



Автономная некоммерческая организация ДВФУ
Научно-технический и внедренческий центр
“Модернизация котельной техники”
(АНО ДВФУ «НТВ Центр «МКТ»)

Заказчик: АО «ДГК»

УТВЕРЖДАЮ

Председатель правления
АНО ДВФУ «НТВ Центр «МКТ»
Штым К.А.



**Методические указания по расчету тепловых потерь неизоли-
рованными трубопроводами при надземной прокладке**

г. Владивосток
2020 г.

Список исполнителей

Канд. техн. наук., доцент;



В.П. Черненко

Инженер



П.С. Почекунин

В настоящей работе приведена методика определения тепловых потерь на участках неизолированных трубопроводов тепловых сетей. Тепловые потери обусловлены лучистой и конвективной составляющими теплоотдачи с поверхности трубы в окружающую среду. Дополнительно учитываются местные потери теплоты на опорных конструкциях теплопроводов.

Содержание

Введение	4
1. Теоретическая часть	6
1.1. Уравнение теплопередачи	6
1.2. Определение коэффициента теплоотдачи конвекцией	6
1.3. Определение коэффициента теплоотдачи излучением	8
2. Алгоритм расчета	9
3. Excel калькулятор	11
Список использованных источников	13
Приложение А. Перевод единиц измерения энергии и количества теплоты..	14
Приложение Б. Теплофизические свойства воздуха	14
Приложение В. Климатические параметры г. Владивостока	15

Введение

Тепловые потери при транспорте и распределении тепловой энергии состоят из потерь тепловой энергии через теплоизоляционные конструкции и потерь тепловой энергии с потерями сетевой воды.

Тепловые потери в конкретных тепловых сетях являются величиной индивидуальной как в абсолютном, так и в относительном виде и не могут без дополнительного анализа являться показателем для сравнительной оценки энергетической эффективности транспорта и распределения тепловой энергии различных тепловых сетей или приниматься в качестве аналогов для других тепловых сетей.

Технической базой для разработки энергетической характеристики в части тепловых потерь через теплоизоляционные конструкции является проведение испытаний тепловых сетей на тепловые потери специализированными организациями в соответствии с действующими Методическими указаниями по определению тепловых потерь в водяных тепловых сетях с периодичностью, регламентируемой действующими Правилами технической эксплуатации электрических станций и сетей Российской Федерации (ПТЭ), а также использование в отдельных случаях, рассматриваемых настоящими Методическими указаниями, расчетных (расчетно-аналитических) методов определения тепловых потерь [1].

Помимо результатов периодических тепловых испытаний, обработанных и представленных в соответствующем виде, результатов расчетов (для случаев, когда тепловые потери допускается определять расчетным путем) в качестве исходных данных используется исполнительная техническая документация по конструктивным характеристикам тепловых сетей, статистические данные по режимам работы тепловых сетей и метеорологическим условиям, а также сведения о техническом состоянии тепловых сетей по результатам проведенных обследований, плановых шурфовок, вскрытий при ремонте, статистики повреждаемости и т.п.

Порядок определения нормативов технологических потерь при передаче тепловой энергии, теплоносителя определен приказом Минэнерго РФ от 10.08.2012 N 377 (в ред. приказов Минэнерго РФ от 01.02.2010 n 36, от 10.08.2012 n 377) [2].

Рассматриваемый случай (теплопровод не изолирован) выходит за рамки требований нормативных документов [1, 2] и естественно не может использоваться в обосновании нормативов технологических потерь, но результаты расчета могут учитываться в отношениях организаций, оказывающих услуги по транспорту тепловой энергии и потребителей, имеющих на балансе тепловые сети.

При рассмотрении метода расчета неизолированного теплопровода с окружающей средой (воздух) следует понимать, что имеем дело со сложным случаем теплообмена, который включает: теплопроводность, радиационный теплообмен между наружной стенкой трубы и воздухом, конвективный теплообмен при естественной и вынужденной конвекции воздуха относительно трубопровода. В последнем случае используются эмпирические зависимости или уравнения подобия.

Методика расчета несколько упрощается если пренебречь малыми значениями термических сопротивлений тепловосприятия от теплоносителя к внутренней поверхности стенки трубы и стенки трубы. Таким образом теплообмен неизолированного трубопровода определяется радиационной и конвективной составляющими.

1. Теоретическая часть

1.1. Уравнение теплопередачи

Тепловые потери неизолированного трубопровода определяются по формуле [6, 7]

$$Q = \alpha_n \cdot \pi \cdot D_n \cdot L \cdot (\tau - t_n) \cdot \beta, \quad (1)$$

где α_n - коэффициент теплоотдачи на наружной поверхности трубопровода, Вт/(м °С);

D_n - наружный диаметр трубопровода, м;

L - длина трубопровода, м;

τ - средняя температура теплоносителя (стенки), °С;

t_n - средняя температура наружного воздуха, °С;

β - коэффициент местных тепловых потерь, учитывающий тепловые потери арматурой, компенсаторами, опорами, принимается для надземной прокладок равным 1,2 при диаметрах трубопроводов до 150 мм и 1,15 при диаметрах 150 мм и более.

Коэффициент теплоотдачи α_n определяется как сумма коэффициентов конвективной и лучистой теплоотдачи

$$\alpha_n = \alpha_l + \alpha_k, \quad (2)$$

1.2. Определение коэффициента теплоотдачи конвекцией

Основой инженерных методов расчета конвективного теплообмена служит экспериментальное исследование этих процессов. При этом для расчета температурных полей и тепловых потоков применяют методы аналогий, теорию планирования эксперимента и методы теории подобия [3,4,5]. Процесс теплоотдачи при поперечном обтекании труб имеет ряд особенностей, которые объясняются гидродинамической картиной движения жидкости (газа) вблизи поверхности трубы. Плавный, безотрывный характер обтекания трубы имеет место только при очень маленьких числах $Re < 5$. При значительно больших числах Re имеющих место в практике, обтекание трубы сопровождается образованием в тыльной стороне вихревой зоны. Для пучков труб, к которым могут быть отнесены тепловые сети теплоотдача второго и третьего ряда возрастает в сравнении с первым. Если теплоотдача третьего ряда 100%, то для первого ряда она составляет 60%, а для второго ряда 90%.

Для воздуха при расчете среднего коэффициента теплоотдачи при коридорном расположении труб рекомендуются соотношения [4, 5]:

при $Re < 10^3$

$$\overline{Nu}_{дж} = 0,49 \cdot Re_{дж}^{0,50}; \quad (3)$$

при $Re > 10^3$

$$\overline{Nu}_{дж} = 0,194 \cdot Re_{дж}^{0,65}, \quad (4)$$

где Re - критерий Рейнольдса, определяемый по формуле

$$Re = \frac{\omega \cdot D_n}{\nu} \quad (5)$$

ω – скорость движения воздуха, м/с

ν - коэффициент кинематической вязкости наружного воздуха, определяемый при средней температуре, m^2/s .

Скорость движения воздуха (ветра) принимается по данным СП 121.13330.2018 Строительная климатология [8] или в установленном порядке по данным метеостанций Росгидромета. Измерения, проводимые с целью определения скорости ветра, отличаются от условий его воздействия на объекты по высоте, типу местности и ряду других параметров. По СП 20.13330.2011 [8] при определении средней составляющей ветровой нагрузки в зависимости от эквивалентной высоты над поверхностью земли применяется коэффициент, учитывающий изменение ветрового давления для высоты z_e . Используя, квадратичную зависимость между ветровым давлением и скоростью ветра, можно получить аналогичный коэффициент для усреднения скорости ветра. Значения коэффициентов для ветрового давления и его скорости для высоты над поверхностью земли 5 м и менее (соответствует условиям наземной прокладки тепловых сетей) для типов местности А, В, С приведены в таблице 1.

Значение Коэффициентов ветрового давления и скорости ветра для типов местности А, В, С на высоте 5 м и менее

Таблица 1

Тип местности	Коэффициент	
	ветрового давления	скорости ветра
А - открытые побережья морей, озер и водохранилищ, сельские местности, в том числе с постройками высотой менее 10 м, пустыни, степи, лесостепи, тундра	0,75	0,866
В - городские территории, лесные массивы и другие местности, равномерно покрытые препятствиями высотой более 10 м	0,5	0,707
С - городские районы с плотной застройкой зданиями высотой более 25 м	0,4	0,632

Примечание. Сооружение считается расположенным в местности данного типа, если эта местность сохраняется с наветренной стороны сооружения на расстоянии $30h$ - при высоте сооружения h до 60 м и на расстоянии 2 км - при $h > 60$ м. Типы местности могут быть различными для разных рас-

четных направлений ветра.

Из выражения для критерий Нуссельта находится усредненное значение коэффициента теплоотдачи конвекцией

$$\vec{\alpha}_k = \overline{Nu}_{дж} \cdot \frac{\lambda_b}{D_H}, \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{°C)} \quad (6)$$

где λ_b – коэффициент теплопроводности воздуха, Вт/(м·°C).

Если направление воздействия потока воздуха на трубопровод не перпендикулярно его оси коэффициент теплоотдачи уточняется путем введения поправочного коэффициента.

$$\vec{\alpha}_{к\varphi} = \vec{\alpha}_k \cdot \varepsilon_\varphi, \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{°C)} \quad (7)$$

Значения поправочных коэффициентов ε_φ приведены в таблице 2.

Таблица 2

Угол φ	90	80	70	60	50	40	30	20	10
ε_φ	1	1	0,98	0,94	0,88	0,78	0,67	0,52	0,42

1.3. Определение коэффициента теплоотдачи излучением

Коэффициент теплоотдачи излучением α_l может быть подсчитан по формуле Стефана-Больцмана

$$\alpha_l = C \cdot \frac{\left(\frac{\tau+273}{100}\right)^4 - \left(\frac{t_H+273}{100}\right)^4}{(\tau - t_H)}, \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{°C)} \quad (8)$$

где C — коэффициент излучения абсолютно черного тела, $C_0 = 5,67$ Вт/(м²·К⁴).

Коэффициент излучения «серых» тел, к которым относятся поверхности неизолированных трубопроводов [6] имеет значение 4,4 – 5,0 Вт/(м²·К⁴).

2. Алгоритм расчета

Исходные данные расчета:

(реквизиты расчетного участка)

N п/п	Наименование величины	Обозначение	Размерность	Значение
1.	Наружный диаметр	D_n	м	
2	Длина участка	L	м	
3	Средняя температура теплоносителя	τ	°C	
4	Средняя температура наружного воздуха	t_n	°C	
5	Скорость ветра по нормам	ω	м/с	
6	Приведенная скорость ветра по высоте и типу местности	$\omega_{пр}$	м/с	
7	Коэффициент кинематической вязкости воздуха	ν	м ² /с	
8	Коэффициент теплопроводности воздуха	λ_v	Вт/(м·°C).	
9	Угол между направлением ветра и осью трубопровода	φ	градус	
10	Поправочный коэффициент	ε_φ	-	По табл. 2
11	Коэффициент излучения	C	Вт/(м ² ·K ⁴)	
12	Коэффициент местных тепловых потерь	β	-	
13	Положение трубы в ряду относительно потока воздуха	1, 2, 3		

Расчет тепловых потерь: _____

(реквизиты расчетного участка)

N п/п	Наименование величины	Размерность	Обозна- чение	Формула	Величина
1	Критерий Рейнольдса	-	Re	$= \frac{\omega_{пр} \cdot D_H}{\nu}$	
2	Если $Re < 10^3$	-	$\overline{Nu}_{дж}$	$= 0,49 \cdot Re_{дж}^{0,50}$	
	Если $Re > 10^3$	-	$\overline{Nu}_{дж}$	$= 0,194 \cdot Re_{дж}^{0,65}$	
3	Коэффициент теплоотдачи	$Вт/(м^2 \cdot ^\circ C)$	$\vec{\alpha}_к$	$= \overline{Nu}_{дж} \cdot \frac{\lambda_B}{D_H}$	
4	Коэффициент теплоотдачи: 3-й и далее ряды; 2-ой ряд; 1-й ряд	$Вт/(м^2 \cdot ^\circ C)$	$\vec{\alpha}_{к\varphi}$	$= \vec{\alpha}_к \cdot \varepsilon_\varphi$ $= 0,9 \cdot \vec{\alpha}_к \cdot \varepsilon_\varphi$ $= 0,6 \cdot \vec{\alpha}_к \cdot \varepsilon_\varphi$	
5	Коэффициент теплоотдачи	$Вт/(м^2 \cdot ^\circ C)$	α_l	$= C$ $\cdot \frac{\left(\frac{\tau + 273}{100}\right)^4 - \left(\frac{t_H + 273}{100}\right)^4}{(\tau - t_H)}$	
6	Коэффициент теплоотдачи	$Вт/(м^2 \cdot ^\circ C)$	α_H	$= \alpha_l + \alpha_к$	
7	Тепловые потери	Вт	Q	$= \alpha_H \pi D_H L (\tau - t_H) \beta$	

3. Excel калькулятор

«Excel калькулятор» доступен на электронном носителе, переданном заказчику по договору. Ниже приведен его вид.

Исходные данные расчета					
№ п/п	Наименование величины	Обозначение	Размерность	Значение	Примечание
1	Наружный диаметр	D_H	м	0,219	
2	Длина участка	L	м	100	
3	Средняя температура теплоносителя	τ	°C	80	
4	Средняя температура наружного воздуха	t_H	°C	-10	
5	Скорость ветра по нормам	ω	м/с	5	
6	Приведенная скорость ветра по высоте и типу местности	$\omega_{пр}$	м/с	4,33	А - 0,866 В - 0,707 С - 0,632
7	Коэффициент кинематической вязкости воздуха	ν	$\text{м}^2/\text{с}$	1,24E-05	
8	Коэффициент теплопроводности воздуха	λ_B	Вт/(м·°C)	0,02	
9	Угол между направлением ветра и осью трубопровода	φ	градус	90	
10	Поправочный коэффициент	ϵ_φ	-	1	Табл. 2 методики
11	Коэффициент излучения	C	Вт/(м ² ·K ⁴)	4,9	
12	Коэффициент местных тепловых потерь	β	-	1	
13	Положение трубы в ряду относительно потока воздуха	$K_{ряд}$	-	0,6	1 ряд - 0,6 2 ряд - 0,9 3 ряд - 1

Расчет тепловых потерь					
№ п/п	Наименование величин	Обозначение	Формула	Величина	Размерность
1	Критерий Рейнольдса	$Re_{дж}$	$= (\omega_{пр} \times D_H) / \nu$	76288,8	-
2	Критерий Нуссельта	$Nu_{дж}$	$= 0,49 \cdot Re_{дж}^{0,50}$ если $Re_{дж} < 10^3$ $= 0,194 \cdot Re_{дж}^{0,65}$ если $Re_{дж} > 10^3$	289,34	-
3	Коэффициент теплоотдачи конвекцией	α_k	$= Nu_{дж} \times (\lambda_B / D_H)$	26,42	Вт/(м ² ·°C)
4	Привиденный коэффициент теплоотдачи конвекцией	$\alpha_{кф}$	$= K_{ряд} \times \alpha_k \times \epsilon_{ф}$	15,85	Вт/(м ² ·°C)
5	Коэффициент теплоотдачи излучением	α_l	$= C \cdot \frac{\left(\frac{\tau + 273}{100}\right)^4 - \left(\frac{t_k + 273}{100}\right)^4}{(\tau - t_k)}$	5,85	Вт/(м ² ·°C)
6	Коэффициент теплоотдачи	α_H	$= \alpha_{кф} + \alpha_l$	21,70	Вт/(м ² ·°C)
7	Тепловые потери	Q	$= \alpha_H \pi D_H L (\tau - t_H) \beta$	134386,6	Вт
				0,11555	Гкал/ч

Список использованных источников

1. Методические указания по составлению энергетической характеристики для систем транспорта тепловой энергии по показателю "тепловые потери". со 153-34.20.523-2003, часть 3. Утверждено приказом Министерства энергетики Российской Федерации № 278 от 30.06.2003 г.;
2. Министерство энергетики Российской Федерации. Приказ от 30 декабря 2008 г. N325 «Об утверждении порядка определения нормативов технологических потерь при передаче тепловой энергии, теплоносителя», (в ред. приказов Минэнерго РФ от 01.02.2010 n 36, от 10.08.2012 n 377). Зарегистрировано в Минюсте РФ 16 марта 2009 г. N 13513;
3. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача. – М.: Энергия, 1968 г., 439 с.;
4. Михеев М.А., Михеева И.М. Основы теплопередачи. – М.: Энергия, 1977 г., 344 с.;
5. Михеев М.А. Расчетные формулы конвективного теплообмена. - «Изв. АН СССР, Энергетика и транспорт», 1966, №5, с. 96-105
6. Соколов Е.Я. Теплофикация и тепловые сети. – М.: Издательство МЭИ, 1999 г., 472 с.
7. Водяные тепловые сети: Справочное пособие по проектированию/ И.П. Беляйкина, В.П. Витальев, Н.К. Громов, и др. под ред. Н.К. Громова, Е.П. Шубина.-М.: Энергоатомиздат, 1988.-376 с.
8. СП 131.13330.2018 «СНиП 231-99*» Строительная климатология. Утвержден приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 28 ноября 2018 №763/пр.
9. СП 20.13330.2011 «СНиП 2.01.07-85*» Нагрузки и воздействия. Утвержден приказом Министерства регионального развития Российской Федерации (Минрегион России) от 27 декабря 2010 г. № 787 и введен в действие с 20 мая 2011 г

Приложение А.

Перевод единиц измерения энергии и количества теплоты

Единица измерения	Дж	кгс м	кал	ккал	кВт/ч
джоуль	1	0,102	0,239	$2,39 \times 10^{-4}$	$2,78 \times 10^{-7}$
килограмм-сила-метр	9,8067	1	2,343	$2,343 \times 10^{-3}$	$2,78 \times 10^{-6}$
калория	4,1868	0,42686	1	10^{-3}	$1,16 \times 10^{-6}$
килокалория	4186,8	426,86	10^3	1	$1,16 \times 10^{-3}$
киловатт-час	$3,6 \times 10^6$	$3,67 \times 10^5$	$8,6 \times 10^5$	$8,6 \times 10^2$	1

1 кВт/ч = $3,6 \times 10^6$ Дж

1 кал = 4,1868 Дж (точно)

Приложение Б.

Теплофизические свойства воздуха

Таблица Б1. Коэффициент теплопроводности, $\lambda_B \cdot 10^2$

$T_B, ^\circ\text{C}$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$T_B < 0$	-40	1,820	1,813	1,806	1,799	1,792	1,785	1,778	1,771	1,764
	-30	1,890	1,883	1,876	1,869	1,862	1,855	1,848	1,841	1,834
	-20	1,960	1,953	1,946	1,939	1,932	1,925	1,918	1,911	1,904
	-10	2,030	2,023	2,016	2,009	2,002	1,995	1,988	1,981	1,974
	0	2,100	2,093	2,086	2,079	2,072	2,065	2,058	2,051	2,044
$T_B > 0$	0	2,100	2,106	2,112	2,118	2,124	2,13	2,136	2,142	2,148
	10	2,160	2,167	2,174	2,181	2,188	2,195	2,202	2,209	2,216
	20	2,230	2,237	2,244	2,251	2,258	2,265	2,272	2,279	2,286
	30	2,300	2,307	2,314	2,321	2,328	2,335	2,342	2,349	2,356
	40	2,370	2,376	2,382	2,388	2,394	2,400	2,406	2,412	2,418

Таблица Б2 Коэффициент кинематической вязкости, $\nu \cdot 10^6$

$T_B, ^\circ\text{C}$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$T_B < 0$	-40	10,04	9,959	9,878	9,797	9,716	9,635	9,554	9,473	9,392
	-30	10,80	10,72	10,65	10,57	10,50	10,42	10,34	10,27	10,19
	-20	11,79	11,69	11,59	11,49	11,39	11,30	11,20	11,10	11,00
	-10	12,43	12,37	12,30	12,24	12,17	12,11	12,05	11,98	11,92
	0	13,28	13,20	13,11	13,03	12,94	12,86	12,77	12,69	12,60
$T_B > 0$	0	13,28	13,37	13,46	13,54	13,63	13,72	13,81	13,90	13,98
	10	14,16	14,25	14,34	14,43	14,52	14,61	14,70	14,79	14,88
	20	15,06	15,15	15,25	15,34	15,44	15,53	15,62	15,72	15,81
	30	16,00	16,10	16,19	16,29	16,38	16,48	16,58	16,67	16,77
	40	16,96	17,06	17,16	17,26	17,36	17,46	17,55	17,65	17,75

Приложение В. Климатические параметры г. Владивостока

Таблица В1. Климатические параметры холодного периода года

Населенный пункт	Температура воздуха наиболее холодных суток, °С, обеспеченностью 0,92	Температура воздуха наиболее холодной пятидневки, °С, обеспеченностью 0,92	Продолжительность, сут., и средняя температура воздуха, °С, периода со средней суточной температурой воздуха							Преобладающее направление ветра за декабрь-февраль	Максимальная из средних скоростей ветра по румбам за январь, м/с	Средняя скорость ветра, м/с, за период со среднесуточной температурой воздуха ≤8 °С
			≤8 °С		≤10 °С			средняя температура				
			продолжительность	средняя температура	продолжительность	средняя температура						
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10			
Владивосток	-24	-22	199	-4,3	220	-3,0	С	7,1	6,6			

Таблица В2. Среднемесячная и годовая температура воздуха

Населенный пункт	Месяц года												Год
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Владивосток	-12,6	-9,1	-2,1	4,8	9,7	13,4	17,7	19,8	15,8	8,8	-0,9	-9,5	4,6