М., Ставрицкая Л.В. Обследование технического состояния и реконструкция тепловой изоляции эксплуатируемых магистральных теплопроводов // Энергосбережение. – 2002. – № 3. – С. 60–62.
6. Кузнецов Г.В., Половников В.Ю. Численный анализ потерь тепла магистральными теплопроводами в условиях полного или частичного затопления // Инженерно-физический журнал. – 2008. – Т. 81. – № 2. – С. 303–311.
7. Кузнецов Г.В., Половников В.Ю. Тепловые потери магистральных трубопроводов в условиях полного или частичного затопления // Известия вузов. Проблемы энергетики. – 2006. – № 3–4. – С. 3–12.
8. Пахомов А.А. Как посчитать тепловые потери в реальных условиях эксплуатации? // Жилищно-коммунальный комплекс Урала. – 2007. – № 6 (38). – С. 10–17.
9. Гудзюк В.Л., Шомов Е.В. Оперативная оценка реальных тепловых потерь при транспорте пара и горячей воды // Новости теплоснабжения. – 2010. – № 11. – С. 30–33.
10. Байбаков С.А. К вопросу о методах и проблемах определения фактических тепловых потерь в тепловых сетях // Новости теплоснабжения. – 2010. – № 6. – С. 36–39.
11. Семенов В.Г. Определение фактических тепловых потерь через теплоизоляцию в сетях централизованного теплоснабжения // Новости теплоснабжения. – 2003. – № 4. – С. 30–33.
12. Хромченков В.Г., Иванов Г.В., Хромченкова Е.В. Определение потерь тепла в тепловых сетях // Новости теплоснабжения. – 2006. – № 6. – С. 39–43.
13. СНиП 41.03-2003. Тепловая изоляция оборудования и трубопроводов. – М.: Изд-во стандартов, 2004. – 25 с.
14. Методические указания по составлению энергетической характеристики для систем транспорта тепловой энергии по показателю «тепловые потери». Ч. 3: РД 153-34.20.523-2003. – М.: СПО ОРГРЭС, 2003. – 28 с.
15. Соколов Е.Я. Теплофикация и тепловые сети. – М.: Издательский дом МЭИ, 2006. – 472 с.
16. Шалагинова З.И. Методы теплогидравлического анализа режимов крупных теплоснабжающих систем // Новости теплоснабжения. – 2009. – № 12. – С. 44–49.
17. Прокофьев С.А., Верховодова О.А., Жданов О.В., Шахотин А.А. Опыт реконструкции и эксплуатации систем теплоснабжения ООО «Нижегородтеплогаз» // Новости теплоснабжения. – 2010. – № 12. – С. 13–27.
18. Официальный сайт Политерм. 2011. URL: <http://www.politerm.com.ru/zuluthermo/> (дата обращения: 30.05.2011).
19. Официальный сайт CityCom. 2011. URL: <http://www.citycom.ru/citycom/> (дата обращения: 31.05.2011).
20. Хромченков В.Г., Яворский Ю.В., Полуэктова Т.Ю., Самарин А.Ю. Программный комплекс для определения оптимальной толщины теплоизоляции при реконструкции тепловых сетей // Новости теплоснабжения. – 2010. – № 10. – С. 34.
21. СП 41-103-2000. Проектирование тепловой изоляции оборудования и трубопроводов. – М.: Госстрой России, 2001. – 42 с.
22. Половников В.Ю., Рахимова Ю.Н. Численный анализ тепловых потерь теплопроводов в условиях деформации и нарушения целостности слоя тепловой изоляции // Теплофизические основы энергетических технологий: Матер. II Всерос. научно-практ. конф. – Томск: Изд-во ТПУ, 2011. – С. 296–300.
23. СНиП 23-01-99. Строительная климатология. – М.: Изд-во стандартов, 2004. – 70 с.

Поступила 22.06.2011 г.