

ВЛИЯНИЕ ВЛАЖНОСТИ ГРУНТА НА ПОТЕРИ ТЕПЛА ПРИ ТРАНСПОРТИРОВКЕ В ПОДЗЕМНЫХ СЕТЯХ СИСТЕМЫ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ

А.В. Шишкин, В.В. Исаев, А.Н. Рондель, Н.Н. Шаповалов (ООО «ДиССо»),
В.С. Слепченко (ГУП «ТЭК СПб»)

Потери тепла при транспортировке теплоносителя в подземных теплопроводах являются, с одной стороны, важным энергетическим показателем эффективности системы теплоснабжения, степени ее воздействия на окружающую среду а, с другой стороны, характеризуют эксплуатационное состояние тепловых сетей, их защищенность от разрушительных процессов.

Для подземного теплопровода при естественных условиях эксплуатации наибольшее влияние на величину тепловых потерь оказывает его взаимодействие с влагой вмещающего грунта.

Увлажнение материала теплоизоляции теплопроводов приводит к значительному увеличению его эффективной теплопроводности и возрастанию линейной плотности теплового потока в несколько раз. Частичная просушка теплоизоляции и грунта сдвигают тепловой баланс при колебаниях температуры теплоносителя в сторону необратимых потерь тепла. Вынос влаги (воды и пара), нагретой в зоне теплопровода, приводит к дополнительным скрытым тепловым потерям.

Эффективная теплопроводность является интегральным, комплексным теплотехническим параметром. Она обусловлена кондуктивным потоком тепла под действием градиента температуры (закон Фурье) и переносом тепла, связанного с потоком влаги.

Тепломассоперенос в основном связан с двумя явлениями.

Под действием градиента температуры во влажном материале возникает градиент парциального давления насыщенного пара, в результате чего происходит диффузионный перенос пара в область более низкой температуры. При этом возникает градиент влажности, который приводит к переносу воды в обратном направлении.

Такой «круговорот» влаги в капиллярно-пористой среде, несмотря на малую плотность потока массы, создает значительный поток тепла, обусловленный большой величиной теплоты испарения воды. По образному выражению А. Миснара, в этих условиях влага, находящаяся в порах и капиллярах материала, ведет себя как теплоноситель [1].

В процессе эксплуатации, под воздействием

тепловлажностных и тепломеханических эффектов (особенно при резких изменениях температуры теплоносителя) неизбежно возрастает влагопроницаемость изоляции теплопроводов. Так, испытания наиболее распространенных теплоизоляционных конструкций (на основе армопенобетона, пенополиуретана, полимербетона, битумперлита и др.), выполненные во ВНИПИтеплопроект и ВНИПИэнергопром [2], показали, что фильтрационная проницаемость изоляции увеличивается в 1,5–2 раза, коэффициент диффузии влаги возрастает на несколько порядков, а паропроницаемость остается практически неизменной.

Плотность теплового потока – q (Вт/м²) во влажном капиллярно-пористом материале равна [3]:

$$q = \lambda \text{ grad} T + h_n J_n + h_w J_w,$$

где λ – кондуктивная теплопроводность (Вт/мК); h_n и h_w – удельные энтальпии пара и воды (Дж/кг); J_n и J_w – плотность потока массы пара и воды (кг/м²с).

В равновесных условиях отток массы пара компенсируется притоком воды ($J_n = J_w$) и плотность теплового потока равна:

$$q = \lambda \text{ grad} T + (h_n - h_w) J_n = (\lambda + \gamma) \text{ grad} T,$$

где $(h_n - h_w) J_n = \gamma$ – теплота парообразования (фазового перехода);

γ определяется в соответствии с эмпирической формулой [4]:

$$\gamma = (h_n - h_w) L \cdot 123 \cdot \exp(0,05(T - 20)),$$

где T – температура в °С;

L – коэффициент паропроницаемости (кг/м·с·Па).

Величина $(\lambda + \gamma)$ есть не что иное, как эффективная теплопроводность с учетом переноса влаги.

Кондуктивную теплопроводность материала, содержащего воду и влажный воздух, можно определить по следующей формуле, хорошо согласующейся с опытными данными [4]:

$$\lambda = 1 / \left[(1 - c) / \lambda_1 + c / \lambda_2 \right], \quad (1)$$

$$\lambda_1 = (1 - p) \lambda_m + W \lambda_w + (p - W) \lambda_g,$$

$$\lambda_2 = 1 / \left[(1 - p) / \lambda_m + W / \lambda_w + (p - W) / \lambda_g \right],$$

где λ_w – теплопроводность воды;

λ_g – воздуха;

λ_m – твердого вещества (Вт/мК);

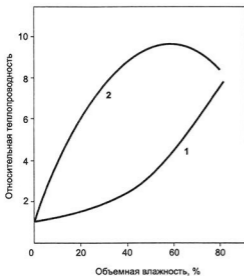


Рис. 1. Относительное возрастание эффективной теплопроводности пенобетона с увеличением объемной влажности:

1 – кондуктивная теплопроводность; 2 – эффективная теплопроводность с учетом теплопереноса

ρ – пористость;

σ – структурный коэффициент, определяемый эмпирически;

W – объемная влажность (ρ , σ и W – безразмерные коэффициенты, принимающие значения от 0 до 1). Поскольку W не может превышать пористость ρ , то в (1) удобно ввести параметр влагонасыщенности – относительного содержания влаги в поровом пространстве: $\chi = W/\rho$. Величина χ изменяется в пределах от 0 до 1.

В консолидированном грунте, окружающем подземный теплопровод, эффективная теплопроводность мало отличается от кондуктивной, но в материале теплоизоляции (имеющем пористость свыше 80%), в котором величина градиента температуры в рабочем режиме теплоснабжения превышает 500 К/м, значительная доля теплообмена осуществляется путем массопереноса влаги.

На рис. 1 приведены экспериментальные данные определения эффективной теплопроводности пенобетона в зависимости от его исходной объемной влажности, полученные во ВНИПИтеплопроект [4].

Равновесная изотермическая влажность теплоизоляционных материалов имеет значительно большую величину, чем у контактирующего с ними грунта. Экспериментальные данные по влагонасыщенности (отношению массы воды к массе сухого материала) пенобетона в зависимости от влагонасыщенности основных типов грунтов, приведены на рис. 2 [4]. Максимальное влагонасыщение пенобетонной изоляции при полном насы-

щении составляет 1,2–1,5 кг/кг.

Под действием градиента температуры влага в материале теплоизоляции перераспределяется – влажность увеличивается в более холодной зоне. При этом, если существуют условия для отвода поступающей влаги, то средняя влажность изоляции уменьшается (частичная просушка) до тех пор, пока максимальная влажность в «холодной зоне» не станет равна равновесной изотермической.

Примерный профиль кривой влажности в материале теплоизоляции $W(r)$ для равновесного состояния при установившейся циркуляции воды и пара показан на рис. 3.

Чем больше градиент температуры (а следовательно, градиент парциального давления пара) в теплоизоляции и чем меньше проницаемость материала теплоизоляции для обратного притока воды под действием градиента влажности, тем меньше влажность теплоизоляции.

Когда циркуляция пара в направлении уменьшения температуры, а циркуляция воды – в обратном направлении уравниваются друг друга, устанавливается равновесная влажность в материале теплоизоляции – $W(r)$.

При разрушении структуры материалов теплоизоляции в течение срока эксплуатации коэффициент проницаемости воды резко возрастает [2]. Кроме того, увеличение равновесной объемной влажности теплоизоляции W_0 выше определенной критической величины (обычно 10–30%) приводит к резкому уменьшению равновесного градиента влажности под действием теплопереноса [5]. Все эти процессы приводят к тому, что средняя влажность теплоизоляции в устано-

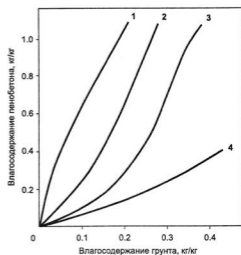
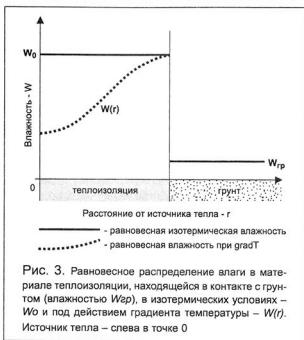


Рис. 2. Равновесное влагонасыщение теплоизоляции из пенобетона при контакте с влажным грунтом: 1 – песок, 2 – супесь, 3 – суглинок, 4 – глина



вившемся режиме теплопроводности приближается к изотермической.

Таким образом, объемная влажность теплоизоляции в рабочих эксплуатационных условиях может достигать 50% и более, а ее эффективная теплопроводность может превышать номинальную (для сухого материала) в 9 раз и достигать 0,9 Вт/мК для армопенобетона (рис. 1) и 0,4 Вт/мК - для фенольного поропласта. В этих условиях, учитывая также повышенную теплопроводность влажного грунта, величина тепловых потерь может превышать номинальную (для сухой изоляции и грунта) в 5 раз.

Возможность столь значительного увеличения тепловых потерь в зависимости от срока и условий эксплуатации (тип вмещающих грунтов, уровень грунтовых вод, влажность грунта), а также от технического состояния теплопроводов обуславливает их резкую неоднородность на протяжении тепловой сети. Обследование подземных теплопроводов Санкт-Петербурга, регулярно выполняемое АП «ДисСО», показало, что в разных зонах теплопровода неизменной конструкции линейная плотность теплового потока нередко различается в 1,3–1,7 раз. При этом, часто на внутриквартальных сетях тепловые потери оказываются даже большими, чем на магистральных.

Помимо резкой пространственной неоднородности величины транспортных тепловых потерь на теплопроводе, возможно также существенное изменение термического сопротивления изоляции и грунта в течение отопительного сезона. Оно обусловлено изменением влажности грунта и теплоизоляции.

Грунт, покрывающий теплопровод в траншее, отличается от естественного повышенной проницаемостью, пористостью, поскольку он был вскопан и перемешан при строительстве теплосети, а уплотнение его происходило лишь в течение краткого интервала времени, в сравнении с геологическим. Кроме того, этот грунт в зоне теплопровода по сравнению с естественным имеет повышенную на 5–15°C температуру.

Поскольку нет данных о влажности грунта, непосредственно покрывающего подземные теплопроводы, были использованы результаты обследования естественных почв в Санкт-Петербурге и Ленинградской области в гидрогеологических скважинах ПГО «Севзапгеология».

При этом следует учесть основные отличия грунта в траншее теплопровода:

- фильтрующаяся вода атмосферных осадков сравнительно быстро увлажняет всю толщу земли, покрывающую подземный теплопровод;
- в зимний период в условиях Санкт-Петербурга происходит регулярная подпитка грунта водой атмосферных осадков за счет таяния снега и промерзающего слоя почвы при оттепелях и слабых морозах;
- период таяния снежного покрова над теплопроводами растягивается на всю зиму и раннюю весну, а пик таяния снега наступает значительно раньше, чем в естественных условиях.

Изменение влажности грунта на глубине свыше 0,5 м при низком уровне грунтовых вод (УГВ) достаточно хорошо описывается изменением этого уровня относительно среднего значения. Этот критерий является более определенным и однозначным, чем количество осадков, поскольку непосредственно отражает величину объема воды, проходящей через грунт.

На рис. 4 приведены результаты сопоставления средних значений влажности супесчаного грунта (W , %) на глубине от 0,5 до 1,0 метра и уровня грунтовых вод с 1990 по 1996 г. Колебания УГВ и влажности ($W-W_{ср}$) даны относительно их среднегодового значения. Масштаб величины ($W-W_{ср}$) для наглядности взят в 10 раз большим, чем для колебаний УГВ (см).

В соответствии с данными на рис. 4 объемная влажность грунта W в течение отопительного сезона, как минимум на 4% больше, чем в теплое время года или во время проведения испытаний на тепловые потери. То есть влагосодержание больше на 0,027 кг/кг (при плотности грунта $1,5 \cdot 10^3$ кг/м³). По данным на рис. 2 для песчано-супесчаных грунтов с практически любой влажностью такое увеличение влагосодержания приведет к возрастанию влажности пенобетонной те-

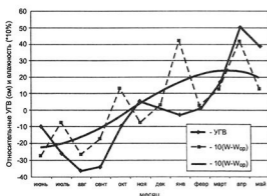


Рис. 4. Относительные годовые колебания уровня грунтовых вод – УГВ (см) и объемной влажности супесчаного грунта – $W (-10\%)$ на глубине от 0,5 до 1,0 м: пунктирная линия – измеренные значения; сплошная линия – сглаженная зависимость

плоизоляции на 5%. Тогда, используя графики рис. 1, видно, что теплопроводность сравнительно сухой армопенобетонной теплоизоляции (при влажности до 20%) может увеличиться в 1,3–1,5 раза.

Учитывая увеличение эффективной теплопроводности грунта с увеличением его влагосодержания примерно в 1,1 раза (формула 1) и используя известные теплотехнические формулы расчета линейной плотности теплового потока, получим, что совместное уменьшение термического сопротивления изоляции и грунта приведет к возрастанию тепловых потерь в 1,4–1,6 раза.

При периодическом подтапливании теплопроводов в результате подъема уровня грунтовых вод можно ожидать гораздо большего размаха колебаний влажности, а следовательно, эффективной теплопроводности грунта и материала теплоизоляции, особенно для теплопроводов канальной прокладки.

Увеличение эффективной теплопроводности с ростом температуры теплоизоляции и грунта [6] приведет к еще большему возрастанию транспортных тепловых потерь в отопительный период, при повышенных температурных нагрузках.

В результате контакта грунтовых вод и фильтрующихся атмосферных осадков с грунтом, прорываемым подземным теплопроводом, возникают также дополнительные (скрытые) тепловые потери, которые не учитываются в модели эффективной теплопроводности. Эти потери можно оценить по тепловому балансу.

При определении потерь тепла, связанных с выносом нагретой воды, фильтрующейся в области теплопровода, следует принимать в расчет

только объем воды, сливающийся дренажной системой за пределы зоны прогрева грунта.

Тогда тепло, выносимое нагретой водой Q (Вт), равно:

$$Q = \rho C P [T(D) - T_{гр}], \quad (2)$$

где P – расход воды в точке слива ($\text{м}^3/\text{с}$);

ρ – плотность ($\text{кг}/\text{м}^3$);

C – теплоемкость ($\text{Дж}/\text{кг}$) воды;

$T(D)$ – температура грунтовой воды в дренажной трубе перед выводом ее на слив, приблизительно равная температуре грунта в области дренажной трубы, проложенной в траншее теплопровода;

$T_{гр}$ – естественная температура грунта (и грунтовой воды).

Например, если на протяжении одного погонного километра теплопровода из дренажной системы в канализацию за 1 секунду сливается 1 литр грунтовой воды, нагретой подземным теплопроводом на 10°C , то линейная плотность тепловых потерь Q/L будет равна $42 \text{ Вт}/\text{м}$. В этом случае скрытые потери тепла на нагрев воды в дренажной системе будут достигать 40% от нормы линейной плотности теплового потока от теплопровода с диаметром труб 159 мм.

Максимальную оценку тепловых потерь на нагрев фильтрующихся атмосферных осадков можно получить из предположения, что вся вода выводится в канализацию дренажной системой тепловой сети.

Количество осадков в холодный период года (ноябрь–март) по данным СНиП 23-01-99 «Строительная климатология» составляет 200 мм. Добавим к ним осадки за сентябрь, октябрь, апрель. Итого получим 400 мм за отопительный сезон (8 месяцев). Приняв «площадь» водосбора над теплопроводом равной 5 м, получим, что объем V воды, поступающий в дренаж теплопровода за отопительный сезон, на единицу длины теплопровода L равен: $V/L = 2 \text{ м}^3$. Расчетное превышение температуры воды ΔT в дренажной системе, идущей вдоль линии теплопровода среднего (по сети) диаметра составляет около 10°C . Отсюда количество тепла G , затраченное на нагрев воды в дренаже на метр длины теплопровода равно:

$$G/L = \rho C V \Delta T / L = 8,4 \cdot 10^7 \text{ Дж}/\text{м}.$$

Тогда за отопительный сезон ($2,07 \cdot 10^7 \text{ с}$) плотность равномерного потока тепла, выносимого сливаемой водой фильтрующихся атмосферных осадков, составит $4,2 \text{ Вт}/\text{м}$ или до 5% от нормируемой величины тепловых потерь подземного теплопровода среднего диаметра (108 мм).

Увеличение температуры труб теплопровода приводит к частичной «просушке» теплоизоляции и соответствующей затрате тепла.

В силу сравнительно медленного термодиффузионного и диффузионного переноса влаги со скоростью примерно на порядок меньше, чем кондуктивный перенос тепла [4, 5], существенным может быть эффект просушки только при длительном повышении температуры в результате перехода на другой режим теплоснабжения.

Тогда тепло, затраченное на просушку материала теплоизоляции трубы, отнесенное к единице длины теплопровода G/L (Дж/м), будет равно:

$$G/L = r \cdot m/L = r \cdot \rho \pi (2D + \delta) \delta \Delta W/4,$$

где L – длина теплопровода (м),

r – теплота испарения воды, равная $2,5 \cdot 10^6$ Дж/кг,

m – масса испаренной воды (кг),

ρ – плотность воды (кг/м³),

D – диаметр трубы без теплоизоляции (м),

δ – толщина теплоизоляции (м),

ΔW – изменение объемного влагосодержания (%).

Согласно опытам с теплоизоляционными материалами [4], максимальное уменьшение объемной влажности пенобетонной теплоизоляции при повышении температуры на ее «горячей» стороне на 10°C составило 4%. Тогда для трубы диаметром $D=0,2$ м и толщиной теплоизоляции $\delta=0,1$ м расход тепла на частичную просушку теплоизоляции при увеличении температуры трубы на 10°C, составит $3,9 \cdot 10^6$ Дж на метр длины.

Если в течение отопительного сезона происходят 4 смены режима теплоснабжения, увеличивающих температуру в подающей и обратной трубе на 10°C, то тепло, затраченное на частичную просушку изоляции двух труб, отнесенное к длительности половины отопительного сезона и единице длины теплопровода, составит 3,2 Вт/м, то есть 2% от нормируемой плотности теплового потока.

Теплота испарения возмещается при конденсации, поэтому полученная оценка в полной мере может относиться только к теплопроводам надземной прокладки. Для подземных теплопрово-

дов дополнительными потерями тепла на частичную просушку теплоизоляции и грунта можно пренебречь из-за конденсации испаряемой влаги в грунте и учета массопереноса эффективной теплопроводности.

Выводы

Увлажнение грунта и теплоизоляции труб приводит к значительному увеличению транспортных тепловых потерь в подземных теплопроводах системы теплоснабжения, которые в течение периода их эксплуатации могут возрасти в 5 раз.

Это обстоятельство обуславливает резкую неоднородность величины тепловых потерь по длине тепловой сети, что связано со сроками и условиями эксплуатации, а также с техническим состоянием участков теплопроводов.

Помимо пространственной неоднородности, сопротивление теплопередаче конструкции подземного теплопровода может существенно изменяться в течение года, что приводит к возрастанию тепловых потерь во время отопительного сезона в 1,5 раза по сравнению с потерями в межотопительный период (когда проводятся испытания для определения величины тепловых потерь на охлаждение) при том же температурном режиме.

На отдельных участках тепловых сетей значительную долю могут составлять скрытые тепловые потери, связанные с выносом дренажной системой грунтовой воды, нагретой в зоне теплопровода.

Средняя для всей сети величина скрытых тепловых потерь, потраченная на нагрев фильтрующейся влаги атмосферных осадков в зоне подземного теплопровода, не превышает 5% от нормируемой линейной плотности теплового потока.

При составлении энергетической характеристики подземных тепловых сетей по тепловым потерям необходимо учитывать изменение термического сопротивления теплоизоляции трубопроводов и грунта в течение отопительного сезона, а также значительную неоднородность линейной плотности теплового потока по длине теплопроводов (с неизменной конструкцией).

Литература.

1. Миснар А. Теплопроводность твердых тел, жидкостей, газов и их композиций. – М.: Мир, 1968. – 464 с.
2. Петров-Денисов В.Г., Ковылянский Я.А., Пичков А.М. и др. Оценка долговечности теплоизоляционных конструкций теплопроводов при их прокладке подземным бесканальным способом.// Теплоэнергетика. – 1992. – № 11. – С. 56–59.
3. Решетин О.Л., Орлов С.Ю. Теория переноса тепла и влаги в капиллярно-пористых телах.// ЖТФ. – 1998. – т. 68. – С. 102–105.
4. Петров-Денисов В.Г., Масленников Л.А. Процессы тепло- и влагообмена в промышленной изоляции. – М.: Энергоиздат, 1983. – 193 с.
5. Нерпин С.В., Чудновский А.Ф. Энерго- и массообмен в системе растение – почва – воздух. – Л.: Гидрометеоиздат, 1975. – 358 с.
6. Лыков А.В., Михайлов Ю.А. Теория тепло- и массообмена. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1963. – 535 с.