

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Журавлев, Ю.Н. Активные магнитные подшипники: теория, расчет, применение [Текст] / Ю.Н. Журавлев.— СПб.: Политехника, 2003.— 206 с.
2. Chiba, A. Magnetic Bearings and Bearingsless Drives [Текст] / A. Chiba T. Fykao, O. Ichikawa [и др.] // Изд-во ELSEVIER, 2005.— 381 с.
3. Постоянные магниты [Текст]: Справочник / А.Б. Альтман, А.Н. Герберг, П.А. Гладышев [и др.]; Под ред. Ю.М. Пятина— М.: Энергия, 1980.— 488 с.

УДК 621.643

Ю.С. Цыганкова

ДЕКОМПОЗИЦИОННЫЙ ПОДХОД К РАСЧЕТУ ПОТЕРЬ ТЕПЛОТЫ В ТЕПЛОВЫХ СЕТЯХ

Тепловое хозяйство России в течение длительного периода времени развивалось по пути концентрации тепловых нагрузок и централизации теплоснабжения на основе комбинированной выработки тепловой и электрической энергии. Это обусловило значительную протяженность тепловых сетей в России [1]. В настоящее время их состояние специалистами оценивается как неудовлетворительное [2].

В современных условиях, когда проблеме энергосбережения уделяется значительное внимание [3], необходимым условием экономически эффективной работы тепловых сетей является снижение непроизводительных потерь теплоты через теплоизоляционные конструкции при транспортировке тепловой энергии [4].

Согласно нормам [5] все трубопроводы, используемые при транспортировке теплоты, должны быть изолированы. Несмотря на это, на практике могут возникать ситуации, когда отдельные участки трубопроводов имеют увлажненную или деформированную тепловую изоляцию либо вообще лишены ее. Такое состояние изоляционной конструкции может быть вызвано различными негативными факторами, возникающими в процессе эксплуатации теплотрассы (затопление непроходных каналов дождевыми, грунтовыми или талыми водами, аварии в системе теплоснабжения и водоотведения, резкие перепады температуры окружающей среды, длительная эксплуатация). В этих условиях фактическое значение коэффициента теплопроводности теплоизоляции трубопро-

вода отличается от справочного значения [6]. Аналитический способ определения тепловых потерь [6] не учитывает влияние перечисленных факторов и соответственно приводит к недостаточно точному расчету транспортных тепловых потерь.

Цель нашей работы — предложить новый подход к расчету фактических потерь теплоты на каждом характерном участке тепловой сети, который учитывал бы не только геометрические характеристики и способы прокладки трубопроводов, но и влияние нештатных условий эксплуатации и реального технического состояния изоляции на изменение тепловых потерь.

Постановка задачи

В качестве примера рассматривается фрагмент типичной двухтрубной тепловой сети г. Кемерово (рис.1). Тип изоляции на участках $L1-L19$ — пенополиуритан (ППУ), толщина которого принята согласно [7], на участках $L20-L26$ — минеральная вата (МВ) с толщиной согласно [6]. Преимущественный способ прокладки — подземный в непроходном канале, на участках $L6-L10$ — надземный. Расчет тепловых потерь при качественном регулировании проводится при средних климатических условиях района [5]. Для г. Кемерово согласно СНиП 23-01-99 температура наружного воздуха — 273 К, средняя температура грунта на глубине заложения (8 м) подземного трубопровода — 278 К, температура прямой сетевой воды — 363 К, температура обратной сетевой воды — 323 К.

счетах рассматривался вариант достаточно умеренной деформации слоя тепловой изоляции [10]. Наличие деформации изоляции теплопровода учитывалось уменьшением толщины слоя в верхней части и провисанием теплоизоляции в нижней части на величину, равную полутолщине изоляции [10]. Толщина воздушной прослойки соответствовала толщине слоя тепловой изоляции в верхней части конструкции [10]. Тепловые потери теплопровода в этих условиях вычислялись по методике, описанной в [10].

Результаты расчетов и их обсуждение

Основные результаты анализа тепловых потерь представлены в табл. 1 и на рис. 2. В табл. 1 приведены значения нормативных ($Q_{\text{норм}}$), про-

ектных ($Q_{\text{пр}}$), расчетных (фактических $Q_{\text{факт}}$) тепловых потерь и сравнение фактических потерь с проектными. Проектные потери — это потери теплоты при штатных условиях эксплуатации тепловых сетей (трубопроводы изолированы в соответствии с [6], изоляция находится в сухом состоянии, воздух в каналах сухой).

Масштабность негативных факторов, влияющих на изменение тепловых потерь, выбрана на основании исследований [12, 13] и является достаточно типичной для реальных условий эксплуатации тепловых сетей.

Результаты расчетов, приведенные в табл. 1 и на рис. 2, подтверждают ожидаемый рост фактических потерь теплоты относительно проектных при учете влияния эксплуатационных факторов

Таблица 1

Результаты расчета тепловых потерь

Потребитель	Длина ТС, м	Условия прокладки	Тепловые потери, кВт			$Q_{\text{факт}}/Q_{\text{пр}}$
			Норма	Проект	Факт	
П1	3856	33,1 % — влажный воздух в канале, 15,6 % — деформация изоляции, 4,7 % — отсутствует изоляция, 3,5 % — 100 %-е увлажнение изоляции	330,12	217,34	645,29	3,0
П2	3726	34,2 % — влажный воздух в канале, 16,1 % — деформация изоляции, 3,6 % — 100 %-е увлажнение изоляции, 1,3 % — отсутствует изоляция	321,79	211,01	301,78	1,4
П3	2195	58,1 % — влажный воздух в канале, 31,9 % — деформация изоляции, 10 % — 100 %-е увлажнение изоляции	173,73	118,10	159,97	1,4
П4	4184	30,5 % — влажный воздух в канале, 14,3 % — деформация изоляции, 13,4 % — 40 %-е увлажнение изоляции, 5,2 % — 100 %-е увлажнение изоляции, 1,4 % — отсутствует изоляция	259,77	188,10	258,34	1,4
П5	4525	28,2 % — влажный воздух в канале, 13,3 % — деформация изоляции, 12,4 % — 40 %-е увлажнение изоляции, 12,7 % — 100 %-е увлажнение изоляции, 1 % — отсутствует изоляция	274,01	198,99	285,81	1,4
П6	2620	9 % — 100 %-е увлажнение изоляции,	149,72	175,09	214,74	1,2
П7	2675	10 % — 100 %-е увлажнение изоляции, 3,4 % — 60 %-е увлажнение изоляции	153,28	179,46	233,76	1,3

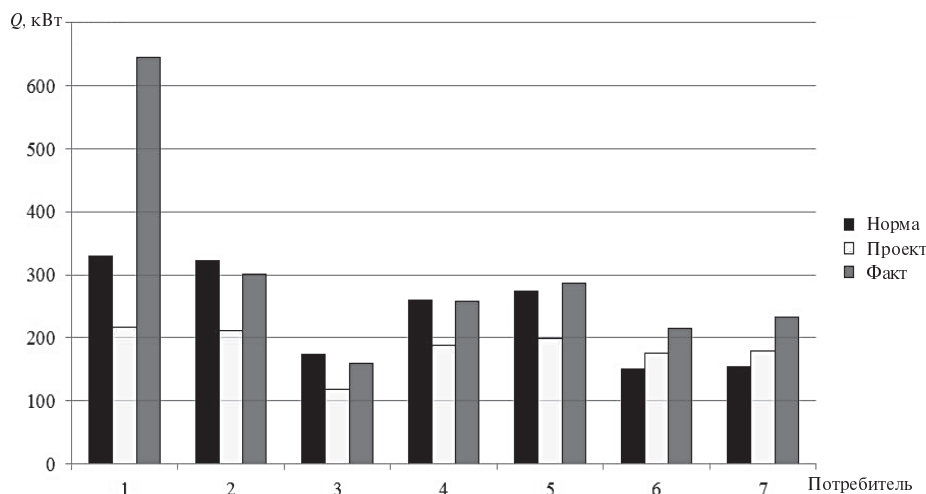


Рис. 2. Сравнение нормативных, проектных и фактических потерь тепла

на термическое сопротивление рассматриваемых типов изоляции. Например, для потребителя П2 при наличии влажного воздуха в непроходных каналах на протяжении 34 % от общей длины тепловой сети, деформации изоляции (16 % длины), полном увлажнении изоляции (4 % длины) и отсутствии изоляции (1 % длины) потери возрастают в 1,4 раза от уровня проектных потерь, рассчитанных по методике [6]. Для потребителя П7 при полном увлажнении изоляции на 10 % протяженности теплотрассы и частичном (до 60 %) увлажнении на 3 % протяженности теплотрассы тепловые потери возрастают в 1,3 раза относительно проектных. Аналогично для оставшихся потребителей (П1, П3, П4, П5, П6) в зависимости от масштабности и значимости негативных факторов наблюдается закономерный значительный рост тепловых потерь через теплоизоляционные конструкции. Полученные результаты служат доказательством целесообразности применения предлагаемого декомпозиционного подхода при определении фактических потерь теплоты теплопроводов. Такой подход позволяет более достоверно оценивать тепловые потери в действующих тепловых сетях по сравнению с методикой [6] и выявлять участки теплопроводов, где есть потенциал для снижения тепловых потерь.

Сопоставление расчетных потерь теплоты с допустимыми [14] для потребителей П2, П3, П4 свидетельствует о том, что суммарные тепловые потери не превышают нормативные, несмотря на ввод возможных нештатных условий

эксплуатации. Это объясняется тем, что действующие нормы [14] рассчитаны на материалы изоляции с низким термическим сопротивлением (такие, как минеральная вата), но оказываются завышенными для современных типов изоляции с высоким термическим сопротивлением. Увеличение транспортных потерь теплоты, не превосходящее установленные нормы [14], не контролируется эксплуатирующими компаниями ввиду отсутствия официальной методики расчета тепловых потерь, которая учитывает изменение теплозащитных свойств изоляции в процессе эксплуатации. Следовательно, существующие нормативные документы не отражают возможный потенциал энергосбережения в системе транспорта тепловой энергии.

Предлагаемый декомпозиционный подход к определению тепловых потерь позволяет не только выявить возможный потенциал энергосбережения, но и обосновать выбор участков тепловых сетей, требующих оперативного ремонта. Своевременные ремонтные работы и оперативное реагирование теплоснабжающих компаний на нештатные условия эксплуатации тепловых сетей избавят потребителей от завышенных платежей и обеспечат выполнение программы энергосбережения, обозначенной в ФЗ № 261 от 23 ноября 2009 года.

Для анализа степени влияния эксплуатационных факторов на изменение удельных тепловых потерь рассмотрим подземный трубопровод с условным диаметром $d_v = 400$ мм, изолирован-

ного ППУ и проложенного в непроходном канале. В табл. 2 приведены результаты расчетов удельных тепловых потерь отдельно для подающего и обратного трубопровода и дано сравнение фактических потерь ($q_{\text{факт}}$) с проектными ($q_{\text{пр}}$).

Из табл. 2 видно, как влияют на увеличение удельных тепловых потерь различные нештатные условия эксплуатации тепловых сетей. Наличие влажного воздуха в канале приводит к увеличению потерь теплоты по сравнению с проектными условиями эксплуатации в 1,27 раза для подающего трубопровода и в 1,23 раза для обратного. При увеличении влагосодержания изоляции тепловые потери возрастают пропорционально изменению объемной доли влаги в структуре изоляции и в предельном случае (100 %-е увлажнение) превышают проектные в 2,75 раза для подающего и 2,26 для обратного трубопроводов. Деформация слоя изоляции приводит к увеличению потерь теплоты в подающем трубопроводе в 1,18 раза, а в обратном — в 1,16 раза.

Наибольшие потери имеют место при отсутствии изоляции на трубопроводе. Для этого случая потери подающего трубопровода возрастают более чем в 12 раз. В результате сильного теплоотвода от подающего трубопровода температура воздуха в канале растет и превышает температуру теплоносителя в обратном трубопроводе. Для рассматриваемых условий эксплуатации температура воздуха в канале превысила температуру обратной сетевой воды на 5 °С. По этой

причине потери теплоты обратным трубопроводом при отсутствии изоляции имеют отрицательное значение (см. табл. 2). Таким образом, теплоноситель в обратном трубопроводе нагревается от воздуха в канале.

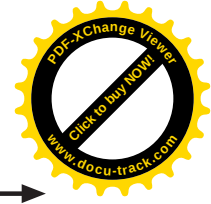
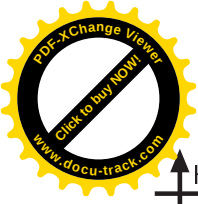
Следует отметить, что температура обратной сетевой воды контролируется на источнике теплоснабжения и оговаривается при заключении договоров поставки теплоты потребителям. Значение температуры обратной сетевой воды — одна из основных режимных характеристик, используемых при анализе состояния тепловых сетей и эффективности работы системы теплоснабжения. Завышенная температура обратной сетевой воды — результат ненормативной работы системы теплоснабжения. Теплоисточники на температуру возвращаемой сетевой воды повлиять не могут, поэтому за повышенную температуру обратной воды для потребителей (ЖКХ, предприятия и др.) предусмотрены штрафы.

Удельные нормативные потери для подземного трубопровода $d_y = 400$ мм прокладки 2004 года составляют 83 Вт/м [14]. Суммарные потери для подающего и обратного трубопроводов в проектных условиях (см. табл. 2) равны 56,4 Вт/м. Следовательно, нормативные потери при ППУ изоляции завышены на 32 % относительно проектных. Это обстоятельство подтверждает сделанный ранее вывод о том, что существующие нормативные документы не подходят для оцен-

Таблица 2

Сравнение удельных потерь теплоты
при различных условиях эксплуатации и состоянии изоляции

Условия эксплуатации	Удельные расчетные потери, Вт/м		$q_{\text{факт}}/q_{\text{проект}}$	
	в подающем трубопроводе	в обратном трубопроводе	в подающем трубопроводе	в обратном трубопроводе
Проектные	37,9	18,5	1	1
Влажный воздух в канале	48,1	22,8	1,27	1,23
Увлажнение изоляции на 10 %	46,1	22,0	1,22	1,19
Увлажнение изоляции на 70 %	87,3	37,0	2,30	2,00
Увлажнение изоляции на 100 %	104,1	41,7	2,75	2,26
Отсутствует изоляция	465,4	−66,2	12,28	−3,58
Деформация изоляции	44,8	21,4	1,18	1,16



ки потерь теплоты современными типами изоляционных конструкций с высоким термическим сопротивлением. Опираясь на полученные результаты, можно утверждать, что целесообразно ввести в удельные нормативные потери [14] градацию по величине термического сопротивления изоляционного материала. Например, для материалов с высоким термическим сопротивлением, таких, как ППУ изоляция, можно рекомендовать ужесточение нормативных потерь не менее чем на 30 %.

Продемонстрированы значительные преимущества декомпозиционного подхода в плане точности определения фактических потерь теплоты с учетом условий эксплуатации и технического

состояния изоляции на каждом характерном участке трубопровода по сравнению с существующей методикой расчета.

Предлагаемый подход позволяет выявлять возможные пути уменьшения тепловых потерь в сетях централизованного теплоснабжения.

Показан потенциал энергосбережения при транспортировке теплоты в тепловых сетях.

Обоснована целесообразность ужесточения нормативных тепловых потерь для трубопроводов, изолированных современными материалами.

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. **Слепченко, В.С.** Система теплоснабжения Санкт-Петербурга на современном этапе и возможности ее модернизации [Текст] / В.С. Слепченко, Г.П. Петраков // Инженерно-строительный журнал.— 2009. № 7.— С. 26–29.
2. **Слепченко, В.С.** Повышение энергоэффективности теплоизоляции трубопроводов тепловых сетей северных и северо— восточных регионов России [Текст] / В.С. Слепченко, Г.П. Петраков // Инженерно-строительный журнал.— 2011. № 4.— С. 26–32.
3. **Аверьянова, О.В.** Энергосбережение в тепловых сетях за счет параметра теплоносителя [Текст] / О.В. Аверьянова // Инженерно-строительный журнал.— 2009. № 5.— С. 43–46.
4. **Лундышев, И.А.** Перспективные технологии применения монолитного пенобетона для теплоизоляции трубопроводов [Текст] / И.А. Лундышев // Инженерно-строительный журнал.— 2008. № 1.— С. 38–41.
5. **СНиП 41.03–2003.** Тепловая изоляция оборудования и трубопроводов [Текст].— М.: Изд-во стандартов, 2004.— 25 с.
6. **СП 41–103–2000.** Проектирование тепловой изоляции оборудования и трубопроводов. [Текст] / Госстрой России.— М., 2001.— 42 с.
7. **ГОСТ 30732–2006.** Трубы и фасонные изделия стальные с тепловой изоляцией из пенополиуретана с защитной оболочкой [Текст].— М.: ФГУП «Стандартинформ», 2007.— 49 с.
8. **Соколов, Е.Я.** Теплофикация и тепловые сети [Текст]: учебник для вузов / Е.Я. Соколов.— М.: Изд. дом МЭИ, 2006.— 472 с.
9. **Кузнецов, Г.В.** Анализ тепловых потерь теплотрубопроводов в условиях взаимодействия с влажным воздухом [Текст] / Г.В. Кузнецов, В.Ю. Половников // Энергосбережение и водоподготовка.— 2009. № 2 (58).— С. 37–40.
10. **Рахимова, Ю.Н.** Анализ тепловых потерь теплотрубопроводов в условиях деформации и нарушения целостности теплоизоляции [Текст] / Ю.Н. Рахимова // Современная техника и технологии: Матер. XVII Междунар. научно-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых.— Томск, 2011.— Т. 3.— С. 257–258.
11. **Кузнецов, Г.В.** Численный анализ потерь тепла магистральными теплотрубопроводами в условиях полного или частичного затопления [Текст] / Г.В. Кузнецов, В.Ю. Половников // Инженерно-физический журнал.— 2008.— Т. 81, № 2.— С. 303–311.
12. **Шойхет, Б.М.** Обследование технического состояния и реконструкция тепловой изоляции эксплуатируемых магистральных теплотрубопроводов [Текст] / Б.М. Шойхет, Л.В. Ставрицкая // Энергосбережение.— 2002. № 3.— С. 60–62.
13. **Слепченко, В.С.** Влияние различных эксплуатационных факторов на тепловые потери в бесканальных подземных трубопроводах тепловой сети [Текст] / В.С. Слепченко, А.Н. Рондель, Н.Н. Шаповалов // Новости теплоснабжения.— 2002. № 6.— С. 18–23.
14. **ФЗ № 325** от 30 декабря 2008 г. «Об организации в министерстве энергетики Российской Федерации работы по утверждению нормативов технологических потерь при передаче тепловой энергии».