УДК 658.264

Л.К. ГОРШКОВ, П.К.ТУЛИН
Санкт-Петербургский государственный горный институт (технический университет)
Н.Г.КИКИЧЕВ
АОЗТ «Ленгазтеплострой»

ГЕОТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ И ЭКОЛОГИЧЕСКИЙ АСПЕКТЫ СТРОИТЕЛЬСТВА И ЭКСПЛУАТАЦИИ БЕСКАНАЛЬНЫХ ТЕПЛОПРОВОДОВ В САНКТ-ПЕТЕРБУРГЕ

Строительство и эксплуатация бесканальных теплопроводов в Санкт-Петербурге сопряжена с рядом трудностей, обусловленных сильным обводнением грунтов, в частности из-за наличия погребенных торфяных болот. Микробиота этих болот способствует усилению коррозионных процессов стальных труб теплопроводов. Даются рекомендации по предотвращению интенсивной коррозии труб при эксплуатации теплопроводов в указанных условиях.

Construction and operation of channel less heat supply mains in St.Petersburg is characterized with a number of difficulties, due to high degree of soil watering and particularly because of buried peat bogs. Microorganisms of these peat bogs contribute to corrosion processes in steel pipes of heat supply mains. The article gives recommendations on preventions of pipes in operation of heat supply mains in such conditions.

Устойчивость и надежность подземных трубопроводов, в том числе и бесканальных, определяется бездефектностью их эксплуатации в течение длительного времени, близкого к планируемому сроку службы. Но в реальной практике, в частности в условиях Санкт-Петербурга, не всегда теплопроводы выдерживают плановый срок бездефектной эксплуатации, главным образом, из-за коррозирующей способности окружающей среды, т.е. грунта, в котором размещаются теплопроводы. Коррозия нарушает целостность стальных стенок трубопроводов в виде очаговой деструкции (питтинговая, щелевая, общая коррозия) или усиления трещинообразования (коррозия растрескивания) [5].

Анализ геолого-технических условий сооружения бесканальных теплопроводов в Санкт-Петербурге показывает, что грунты характеризуются повышенным обводнением, из-за чего резко увлажняется изоляция теплопроводов, снижается их прочность при переменно-влажностных режимах эксплуатации по причине развития коррозионных процессов, от чего увеличиваются теплопотери и снижается срок службы теплопроводов [6]. Единичные дефекты трубопроводов появляются после 5 лет их эксплуатации, а после 6-10 лет количество дефектов увеличивается в 10-15 раз. Наиболее часто встречаются коррозии на наружной поверхности теплопроводов (до 80 %).

Постоянная и повышенная обводненность грунтов в городской черте Санкт-Петербурга является питательной средой для развития и жизнедеятельности многочисленных микроорганизмов (микробиоты), т.е. еще одной из причин возникновения очагов коррозии теплопроводов. Это связано с тем, что примерно две трети площади исторического центра города занимают погребенные болота с достаточно мощными слоями торфов, служащих средой обитания и размножения микробиоты [4].

В дельте Невы преобладают в настоящее время погребенные под антропогенным культурным слоем болота низкого типа, являющиеся первоначальной стадией формирования всех типов болот. При инженерной подготовке территории, когда болотные об-

разования частично срезались, либо производилось их захоронение на полную мощность, непосредственно на минеральных грунтах прослеживались образования торфанизированного типа. Такие образования имеют высокое содержание тонкодисперсной фракции $d < 0{,}001$ мм, которое связано со степенью их разложения. Необходимо отметить и характерные для исследуемой территории виды торфов, такие как сфагновые, древесно-сфагновые, сфагново-тростниковые, основным растением-торфообразователем которых является сфагновый мох. Торфа, находящиеся выше и ниже уровня грунтовых вод, имеют богатую гетеротрофную микробиоту: бактерии, микромицеты, актиномицеты, микроводоросли.

Относительно погребенных болот в территориальных строительных нормах по Санкт-Петербургу (ТСН 50-302-2004) отмечается:

- потенциальная опасность в экологическом отношении биохимической генерации газов CH_4, CO_2, H_2S;
- возможность гниения торфа и органических включений в грунтах при понижении уровня грунтовых вод, что представляет собой определенную угрозу для окружающей среды при вскрытии погребенных болот, в процессе прокладки теплопроводов;
- влияние толщи погребенного торфа (как ненарушенного, так и гниющего) на развитие деформаций зданий и, особенно, подземных сооружений, к которым относятся и бесканальные теплотрассы.

По отношению к уровню грунтовых вод условия для жизнедеятельности болотной микробиоты делятся на аэробные (выше уровня грунтовых вод) и анаэробные (ниже этого уровня), при этом существует и переходная зона. В названных зонах наблюдаются следующие группы бактерий:

- аэробная зона – нитрифицирующие, тионовые, целлюлозоразлагающие;
- анаэробная зона – аммонифицирующие, сульфатредуцирующие, целлюлозоразлагающие, метанобразующие.

Для переходной зоны характерны денитрифицирующие группы бактерий.

Наиболее богаты биомассой болота низинного типа, которые имеют доминирующее распространение в Санкт-Петербурге: до 435 т/га сухой биомассы, среди которой 90-99 % составляют грибной мицелий и споры грибов, на бактерии приходится от 0,4 до 2,6 % по данным А.В.Головченко (1993). Такие погребенные болота и представляют наибольшие трудности для прокладки и последующей эксплуатации подземных бесканальных теплопроводов. Трудности усугубляются тем, что торфа и заторфованные грунты являются сильно контаминированными (загрязненными, насыщенными) отходами за счет утечек из систем коммунального водоотведения и соответственно поступления питательных и энергетических субстратов (белков, липидов, углеводов), что ускоряет развитие и рост болотной микробиоты в 3-4 раза. Кроме того, необходимо принять во внимание также дополнительный привнос микроорганизмов из таких сетей и повышение температуры грунтовых вод [3, 4].

Некоторые виды бактерий из болотной микробиоты, например, углеводородокисляющие микробы, участвуют в начальной стадии трансформации (окислении) углеводородов в виде проливов нефтепродуктов. Для этих микроорганизмов нефтепродукты являются единственным источником их клеточного углерода и запасов жизненной энергии. Разлагая нефтепродукты, насыщающие грунты, эта группа микробов, с одной стороны, способствует самоочищению подземных вод и водонасыщенных грунтов, но с другой стороны деятельность микробов по биохимической деструкции нефтепродуктов сопровождается усилением метагенезиса, образованием диоксида углерода и сероводорода. Образование сероводорода наблюдается при загрязнении болот сульфатами и протекает под воздействием сульфатредуцирующих бактерий. Сероводородное загрязнение в подземной среде Санкт-Петербурга прослеживается повсеместно.

Результатом жизнедеятельности болотной микробиоты, мигрирующей вниз по

разрезу в сорбированной и свободной форме, является накопление бактериальной массы – живых и мертвых клеток микроорганизмов, продуктов их метаболизма белковой и небелковых природы в подстилающих породах. Общее содержание белковых соединений выражается с помощью интегрального показателя – бактериальной массы, определяемой по содержанию суммарного белка (СБ).

Исследования, проведенные на различных объектах Санкт-Петербурга, расположенных в зонах развития погребенных болотных отложений, показали значительное увеличение бактериальной массы (величина СБ достигает ≈ 280 мкг/г) при этом, как правило, наблюдается снижение сопротивления грунта сдвигу, угла внутреннего трения вплоть до нулевых значений и, как следствие, переход глинистых пород в квазипластичное состояние.

В четвертичных отложениях разреза в зонах снятых болот значение СБ снижается до 110 мкг/г, однако и при таких величинах суммарного белка глинистые породы находятся в квазипластичном состоянии. Глинистые породы в зонах отсутствия болот и техногенного загрязнения обычно имеют значения СБ < 40 мкг/г.

Длительное воздействие торфов на наиболее прочные и устойчивые четвертичные отложения, например, моренные суглинки, приводит к преобразованию их состава, естественного состояния и физико-механических свойств. Наблюдается снижение характеристик прочности, угла внутреннего трения с 15 до 4° и сцепления с 0,03 до 0,025 МПа при возрастании величины микробного белка от 60 до 250 мкг/г. В этих случаях все образцы, взятые из заболоченной морены, разрушались по типу пластического деформирования [3].

Прокладка бесканальных теплопроводов в песчано-глинистых породах, приуроченных к погребенным болотам, требует специальных методов проходки траншей, аналогичных применяемым в зонах распространения плывунов, при этом не редкими бывают газовыделения из проходимых грунтов.

Приуроченные к болотным отложениям пески, в которых отмечается активная микробиологическая деятельность, проявляют ярко выраженные плывунные свойства, хотя их гранулометрический состав не отвечает зерновому составу истинных плывунов. Переход песков в плывунное состояние связан с сорбцией тонкодисперсных частиц биотического и абиотического генезиса на зернах песка, что в результате вызывает снижение значений коэффициента фильтрации и водоотдачи песков под влиянием торфяных отложений. Коэффициент фильтрации болотных песков при значениях СБ, близких к нулевым, обычно составляет 16-22 м/сут. Сорбция микробов и продуктов их жизнедеятельности на частицах песка способствует закупорке порового пространства, что является причиной снижения величины коэффициента фильтрации до 1,5 м/сут при значении СБ, равном 90-130 мкг/г. Это обстоятельство тоже по-своему усиливает обводнение территории, по которой прокладываются теплопроводы, и служит дополнительной причиной активации коррозии труб.

При строительстве и эксплуатации бесканальных теплопроводов необходимо учитывать еще один фактор, который напрямую связан с развитием болотной микробиоты и продуктами ее метаболизма, – это возможность разупрочнения грунта вокруг трубопровода, уложенного в траншею, когда в результате деятельности микроорганизмов изменяется гранулометрический состав песков и снижаются силы трения нередко до нулевых и даже отрицательных значений. Поэтому СНиП 2.02.03-85 регламентирует силы трения при погружении в грунт каких-либо конструкций, вводит соответствующие поправки.

Для бесканальных трубопроводов снижение степени уплотнения грунта влечет за собой снижение величины перепада температур и критической силы, обеспечивающей устойчивость и надежность трубопровода в эксплуатации и рассчитываемой по следующим зависимостям [2]:

- для критической силы

$$P_{кр} = 8{,}643 \sqrt[3]{q^2 EIK_п}\,; \qquad (1)$$

• для возможного перепада температур потока в трубопроводе и окружающей среды

$$\Delta t = \frac{8{,}643}{\alpha F}\sqrt[3]{\frac{q^2 I}{E^2 K_п^2}}\,, \qquad (2)$$

где q – расчетная сила трения, МН/м; E – модуль упругости при растяжении-сжатии материала трубы, МПа; I – осевой момент инерции сечения трубы, м^4; $K_п$ = 1,1-1,2 – коэффициент перегрузки; α – температурный коэффициент трубы, °С$^{-1}$; F – поперченное сечение трубы, м^2.

Из анализа зависимостей (1) и (2) следует, что критическая сила и перепад между температурами в потоке теплоносителя внутри трубы и окружающей среды, кроме геометрических характеристик (F, I), зависят главным образом от величины удельной силы трения q, определяющей плотность закладки трубопровода в траншее: чем больше эта сила трения, тем выше $P_{кр}$ и Δt, тем устойчивее и надежнее состояние трубопровода при эксплуатации. При этом известно, что увеличение степени уплотнения грунта вблизи теплопровода равносильно снижению толщины его стальной стенки в стационарном режиме эксплуатации [1]. Для обеспечения надлежащей степени уплотнения грунта в траншее с трубопроводом в условиях повышенного обводнения и активности болотной микробиоты рекомендуется предварительно осушать (дренировать) грунт вблизи трассы трубопровода, а также производить подсыпку в необходимых объемах незараженного микроорганизмами привозного песчано-глинистого грунта, что соответствует в общих чертах требованиям СНиП 2.02.03-85.

Названные мероприятия способствуют снижению активности коррозионных процессов в отношении бесканальных теплопроводов, но при этом необходимо остановиться и на непосредственно антикоррозионных рекомендациях, для чего следует определить основные виды механизмов влияния коррозионных сред на эксплуатационное состояние теплопроводов.

Различают три основных вида механизмов влияния коррозионных сред на трещиностойкость материалов, в том числе и стальных труб бесканальных теплопроводов [7]:

- адсорбционное понижение твердости;
- водородное охрупчивание;
- коррозионное растворение.

Первый из названных механизмов определяется адсорбцией поверхностно-активных веществ (ПАВ) на кончике (вершине) трещины, что приводит к снижению значения поверхностной энергии и облегчению разрушения (эффект П.А.Ребиндера). Но следует заметить, что адсорбционное воздействие интенсифицируется при больших значениях коэффициента интенсивности напряжений, когда благодаря высоким скоростям докритического роста трещины другие механизмы не успевают проявиться. В случае бесканальных теплопроводов, когда начальные напряжения в трубах (до начала коррозии) невысоки, адсорбционное воздействие практически отсутствует, но зато оставшиеся два других механизма реализуются достаточно активно.

Остановимся на рассмотрении водородного охрупчивания, так как проблема коррозионного растворения хорошо освещена в литературе, например, в работе [5], где оценено действие общей и питтинговой коррозии, а также коррозионного растрескивания на стали различного состава, в частности, применительно к производству плакированных труб для теплопроводов.

Известно, что влияние влаги на металлы достаточно опасно, так как ведет к появлению коррозии и постепенному их разрушению. Эта старая проблема приобрела в настоящее время особое значение в связи с многочисленными авариями и даже катастрофами на трубопроводных магистралях, главной причиной которых было увеличение хрупкости даже высокопрочных сталей. При этом основным процессом, ускоряющим докритический рост трещин и приводящим к разрушению сталей, является чрезмерное повышение хрупкости некоторой

малой зоны вблизи вершины трещин под действием на нее свободного водорода.

Атомарный водород, всегда содержащийся в чистом или связанном с нейтральными молекулами виде (например, в растворах электролитов и воде, что имеется в избытке в грунтах Санкт-Петербурга), в результате диффузии способен проникать в любые металлы. Этому способствует высокая растворимость водорода: при нормальной температуре и нормальном давлении она составляет от 10 до 100 $см^3$ на 1 кг металла, с ростом же температуры и давления растворимость существенно возрастает. Увеличение хрупкости наблюдается уже при концентрации водорода в 2 $см^3$ на 1 кг металла, а с 10 $см^3$ на 1 кг оно признается опасным. Наиболее уязвимым для проникновения водорода являются малые участки новой поверхности металла, не защищенные пленкой оксида, для теплопроводов такими участками могут быть повреждения изоляции, стыки места переходов через стенки камер, места установки компрессоров и т.п.

Водородное увеличение хрупкости может остановить подача кислорода, так как последний даже в малых концентрациях способен практически мгновенно прекратить докритический рост трещин в среде водорода за счет образования тонкой окисной пленки, защищающей поверхность металла. В больших объемах обработка трубопровода нерациональна, так как может активизировать рост микробиоты, но для отмеченных выше участков теплопровода обработка кислородом в профилактических целях желательна.

В большинстве случаев коррозионного роста трещин процессы адсорбции, водородного увеличения хрупкости и коррозионного растворения взаимосвязаны друг с другом и протекание одних процессов обуславливает проявление других. Взаимосвязь этих процессов усложняется составом и структурой металла, влиянием вида напряженного состояния, условий нагружения и эксплуатации теплопровода, и все это определяет необходимость изыскания действенных методов и способов борьбы с коррозией стальных труб бесканальных теплопроводов, эксплуатируемых в условиях городской застройки.

Повышение коррозионной стойкости подземных теплопроводов в настоящее время для условий Санкт-Петербурга целесообразно решать в следующих направлениях [5]:

- гидрозащита трубопроводов армопенобетонными фенольно-пороластовыми и пенополиуретановыми оболочками; широкое распространение получил низкомолекулярный стабилизированный полиэтилен высокой прочности;
- гидрозащита стыков труб органосиликатными материалами в сочетании с модификатором ржавчины типа «Харвол»;
- применение стальных футляров с теплоизоляционными наполнителями для изоляции труб в местах их пересечений с подземными стенами и фундаментами различных сооружений.

Надежная гидрозащита теплопроводов способствует обеспечению и коррозионной стойкости поверхностей труб, что может быть осуществлено только за счет изменения химического состава их наружных слоев. Другими методами термической, химико-термической, либо механической обработки этого не достичь. Добиться этого можно, в частности, применением труб из нержавеющих сталей или применением плакированных труб. В некоторых странах (ФРГ, Финляндия) в небольших объемах используют трубы из нержавеющей стали, однако это дорого и для условий Санкт-Петербурга нецелесообразно.

Плакированные трубы представляют собой многослойные металлические композиции, соединенные в процессе металлургического производства. В отличие от металлических покрытий плакирующие слои не имеют пористости, прочность сцепления слоев близка к прочности основного металла. При этом плакирующий слой без опасности скола может быть гораздо более толстым, чем металлическое покрытие. Он устойчив к вибрациям, ударам, граница соединения не является тепло- и электропроводящим барьером.

Применение плакитированных труб позволит значительно упростить теплогидроизоляционную конструкцию тепловых сетей, главным назначением которой остается тепловая изоляция. Кроме того, обладая постоянными во времени коэффициентом шероховатости поверхности, плакированные трубы дадут существенную экономию энергии на перекачку воды и позволят полностью использовать проектную пропускную способность теплопроводов, чего при существующих трубах достичь не удается.

Распространенные аустенитные стали подвержены сильному коррозионному растрескиванию, питтиногвой и щелевой коррозии [5]. По этой причине аустенитные стали непригодны в качестве материала для плакирования труб.

Ферритные стали с достаточно высоким содержанием хрома являются невосприимчивыми к хлоридному коррозионному растрескиванию.

Двухфазные аустенитно-ферритные стали имеют хорошие антикоррозионные качества в растворах хлоридов. Низколегированные двухфазные стали подвергаются питтиногвой коррозии. Эти стали рекомендуется применять для плакирования труб тепловых трасс, так как при этом можно ожидать десятикратного увеличения ресурса труб по сравнению с углеродистой сталью, в том числе и при наличии самокомпенсирующихся секций.

Монтаж теплопроводов из плакированных сталей, включающий в себя сварку и резку труб, имеет свои особенности, которые необходимо учитывать. Сварку плакированных труб в монтажных условиях наиболее целесообразно производить покрытыми электродами с V-образной разделкой кромок.

Перед сваркой в монтажных условиях должно быть обеспечено отсутствие попадания влаги и других загрязнений в зону сварки. Сварку рекомендуется производить при температуре не ниже –5 °С. Если температура окружающей среды будет ниже –5 °С, то перед сваркой необходимо просушить свариваемые кромки до температуры 60-80 °С.

Качество сварных соединений плакированных труб в монтажных условиях проверяется внешним осмотром, замером габаритов шва и гаммапросвечиванием. Объем контроля гаммапросвечиванием на первых ста стыках составляет 100 % , а на последующих устанавливается по результатам контроля.

При резке плакированных изнутри и сжатии труб в полевых условиях наиболее освоенным и часто применяемым отечественной промышленностью способом резки труб в монтажных условиях является газопламенная кислородная резка кислородом высокого давления с использованием профилированных режущих сопел малого диаметра.

Однако этот довольно простой и действенный способ разрезания труб в монтажных условиях, т.е. непосредственно вблизи траншеи, не пригоден для высоколегированных сталей аустенитного класса, а также биметаллических (плакированных только снаружи) и триметаллических труб (плакированных как снаружи, так и изнутри) из-за появления в процессе резки рваных кромок, надрывов и других дефектов труб по кромкам резов.

Кроме того, эти методы резки не обеспечивают требуемую геометрию разделки под сварку, что вызывает также трудности при выполнении ремонтных сварочных работ в монтажных условиях. Поэтому разработаны специальные переносные разъемные пневматические и механические труборезы, устанавливаемые на трубопроводе по месту реза, которые работают в автоматическом режиме. Изготавливаются они различных типоразмеров согласно сортаменту труб, т.е. в зависимости от их диаметров, и могут быть использованы для резки труб тепловых сетей диаметрами 400-1100 мм с толщиной стенки 6-12 мм.

Для разделки кромок под сварку в монтажных условиях применяются специальные фаскорезы (переносные пневматические автоматы). При этом одна установка осуществляет разделку кромок с внутренней и наружной стороны в автоматическом режиме.

Приводятся в действие труборезательные и фаскорезательные установки от передвижных, как правило, дизельных машин.

Таким образом, учет особенностей грунтов, обусловленных в значительной мере проявлениями погребенных болот с их микробиотой, повышенным обводнением, в том числе и электролитического характера, а также ряд мероприятий антикоррозионной и гидравлической защиты бесканальных теплопроводов с применением плакированных труб из хромистых ферритовых и аустенитно-ферритовых сталей с газотермическими покрытиями могут обеспечить необходимое повышение стойкости и надежности теплопроводов в условиях Санкт-Петербурга при соблюдении действующих геотехнологических норм и правил и экологической безопасности.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Горшков Л.К.* Исследование напряженно-деформированного состояния подземных бесканальных теплопроводов при эксплуатации в условиях городской застройки / Л.К.Горшков, Н.Г.Кикичев, В.Г.Гореликов // Научно-технические инновации в строительстве / МГСУ. М., 2004. С.40-46.

2. *Горшков Л.К.* Продольный изгиб бесканальных трубопроводов / Л.К.Горшков, Н.Г.Кикичев, С.В.Наумов // Наука в СПГГИ (ТУ). Вып.3. СПб, 1998. С.289-298.

3. *Дашко Р.Э.* Инженерно-геологический и геоэкологический анализ и оценка условий строительства и эксплуатации зданий и сооружений в историческом центре Санкт-Петербурга / Р.Э.Дашко, А.В.Волкова, Е.Г.Захарова // Материалы годичной сессии Научного совета РАН «Сергеевские чтения» / ГЕОС. Вып.5. М., 2003. С.289-298.

4. *Захарова Е.Г.* Роль болотной микробиоты в изменении состояния и свойств песчано-глинистых отложений (на примере Санкт-Петербурга) // Записки Горного института. Т.152. Ч.1. СПб, 2002. С.23-26.

5. *Кикичев Н.Г.* Антикоррозионная и гидравлическая защита бесканальных теплопроводов с секциями самокомпенсирующихся труб в условиях Санкт-Петербурга / Н.Г.Кикичев, Л.К.Горшков // Экология и развитие стран Балтийского региона / МАНЭБ. СПб, 2000. С.177-180.

6. *Кикичев Н.Г.* Технико-технологические особенности строительства современных бесканальных теплопроводов в Санкт-Петербурге // Экология и развитие стран Балтийского региона / МАНЭБ. СПб, 2000. С.175-177.

7. *Партон В.З.* Механика разрушения: От теории к практике. М.: Наука, 1990. 240 с.