

РАСЧЕТ ТЕПЛОПТЕРЬ В СИСТЕМАХ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ

При эксплуатации систем теплоснабжения часть переданного от источника тепла теряется через тепловую изоляцию трубопроводов системы теплоснабжения. Как отмечено в [1], объем теплоснабжения в целом по стране составляет около 1650 млн. Гкал/год, а тепловые потери через изоляцию составляют около 300 млн. Гкал/год (18%) при нормативных 150 млн. Гкал/год.

В Хабаровске тепловые потери через изоляцию превышают 30% от общего теплоснабжения. Определение величины тепловых потерь через изоляционное покрытие трубопроводов системы теплоснабжения представляет достаточно сложную задачу.

Тепловые потери в магистральных трубопроводах водяных систем теплоснабжения определяются путем проведения специальных испытаний, проводимых в соответствии с [2], или, чаще всего, расчетно-аналитическим методом. Измерить тепловые потери по методике [2] можно только в отопительный период и только для весьма протяженного участка трубопроводов (более 3 км) [3]. Фактическая величина тепловых потерь в квартальных тепловых сетях не поддается прямому измерению по существующей методике по техническим причинам [3].

Кроме того, проведение тепловых испытаний по определению количественных значений тепловых потерь через изоляцию трубопроводов по существующим методикам требует больших подготовительных работ, материальных ресурсов и прекращения теплоснабжения потребителей на время проведения испытаний. Очевидно, теплоснабжающей организации, имеющей на своем балансе более 5000 км тепловой сети, провести подобные испытания на всех трубопроводах предприятия, с учетом инженерно-геологических условий функционирования и эксплуатации трубопроводов, не реально. Следовательно, невозможно установить величины поправочных коэффициентов, которые, в соответствии с нормативными документами, предлагается использовать при определении тепловых потерь.

Возможный способ определения тепловых потерь с помощью приборов учета тепловой энергии у потребителей в настоящее время не реален, из-за их отсутствия у большинства потребителей. В то же время, расчетные тепловые потери, выполненные по нормативным документам, не учитывают потери, связанные с естественным «старением» теплогидроизоляции и, как следствие, с уменьшением ее термического сопротивления. Они также не учитывают реально более высоких значений теплопроводности теплоизоляции и грунта вследствие явлений массопереноса (газо-, паро- и водопроводности), влияние состава грунта, фактическую глубину заложения трубопроводов, природных условий местности. Отсутствие достаточного технического и правового обоснования, которые необходимы для введения поправочных коэффициентов, приводят к тому, что теплоснабжающая организация на основании существующих нормативных документов не учитывает реальные условия эксплуатации и показывает заниженные тепловые потери при транспортировке тепла.

В настоящее время для расчета тепловых потерь через изоляцию трубопроводов систем теплоснабжения используются две методики расчета: первая методика – на основании НТД ОРГРЕС [2] и вторая – на основании СНиП [4]. Остановимся на них более подробно.

Первая методика расчета базируется на данных о нормативных тепловых потерях изолированных водяных трубопроводов в зависимости от типа прокладки, диаметров трубопроводов, температуры теплоносителя.

Нормы тепловых потерь изолированного водяного трубопровода при надземной прокладке, взятые из [2] приведены в табл. 1.

Однако в [2] отсутствуют сведения о том, каким образом получены эти нормативные тепловые потери, а также, для какого типа и какой толщины изоляции эти потери нормированы.

Нормы потерь тепла одним изолированным водяным трубопроводом при надземной прокладке с расчетной среднегодовой температурой наружного воздуха +5⁰С.

Наружный Диаметр труб d _н , мм	Нормы потерь тепла, Вт/м			
	Разность среднегодовой температуры сетевой воды в подающем или обратном трубопроводах и наружного воздуха, °С			
	45	70	95	120
32	17	27	36	44
49	27	31	42	52
57	24	35	46	57
76	29	41	52	64
82	32	44	58	70
108	36	50	64	78
133	41	56	70	86
159	44	58	75	93
194	49	67	85	102
219	53	70	90	110
273	61	81	101	124
325	70	93	116	139
377	82	108	132	157
426	95	122	148	174
478	103	131	158	186
529	110	139	168	197
630	121	154	186	220
720	133	168	204	239
820	157	195	232	270
920	180	220	261	302
1020	209	255	296	339
1420	267	325	377	441

Вторая методика расчета базируется на СНиП 2.04.11-88 «Тепловая изоляция оборудования и трубопроводов» [4]. Эта методика в настоящее время подвергается критике из-за того, что результаты расчетов сильно расходятся с данными, получаемыми при натурных испытаниях. Несмотря на правильность основных положений, эта методика также имеет недостатки:

- а) значения коэффициентов теплопроводности теплоизоляционных материалов, приведенные в [4], относятся к материалам в абсолютно сухом состоянии, что совершенно неприемлемо для трубопроводов подземной прокладки;
- б) существенно занижены поправочные коэффициенты на увлажнение материалов тепловой изоляции в зависимости от влажности грунта;
- в) не указываются реальные сроки допустимой эксплуатации теплоизоляционных и кровельных материалов и не приводятся поправочные коэффициенты на срок эксплуатации;
- г) не учитывается влияние ветра на трубопроводы надземной прокладки, хотя опыт эксплуатации убедительно свидетельствует о существенном влиянии ветра на тепловые потери.

Эти недостатки объясняются трудностью учета ряда факторов в связи со сложностью достаточно надежного и однозначного определения исходных данных для реальных условий эксплуатации трубопровода: скорость и направление ветра, коэффициент теплопроводности грунта, глубина заложения трубопровода, влажность тепловой изоляции, степень ее разрушения и многое другое. Кроме того, необходимо отметить, что СНиП, как нормативный документ, ориентирован на исправные и правильно сконструированные конструкции тепловых сетей, и нестандартные ситуации для трубопроводов с нарушением тепловой изоляции и кровельного слоя в методике СНиП вообще не рассматриваются. К сожалению, в ре-

альной практике именно такие ситуации встречаются все чаще. Основными причинами такого положения являются:

- а) разграбление покровного слоя из алюминия и жести как достаточно ценного материала;
- б) превышение нормативных сроков эксплуатации тепловой изоляции и ее разрушение, вплоть до полного оголения трубопровода, из-за недостатка финансовых средств на ее реконструкцию;
- в) замена металлического покровного слоя трубопроводов на продуваемые материалы (стеклоткани и др.) из-за более низкой их стоимости;
- г) значительное повышение влажности тепловой изоляции трубопроводов подземной прокладки из-за проникновения грунтовых и сточных вод в связи с неудовлетворительным состоянием дренажной системы тепловых сетей.
- д) значительное повышение тепловых потерь трубопроводов надземной прокладки из-за увлажнения ее за счет атмосферных осадков в связи с нарушением покровного слоя;
- е) значительное повышение тепловых потерь трубопроводов надземной прокладки из-за продувания ее ветром (особенно тепловой изоляции из минеральной ваты) в связи с нарушением покровного слоя.

В [4], также как и в [2], приводятся нормы теплотерь изолированных трубопроводов в зависимости от типа прокладки, диаметров трубопроводов и температуры теплоносителя. Нормы теплотерь изолированного водяного трубопровода при надземной прокладке, взятые из [4], приведены в табл.2.

Таблица 2.

Нормы плотности теплового потока одного изолированного трубопровода при надземной прокладке на открытом воздухе

Условный проход трубопровода, dy, мм	При числе работы в год более 5000 ч			При числе работы в год 5000 ч и менее		
	Средняя температура теплоносителя					
	50	100	150	50	100	150
25	11	20	30	12	23	34
40	12	24	36	15	27	40
50	14	25	38	16	30	44
65	15	29	44	19	34	50
80	17	32	47	21	37	54
100	19	35	52	23	41	60
125	22	40	57	26	46	66
150	24	44	62	29	52	73
200	30	53	75	36	63	89
250	35	61	86	42	72	103
300	40	68	96	48	83	115
350	45	75	106	54	92	127
400	49	83	125	60	100	139
450	53	88	123	66	108	149
500	58	96	135	72	117	162
600	66	110	152	82	135	185
700	75	122	169	94	151	205
800	83	135	172	105	168	228
900	92	149	205	116	185	281
1000	101	163	223	127	203	273

Однако в [4] не указано, при какой среднегодовой температуре наружного воздуха рассчитаны нормативные теплотери.

Сравним между собой данные, приведенные в [2] и [4].

Как видно из табл.3, расхождение между нормативными потерями изолированных трубопроводов при надземной прокладке может достигать 50-80%. Аналогичная картина наблюдается и для случая подземной прокладки трубопроводов. Возникает вопрос: «Какими нормами теплопотерь следует руководствоваться при проектировании тепловых сетей: приведенными в [2] или в [4]?» Однозначного ответа на этот вопрос нет! Энергоснабжающие организации считают, что следует руководствоваться данными ОРГРЕСа, а проектные организации считают, что следует руководствоваться данными СНиП.

Таблица 3.

Нормы теплопотерь одним изолированным трубопроводом при надземной прокладке при $\Delta t = t_1 - t_0 = 95^\circ\text{C}$

Условный проход трубопровода, d_y , мм	Нормы теплопотерь, q , Вт/м		
	По данным ОРГРЕС [2], q_1	По данным СНиП [4], q_2	q_2/q_1
50	30	46	1,53
100	35	64	1,83
150	44	75	1,7
200	53	90	1,7
300	68	116	1,7
400	83	148	1,78
500	96	168	1,75
600	110	186	1,69
800	135	232	1,72
1000	163	296	1,81

Предлагаемая авторами методика расчета тепловых потерь через изоляцию теплопроводов базируется на [4], но при этом учитываются дополнительные факторы, возникающие при эксплуатации тепловых сетей, а именно:

- старение покровного слоя;
- старение изоляции;
- увлажнение изоляции;
- глубина заложения трубопроводов при подземной прокладке.

К сожалению, не существует утвержденных методик для учета вышеперечисленных дополнительных факторов. Поэтому их учет возможен только на основе обработки литературных данных, полученных на основе натурного обследования тепловых сетей.

Все расчетные зависимости и поправочные коэффициенты, используемые в алгоритме расчета тепловых потерь, приняты на основе экспериментальных исследований, проведенных авторами настоящей статьи или по литературным данным.

Ниже показано, как вышеперечисленные факторы учтены в алгоритме расчета теплопотерь, предложенном авторами данной статьи.

1. Старение покровного слоя изоляции

По данным авторов [5, 6] максимальный срок службы покровного слоя тепловой изоляции составляет: листовые металлические материалы – 10 лет и более, неметаллические материалы (рубероид, стекло и лакоткань, изол и др.) – 3-5 лет. В пределах алгоритма расчета для каждого из используемых материалов покровного слоя вводится граничное значение, после которого считается, что покровный слой состарился и потерял свои защитные свойства. Старение для некоторых материалов начинается и раньше и поэтому вводится промежуточная стадия – частичное старение. За границу частичного старения принимается половина срока службы покровного слоя. Для частичного и полностью изношенного покровного слоя в алгоритме расчета вводятся поправочные коэффициенты, учитывающие влияние ветровой эрозии при надземной прокладке и увлажнение изоляции при подземной прокладке.

2. Старение изоляции

Под старением тепловой изоляции понимается необратимое изменение основных эксплуатационных свойств. Старение проявляется в изменении коэффициента теплопроводности, снижении прочности материала, что приводит к его сползанию, усадке, изменению толщины теплоизоляционного слоя.

Наиболее распространенным материалом для тепловой изоляции трубопроводов тепловой сети в г. Хабаровске является минеральная вата и материалы на ее основе. Исследование долговечности минераловатных материалов проводилось многими авторами [7]. К сожалению, большинство исследований было ориентировано на изучение старения минераловатной изоляции в условиях ее работы в конструкциях наружных стеновых панелей и покрытий зданий. Специальных исследований, посвященных вопросам старения минераловатной тепловой изоляции в конструкциях тепловых сетей нам не известно. Тем не менее, на основании данных [7] можно сделать определенные выводы.

Во-первых, характеристики минераловатных материалов сильно различаются в зависимости от марки изделия, его плотности в сухом состоянии, завода-изготовителя, толщины волокон, типа связующего и способа его нанесения, тепловой обработки изделий в процессе отверждения связующего. Такое большое количество влияющих факторов приводит к тому, что в литературных источниках приводятся весьма различающиеся данные по коэффициентам теплопроводности, гигроскопической влажности и влагоемкости материалов. Авторы статьи ориентировались на усредненные значения, представленные в нормативных и справочных изданиях.

Характер работы минераловатных материалов в конструкциях тепловой изоляции трубопроводов тепловых сетей наиболее близок к работе тепловой изоляции в наружных стеновых панелях: в обоих случаях материал изоляции практически не подвергается значительным механическим нагрузкам, а находится в конструкции под действием собственного веса, и удерживается за счет сил сцепления между волокнами. В этих условиях, как отмечается в [7], основным критерием эксплуатационной стойкости может быть сохранность расчетной толщины и сплошности тепловой изоляции при возможных в процессе эксплуатации оседаниях или разрывах минераловатного слоя, с образованием неутепленных полостей и мостиков холода.

Исследования [7] показали, что минераловатные изделия на фенольном связующем интенсивно изменяют свои свойства под действием влажности и температурных колебаний. Плиты потеряли первоначальную структурную связанность и расслаивались, их конечная прочность стала близка к прочности ковра минеральной ваты без связующего (2,5 – 3,5 кПа). Это свидетельствовало о том, что нарушилось сцепление между волокнами. Кроме того, увеличилось количество дефектов на самих волокнах, что привело к их измельчению. В итоге в натуральных условиях прочность изделий и связующих наиболее интенсивно снижалась в первые 6 – 9 месяцев испытаний, и через 20 – 25 месяцев изделия расслаивались. В стеновых панелях сжимаемость утеплителя увеличилась через 2 месяца в 3 раза, через два года составила 40 % (при начальной сжимаемости около 12%) и в этом положении стабилизировалась. Плиты на нейтрализованном фенольном связующем имели долговечность в 2 – 3 раза больше.

Следует отметить, что при повышенных температурах, имеющих место при работе изоляции тепловых сетей, скорость протекания физико-химических реакций увеличивается, и необратимые изменения структуры волокон материала и связующего происходят быстрее. Кроме того, изоляция тепловых сетей подвержена периодическому увлажнению за счет атмосферных осадков и грунтовой влаги. Особенно интенсивно происходит изменение структуры при намокании изоляции из минеральной ваты в конструкциях канальной прокладки. Учитывая, что прочность кровельного слоя недостаточна для того, чтобы удержать форму намокшей изоляции, происходит ее деформация и сползание под действием собственного веса. В результате при периодическом затоплении канала тепловая изоляция полностью деформируется и трубопровод оголяется.

На основании литературных данных максимальный срок службы минераловатной тепловой изоляции не превышает 10 лет, если она работает в условно сухом состоянии, то

есть ее влажность не превышает гигроскопической. Если же эта изоляция подвергается периодическому намоканию, то ее срок службы не будет превышать 5 лет.

Старение изоляции в алгоритме расчета тепловых потерь учитывается с помощью коэффициентов старения изоляции, полученных на основании литературных данных и экспериментальных данных авторов статьи.

При бесканальной прокладке трубопроводов в качестве тепловой изоляции используются полимерные материалы, как правило, пенополиуретан.

Особенностью всех полимерных материалов является их высокая чувствительность к превышению предельной рабочей температуры, которая зависит от рецептуры и технологического режима изготовления. Для большинства марок рабочая температура составляет до 120 °С, и лишь для некоторых составов достигает 150 -170 °С. Для отдельных марок она составляет всего лишь 60 °С. Подающие же трубопроводы тепловых сетей работают, как правило с температурами, превышающими в расчетном режиме 100 °С. Это требует применения для тепловой изоляции вполне конкретных марок, способных работать в таком жестком температурном режиме. К сожалению, часто контроль качества используемого материала вообще невозможен. На практике это приводит к тому, что тепловая изоляция из полимерных материалов "выгорает" в течение первых двух лет эксплуатации. Поэтому прогнозирование старения тепловой изоляции, изготавливаемой относительно небольшими партиями в условиях полукустарного производства, является весьма трудной задачей. Более-менее надежные результаты могут быть получены только применительно к изоляции, формование которой производится в заводских условиях на автоматических линиях в условиях точного соблюдения технологических требований к составу исходного сырья и режимов полимеризации.

Правильно изготовленная изоляция из полимерных материалов может служить достаточно долго (по литературным данным, до 40 – 50 лет). Старение ее не ведет к уменьшению толщины слоя, а лишь незначительно изменяет физико-механические свойства. Согласно [3], для пенополиуретана коэффициент старения составляет при сроках эксплуатации, лет : до 5 – 1; от 5 до 10 – 1,02; от 10 до 15 – 1,035; от 15 до 20 – 1,05; более 20 – 1,065.

Такие небольшие коэффициенты старения требуют практического подтверждения путем периодического обследования существующих конструкций. Пока что опыт эксплуатации тепловой изоляции из пенополиуретана в отечественных условиях не подтверждает столь высокую стойкость данного материала.

3. Увлажнение изоляции

Увлажнение тепловой изоляции трубопроводов не может быть точно учтено из-за большого количества действующих факторов и трудности оценки этих факторов. В конструкциях тепловых сетей увлажнение происходит за счет сорбции влаги из воздуха при надземной прокладке или из грунта при подземной прокладке, за счет проникновения воды через нарушенный защитный покровный слой, за счет затопления каналов водой.

В процессе работы теплопровода происходит высушивание тепловой изоляции и формирование по ее толщине полей влажности и температуры. При этом температура понижается от стенки трубопровода к покровному слою, а влажность возрастает. Падение температуры почти линейное. Увеличение влажности сильно нелинейно – наружные слои могут иметь влажность намного выше, чем внутренние. Даже наличие температуры выше 100 °С на поверхности трубопровода не гарантирует полное высыхание слоя изоляции по всей толщине. Особенно это актуально для бесканальной прокладки, когда слой изоляции находится в контакте со слоем влажного грунта.

Следует отметить особо, что наличие покровного слоя, выполняющего роль гидроизоляции при бесканальной прокладке, сказывается положительно лишь при его герметичности. При нарушениях герметичности появляется возможность намокания тепловой изоляции. Причем достаточно даже небольших отверстий в покровном слое, чтобы могло произойти интенсивное намокание тепловой изоляции в случае затопления канала или подъема грунтовых вод при бесканальной прокладке. Последующее высыхание тепловой изоляции затруднено именно наличием слоя гидроизоляции, препятствующего выходу пара из изоляции наружу, и тем самым значительно ухудшающего условия высушивания изоляции. В этих условиях слой гидроизоляции становится барьером для выхода влаги, и процесс высушивания

затягивается, во много раз превышая по длительности процесс намокания. К сожалению, в большинстве ситуаций идеального, абсолютно герметичного слоя не существует, и в подземных прокладках всегда существует возможность намокания изоляции за счет поднятия грунтовых вод или затопления трубопровода бытовыми стоками.

Следует отметить, что при канальной прокладке для отвода влаги из канала обязательно должна исправно работать дренажная система, что бывает далеко не всегда. При этом даже и не предполагается, что покровный слой должен выполнять гидроизолирующие функции. Листовые металлы в качестве покровного слоя при канальной прокладке не применяются. Поэтому покровный слой изначально имеет большое количество щелей или пор, через которые влага при неблагоприятных условиях может легко проникать к слою изоляции.

При расчетах влажность тепловой изоляции нельзя принимать по равновесной гигроскопической влажности (воздуха или грунта), так как трубопровод работает в условиях нестационарного режима при непрерывно меняющихся параметрах теплоносителя и окружающей среды. Только самые наружные слои тепловой изоляции находятся при температурах, близких к температуре окружающей среды, и могут принимать влажность, соответствующие равновесному состоянию при температуре окружающей среды.

На основании литературных данных можно отметить наиболее важные моменты влажностного режима тепловой изоляции трубопроводов тепловых сетей для каждого вида прокладки.

Рассмотрим по отдельности каждый из видов прокладки трубопроводов.

а) Надземная прокладка

Для надземной прокладки увлажнение тепловой изоляции невелико, если имеется герметичный водонепроницаемый покровный слой (металлический лист), препятствующий проникновению дождевых вод и воды, образующейся при таянии снега на поверхности трубопровода. В такой ситуации незначительное увлажнение происходит только в периоды летнего отключения трубопровода за счет сорбции влаги из воздуха. Сорбционная влагоемкость минеральной ваты, которая чаще всего применяется для надземной прокладки, невелика и составляет до 4% (по массе) при 100% влажности воздуха.

При нарушении покровного слоя, или покровном слое из пористых материалов (стеклоткань), тепловая изоляция увлажняется осадками, и ее влажность может существенно повышаться, особенно в дождливый летний период. В такое время трубопровод фактически работает на непрерывное испарение попадающей на него дождевой влаги. Таким образом, влажность тепловой изоляции при надземной прокладке в основном связана со старением покровного слоя и использованием в качестве покровного слоя негерметичных материалов. Затраты тепла на сушку слоя тепловой изоляции приведут к увеличению тепловых потерь трубопровода. Учитывая, что срок работы покровного слоя не превышает 3-5 лет, рекомендуется вводить после этого срока поправочный коэффициент, учитывающий рост тепловых потерь за счет увеличения влажности теплоизоляционного слоя и продуваемости под действием ветра.

б) Подземная канальная прокладка

В расчетах теплотеря при подземной канальной прокладке температура воздуха в канале принимается в большинстве случаев равной температуре грунта для рассматриваемого периода, то есть в диапазоне от -5 до +10 °С. При таких температурах влажность воздуха в канале близка к 100%, что приводит к обильной конденсации на днище, стенках и покрытии канала. Покрытие канала, как правило, имеет самую низкую температуру, так как расположено наиболее близко к поверхности земли. Именно на нем происходит конденсация, в результате чего капли воды попадают снова на конструкцию теплопровода и увлажняют ее. При высокой относительной влажности происходит более быстрое старение как самой тепловой изоляции, так и покровного слоя.

Преимуществом канальной прокладки является более медленное старение покровного слоя, чем при надземной прокладке. Кроме того, следует отметить, что в канальной прокладке покровный слой не выполняет гидроизолирующей функции, а только удерживает основной слой тепловой изоляции от рассыпания. Точно установить срок эксплуатации покровного слоя в данном случае затруднительно, в литературе отсутствуют данные по этому

вопросу. Следует предполагать, что покровный слой работает примерно столько же, что и основной слой изоляции. Вводить какие-либо поправочные коэффициенты на старение покровного слоя при канальной прокладке нецелесообразно. Следует считать, что покровный слой находится в нормальном состоянии, и влажность изоляции зависит только от наличия воды в канале.

В городских условиях подземные трубопроводы находятся в различных режимах, ввиду большого количества дополнительно влияющих факторов: различного состояния их дренажной системы, уровня грунтовых вод, наличия промышленных и бытовых стоков, состояния ливневой канализации, наличия асфальтового покрытия. Поэтому применительно к канальной прокладке в рассматриваемой работе используется следующее деление каналов по их влажностному состоянию:

а) Канал сухой.

Для канальной прокладки при отсутствии воды в канале увлажнение тепловой изоляции невелико. Учитывая, что перепад температур между воздухом и покровным слоем составляет 5 – 10 °С, а влажность воздуха у дна канала 100%, влажность воздуха у поверхности изоляции будет от 50 до 70 %. Таким образом, можно считать, что влажность тепловой изоляции у покровного слоя соответствует равновесной влажности материала изоляции при 60 % влажности воздуха. Для минеральной ваты это составляет около 0,8 – 1,5% по весу, а для фенольного поропласта – около 13%. У поверхности трубы влажность значительно меньше, поэтому средняя влажность почти соответствует сухому состоянию материала изоляции, получаемому в процессе производства теплоизоляционных изделий. Средняя влажность материалов может быть принята в пределах 0,4 для минеральной ваты и 4% для поропластов. Вводить поправочные коэффициенты в этой ситуации не требуется.

б) Канал подтоплен.

Для канальной прокладки при наличии воды на дне канала увлажнение тепловой изоляции имеет место, однако оно будет умеренным, так как увлажнение будет происходить лишь за счет сорбции влаги из воздуха и за счет влаги, стекающей с перекрытия канала. Можно считать, что влажность воздуха у поверхности изоляции будет около 100%. Если бы не было влаги, стекающей с перекрытия канала, то влажность тепловой изоляции у покровного слоя соответствовала бы равновесной влажности материала изоляции при 100 % влажности воздуха. Для минеральной ваты это составляет около 2–4 % по весу, а для фенольного поропласта – около 40%. На самом деле влажность будет выше. Негативным фактором является именно тот факт, что влага подводится именно к верхней части конструкции изоляции и, стекая вниз, постоянно увлажняет весь слой изоляции, проникая даже к слоям, расположенным у поверхности нагретой трубы. Лишь благодаря стеканию влаги по изоляции и непрерывному подсушиванию влажность изоляции у поверхности трубы будет меньше влажности водонасыщения. Для минеральной ваты действие капиллярных сил невелико, поэтому избыток влаги должен стекать в нижнюю часть конструкции, что не позволит сильно намокнуть всей конструкции изоляции. Для мелкопористых материалов типа фенольного поропласта и пенополиуретана влияние капиллярных сил значительно больше, и оно способно удерживать влагу вопреки силам тяжести, препятствуя ее стеканию вниз. Поэтому при отсутствии герметичного покровного слоя влажность такой изоляции будет значительно выше. Средние значения влажности материалов можно принять следующие: 5% для минваты, 15% для поропластов.

в) Канал затоплен.

Это означает, что на дне канала имеется вода, уровень которой достигает, как минимум, низа конструкции трубопроводов, то есть касается тепловой изоляции.

Для канальной прокладки при наличии в канале воды, уровень которой касается конструкции тепловой изоляции, увлажнение тепловой изоляции достаточно велико. Как указывалось выше, покровный слой не бывает герметичным, и он не способен в этих условиях защитить изоляцию от намокания. Часть изоляции или вся она находится в режиме полного насыщения влагой. Максимальные значения составляют: для минеральной ваты около 300 % по весу, а для фенольного поропласта – до 120%. При частичном затоплении трубопровода влага может быть распределена неравномерно по высоте, так что средняя влажность

изоляции зависит от уровня воды в канале. По данным литературным высота капиллярного поднятия для минеральной ваты составляет 4-5 см. При средней влажности 200% на высоте 1 см от влажность на уровне 3-4 см составляет всего 3%. Ввиду этого только при полном затоплении канала влажность минеральной ваты будет равна водопоглощению, а при частичном затоплении она будет существенно меньше. Средние значения влажности материалов можно принять следующие: 20% для минваты, 80% для поропластов.

с) Подземная бесканальная прокладка

При подземной бесканальной прокладке температура поверхностного слоя изоляции равна температуре грунта для рассматриваемого периода, то есть в диапазоне от -5 до +10 °С. Влажность грунта, как показано в [9] мало изменяется и составляет около 20% по весу. Влажность воздуха, имеющегося в грунте, близка к 100%. При высокой относительной влажности происходит быстрое старение как самой тепловой изоляции, так и покровного слоя.

Бесканальные прокладки достаточно хорошо исследованы различными авторами [7-9]. Влажность изоляции в основном зависит от влажности грунта.

При сроках эксплуатации до 0,5 нормативного срока эксплуатации считается, что покровный слой находится в исправном нормальном состоянии, и предохраняет изоляцию от чрезмерного увлажнения. Учитывая, что трубопровод все время находится во влажной среде, влажность изоляции достаточно высока даже при наличии исправного гидроизоляционного слоя.

а) При маловлажном грунте увлажнение тепловой изоляции для бесканальной прокладки невелико. В Хабаровске в основном преобладает суглинистый и глинистый грунт. Для поропластов среднее значение при влажности глинистого грунта 10% составляет около 6%. С учетом защитного действия гидроизоляционного слоя можно принять значение влажности изоляции на уровне 2%.

б) При влажном грунте увлажнение тепловой изоляции при влажности глинистого грунта 23% (или песка 5 %) составляет 13%. С учетом защитного действия гидроизоляционного слоя можно принять значение влажности изоляции на уровне 4%.

в) При грунте, насыщенном водой, тепловая изоляция находится во влажном состоянии. Средние значения влажности поропластов составляют 80%. С учетом защитного действия гидроизоляционного слоя можно принять значение влажности изоляции на уровне 25%.

При сроках эксплуатации более 0,5 нормативного срока эксплуатации покровного слоя следует считать, что покровный слой частично разрушился и уже не выполняет полностью своих гидроизоляционных свойств. Влажность изоляции зависит от влажности грунта.

а) При маловлажном грунте увлажнение тепловой изоляции для бесканальной прокладки с учетом защитного действия гидроизоляционного слоя может составлять около 3%.

б) При влажном грунте увлажнение тепловой изоляции можно принять на уровне 6%.

в) При грунте, насыщенном водой, тепловая изоляция находится в сильно влажном состоянии. Средние значения влажности поропластов с учетом защитного действия гидроизоляционного слоя можно принять на уровне 40%.

При сроках эксплуатации более нормативного срока эксплуатации покровного слоя следует считать, что покровный слой полностью разрушился и совершенно не выполняет своих гидроизоляционных свойств. Влажность изоляции зависит от влажности грунта.

а) При маловлажном грунте увлажнение тепловой изоляции составляет около 6%.

б) При влажном грунте увлажнение тепловой изоляции составляет 13%.

в) При грунте, насыщенном водой, тепловая изоляция находится в водонасыщенном состоянии. Средние значения влажности поропластов составляют 80%.

В алгоритме расчета теплопотерь через изоляцию используются откорректированные с учетом влажности коэффициенты теплопроводности изоляции.

4. Глубина заложения трубопроводов при подземной прокладке

В [10] отмечается, что колебание температуры грунта, вызванное изменением режимов работы теплопровода, на глубине более 1 метра, настолько незначительно, что режим грунта на этих глубинах можно считать независимым от режима трубопровода. Учитывая,

что большинство трубопроводов тепловых сетей проложено на глубинах более 0,7 метра, в расчетах предполагается, что грунт имеет температуру, определяемую только климатическими факторами.

Кроме того, в [9] отмечается, что на глубинах более 0,5 м влажность грунта также остается практически постоянной. Для суглинистых почв среднее значение влажности составляет 15–25% массовой влажности. В расчетах принимается среднее значение 20 %.

В [4] предлагается за расчетную температуру окружающей среды при подземной канальной прокладке принимать температуру наружного воздуха, если величина заглубления верхней части перекрытия канала не превышает 0,7 м.

В алгоритме расчета теплопотерь, предлагаемом авторами статьи, температура окружающей среды принимается в соответствии с [4], коэффициенты теплопроводности материалов изоляции выбираются с учетом степени старения материала изоляции и покровного слоя, с учетом влажности изоляции, которая зависит от способа прокладки трубопроводов, состояния покровного слоя, состояния канала и грунта.

Как было показано выше, авторы данной статьи предлагают алгоритм расчета теплопотерь через изоляцию трубопроводов, разработанный на основании законов теплопередачи в соответствии с [4]. Расчет тепловых потерь ведется отдельно для каждого трубопровода.

В качестве исходных данных расчета теплопотерь задаются:

- средняя температура наружного воздуха за рассматриваемый период $t_{нв}$, °С;
- средние температуры грунта на различных глубинах за рассматриваемый период t_r , °С (для прокладки на открытом воздухе, в помещениях, тоннелях и каналах не требуется);
- средняя глубина заложения верха конструкции канала или оси трубопровода при бесканальной прокладке h_0 , м (для надземной прокладки не требуется);
- средние температуры теплоносителя в подающем и обратном трубопроводах за рассматриваемый период t_t , °С;
- продолжительность рассматриваемого периода в сутках, N;
- наружные диаметры труб подающего и обратного трубопровода d_2 (В расчетах рекомендуется принимать только стандартные диаметры труб, ориентируясь на условный диаметр d_y);
- длина подающего и обратного трубопроводов L, м;
- материал тепловой изоляции;
- расчетная плотность материал тепловой изоляции ρ_c , кг/м³;
- материал покровного слоя;
- толщина слоя тепловой изоляции подающего и обратного трубопроводов $\delta_{и}$, м;
- срок работы тепловой изоляции;
- срок работы покровного слоя;
- степень влажности грунта (маловлажный, влажный, насыщенный водой);
- степень затопления канала (при канальной прокладке);

Общие средние потери теплоты трубопроводом в расчетный период Q_0 , Вт, рассчитываются по формуле

$$Q_0 = Q_{и} + Q_{м} + Q_{у}, \quad (1)$$

где $Q_{и}$ – линейные тепловые потери по длине трассы через наружную поверхность трубопровода, Вт;

$Q_{м}$ – местные потери теплоты в фасонных частях, опорных конструкциях, арматуре, фланцах и т.п., Вт;

$Q_{у}$ – потери тепла связанные с утечкой теплоносителя через неплотности фланцевых соединений трубопроводов и запорную арматуру, Вт.

Линейные тепловые потери трубопровода рассчитываются по формуле:

$$Q_{и} = q_{и} \cdot L, \quad (2)$$

$$q_{и} = (t_r - t_0) / (K \cdot R_0) \quad (2a)$$

где $q_{\text{и}}$ – линейная плотность теплового потока, Вт/м;
 $t_{\text{т}}, t_{\text{о}}$ – средние за расчетный период температуры теплоносителя в рассматриваемом трубопроводе и окружающей среде, °С;
 L – длина трубопровода, м;
 $R_{\text{о}}$ – суммарное линейное термическое сопротивление рассматриваемого трубопровода, м*к/Вт;
 K – поправочный коэффициент, учитывающий способ прокладки трубопровода.
 Значения коэффициента K принимаются согласно [4].

Суммарное линейное термическое сопротивление трубопровода определяется по формуле:

$$R_{\text{о}} = R_{\text{в}} + R_{\text{с}} + R_{\text{и}} + R_{\text{н}}, \quad (3)$$

где $R_{\text{в}}, R_{\text{ст}}, R_{\text{и}}, R_{\text{н}}$ – термические сопротивления: теплоотдачи от теплоносителя к внутренней поверхности трубопровода, теплопроводности стенки трубопровода и слоя изоляции, теплоотдачи от наружной поверхности изоляции к окружающей среде, м*к/Вт.

Значение термических сопротивлений $R_{\text{в}}, R_{\text{с}}, R_{\text{и}}, R_{\text{н}}$ определяются по формулам:

$$R_{\text{в}} = \frac{1}{\pi \alpha_{\text{в}} d_1}; \quad (4)$$

$$R_{\text{с}} = \frac{1}{2\pi \lambda_{\text{с}}} \ln \frac{d_2}{d_1}; \quad (5)$$

$$R_{\text{и}} = \frac{1}{2\pi \lambda_{\text{и}}} \ln \frac{d_3}{d_2}; \quad (6)$$

$$R_{\text{н}} = \frac{1}{\pi \alpha_{\text{н}} d_3}; \quad (7)$$

где $\alpha_{\text{в}}$ и $\alpha_{\text{н}}$ – коэффициенты теплоотдачи от теплоносителя к внутренней поверхности трубопровода и от наружной поверхности теплоизоляции к окружающей среде соответственно, Вт/(м²К);

$\lambda_{\text{с}}, \lambda_{\text{и}}$ – коэффициенты теплопроводности стенки трубопровода и изоляции соответственно, Вт/(м К);

d_1, d_2 – внутренний и наружный диаметры трубопровода, м;

d_3 – наружный диаметр слоя изоляции, м;

$\delta_{\text{и}}$ – толщина слоя изоляции, м.

Наружный диаметр слоя изоляции определяется по формуле

$$d_3 = d_2 + 2\delta_{\text{и}} \quad (8)$$

В связи с тем, что коэффициент теплоотдачи от теплоносителя к внутренней стенке трубы α_1 много больше коэффициента теплоотдачи от наружной поверхности теплоизоляции к окружающей среде α_2 , то есть удовлетворяется условие $\alpha_1 \gg \alpha_2$, то термическим сопротивлением R_1 можно пренебречь. Термическим сопротивлением R_2 также можно пренебречь ввиду высокой теплопроводности стенки и малой ее толщины. Таким образом, вместо формулы (3) можно использовать формулу:

$$R_{\text{о}} = R_{\text{и}} + R_{\text{н}}, \quad (9)$$

Коэффициенты теплопроводности изоляции принимаются по данным СНиП, справочников, паспортов заводов-изготовителей и других нормативных источников.

При надземной прокладке и подземной канальной прокладке сопротивление $R_{\text{н}}$ определяется согласно выражению (7). Различие заключается лишь в величине коэффициента α_2 , который выбирается согласно [4].

При подземной бесканальной прокладке тепло с поверхности покровно-защитного слоя передается непосредственно грунту, то есть $R_{\text{н}} = R_{\text{г}}$.

Значение $R_{\text{г}}$ определяется по известной формуле Форхгеймера [5]:

$$R_{ep} = \frac{1}{2\pi\lambda_g} \ln \left[\frac{2h}{d_3} + \sqrt{\left(\frac{2h}{d_3}\right)^2 - 1} \right], \quad (10)$$

где $R_{гр}$ – термическое сопротивление грунта, (м К)/Вт;
 λ_g – теплопроводность грунта, Вт/(м К);
 d_3 – наружный диаметр изоляции, м;
 h – глубина заложения оси трубопровода, м.

Коэффициент теплопроводности грунта $\lambda_{гр}$ зависит от его структуры и влажности, значение изменяется в достаточно широких пределах: от 1 для песков до 3 для глинистых грунтов в насыщенном влагой состоянии.

Для двухтрубной бесканальной прокладки добавочно учитывается условное термическое сопротивление грунта, учитывающее снижение теплоотдачи от трубопроводов за счет более сильного прогрева слоя грунта между трубопроводами. Это сопротивление определяется по формуле:

$$R_{доп} = \frac{1}{2\pi\lambda_{ep}} \ln \sqrt{1 + \left(\frac{2h}{b}\right)^2}, \quad (11)$$

где b – горизонтальное расстояние между осями труб, м;
 h – глубина заложения оси трубопровода от поверхности земли, м.

Для типовых конструкций прокладки $b \approx 1,5 d_3$.

Местные тепловые потери Q_m рассчитываются по формуле:

$$Q_m = \beta \cdot Q_{и}, \quad (12)$$

где β – коэффициент, учитывающий дополнительные местные потери тепла через опорные конструкции, арматуру, фланцевые соединения и т.д. Значение коэффициента β согласно [12, 13] находятся в пределах от 0,1 до 0,3.

Потери тепла, связанные с утечкой теплоносителя рассчитываются по формуле

$$Q_y = a \cdot c_T \cdot V_T \cdot \rho_T \cdot (t_T - t_x) / 3,6, \quad (13)$$

где a – доля утечек теплоносителя, принимаемая в соответствии с [4].
 V_T – объем теплоносителя в трубопроводе, м³;
 c_T – объемная теплоемкость теплоносителя;
 t_T – средняя температура теплоносителя за расчетный период, °С;
 t_n – средняя температура питающей воды за расчетный период, °С.

Объем воды в тепловой сети определяется по формуле

$$V_T = 3,14 \cdot L \cdot d_1^2 / 4, \quad (14)$$

где L – длина рассматриваемого участка тепловой сети (подающего или обратного трубопровода), м;
 d_1 – внутренний диаметр трубопровода, м.

В приведенных выше формулах наружные диаметры и толщины стенок подающего и обратного трубопроводов определяется по условному их диаметру согласно стандартным размерам труб.

Расчетная температура окружающей среды (воздуха, окружающего трубопроводы) принимается согласно [4].

Коэффициенты теплопроводности материала изоляции в сухом состоянии принимаются по средней температуре слоя изоляции и определяются по справочной и нормативной литературе или по данным заводов-изготовителей тепловой изоляции. Расчетные коэффициенты теплопроводности изоляции для подающего и обратного трубопроводов определяются

с учетом влажности изоляции и ее старения. Рекомендуемые значения влажности изоляции и поправочных коэффициентов на старение изоляции и покровного слоя принимаются на основе литературных и экспериментальных данных.

Соппротивления теплопроводности слоев изоляции определяются согласно СНиП с дополнительным учетом поправки на продуваемость ветром (для надземной прокладки). Поправочный коэффициент на продуваемость ветром учитывает ухудшение теплоизоляционных свойств материала за счет продувания его под действием ветра. Он определяется в зависимости от степени воздухопроницаемости материала покровного слоя и слоя изоляции. Все материалы условно разделены на три группы: воздухонепроницаемые (металлические и рубероид), плохопродуваемые (лакоткань), продуваемые (стеклоткань, мешковина и другие).

Коэффициент теплоотдачи к наружному воздуху, поправочный коэффициент на способ прокладки трубопровода и коэффициент местных тепловых потерь через опоры, арматуру и фланцы определяется согласно [4].

Коэффициент теплопроводности грунта определяется согласно данным справочной и технической литературы по средним значениям.

Дополнительное условное сопротивление теплопроводности, учитывающее взаимное влияние трубопроводов, определяется по формуле Шубина, приводимой в справочной и технической литературе.

Нормативное значение утечек из трубопровода определяется согласно данным нормативной и справочной литературы.

При расчете определяются линейные потери через тепловую изоляцию, местные потери через опоры и арматуру, потери с утечкой, а также средние потери (в Вт или ккал/час) и итоговые значения за весь рассматриваемый период (в МДж или Гкал).

ЛИТЕРАТУРА

1. Михайлов С.А. Теплоснабжение Российской Федерации в цифрах. //Новости теплоснабжения, №8, 2002.
2. Методические указания по определению тепловых потерь в водяных тепловых сетях. РД 34.09.255-97. – М.: СПО ОРГРЭС, 1998.
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, № 6, 2002 г.
4. СНиП 2.04.11-88. «Тепловая изоляция оборудования и трубопроводов»/ Госстрой России. – М.: ГУП ЦПП, 1998.
5. Муныбин Л.И., Арефьев Н.Н. К вопросу о методике расчета тепловых потерь при различных вариантах тепловой изоляции. // Новости теплоснабжения, № 4, 2002 г.
6. Методические указания по определению расходов топлива, электроэнергии и воды на выработку тепла отопительными котельными коммунальных теплоэнергетических предприятий /АКХ им. К.Д.Памфилова – М.: Стройиздат, 1994.
7. Бобров Ю.Л. Долговечность теплоизоляционных минераловатных материалов.–М.: Стройиздат, 1987.
8. Витальев В.П.. Бесканальные прокладки тепловых сетей. – 2-е изд. –М.: Энергоатомиздат, 1983.
9. Скворцов А.А., Заверткин И.А. Повышение надежности конструкций подземных тепловых сетей. - М.: Энергоатомиздат, 1986.
10. Крашенинников А.Н. Монолитная теплоизоляция их ячеистых бетонов и пластмасс. – Л.: Стройиздат, 1971.
11. Наладка и эксплуатация водяных тепловых сетей. Справочник. – М.: Стройиздат, 1988.
12. Теплотехническое оборудование и теплоснабжение промышленных предприятий. – М., Энергия, 1979.
13. Методика определения тепловых потерь в действующих водяных тепловых сетях. – М., СЦНТИ, 1970.
14. СНиП II-3-79 – «Строительная теплотехника». – М.: ГП ЦПП, 1996.

Авторы:

Канев Сергей Николаевич, к.т.н., доцент, генеральный директор Хабаровского центра энергоресурсосбережения.

Ивашкевич Александр Александрович, ст.преподаватель кафедры теплотехника, теплогазоснабжения и вентиляции Хабаровского государственного технического университета.

Лупанос Валентина Михайловна, научный сотрудник отдела теплотехнических измерений ВНИИФТИ «Дальстандарт».