УДК 628.2

© В. П. Верхотуров, канд. техн. наук, доцент

© А. В. Кудрявцев, канд. техн. наук, доцент

(Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет)

E-mail: water@spbgasu.ru

© Н. Д. Князев, инженер

(ООО «Стеклокомпозит Северо-Запад»)

E-mail: knyazevnick@bk.ru

© Н. А. Черников, д-р техн. наук, профессор

(Петербургский государственный университет
путей сообщения императора Александра I)

E-mail: nika_pgups@mail.ru

DOI 10.23968/1999-5571-2019-16-5-153-159

© V. P. Verkhoturov, PhD in Sci. Tech., Associate Professor

© A. V. Kudryavtsev, PhD in Sci. Tech., Associate Professor

(Saint Petersburg State University of Architecture
and Civil Engineering)

E-mail: water@spbgasu.ru

© N. D. Kniazev, engineer

(LLC «Steklokompozit Severo-Zapad»)

E-mail: knyazevnick@bk.ru

© N. A. Chernikov, Dr. Sci. Tech., Professor

(Emperor Alexander I St. Petersburg
State Transport University)

E-mail: nika_pgups@mail.ru

КРИТЕРИИ ВЫБОРА ПОЛИМЕРНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ ДЛЯ СИСТЕМ ВОДОСНАБЖЕНИЯ И ВОДООТВЕДЕНИЯ С УЧЕТОМ ПРЕДЕЛЬНЫХ СОСТОЯНИЙ

CRITERIA FOR SELECTION OF POLYMER PIPELINES FOR WATER SUPPLY AND SANITATION SYSTEMS, TAKING INTO ACCOUNT THE LIMIT CONDITIONS

Рассматриваются основные критерии выбора полимерных трубопроводов для систем водоснабжения и водоотведения, которые позволят обеспечить выполнение требований по надежности и безопасности в течение всего жизненного цикла оборудования. Расчет предельных состояний трубопровода с учетом максимального количества значимых факторов является одним из условий обеспечения данных требований и позволяет подобрать трубу с оптимальными параметрами в рамках решаемой задачи. На сегодняшний день ни одна из методик, рекомендуемых для расчета, не учитывает в полной мере факторы, влияющие на наступление предельных состояний трубопровода, более того, каждая из этих методик учитывает свой ряд параметров, что не позволяет обоснованно сравнивать полученные результаты.

Ключевые слова: расчет трубопроводов, деформации полимерных трубопроводов, предельные состояния трубы.

The paper considers the main criteria for selecting polymer pipelines for water supply and sanitation systems that will ensure compliance with the requirements for reliability and safety throughout the life cycle. Calculation of the limiting conditions of the pipeline, taking into account the maximum number of significant factors, is one of the conditions for ensuring these requirements and allows choosing a pipe with optimal parameters in the framework of the task. At present, no method recommended for calculation fully takes into account the factors affecting the onset of the pipeline extreme conditions, moreover, each of these methods takes into account its own set of parameters, which does not allow a reasonable comparison of the results obtained.

Keywords: calculation of pipelines, deformation of polymer pipelines, the limit state of the pipes.

Водопроводно-канализационные системы являются одной из основных инфраструктур, обеспечивающих существование и социально-экономическое развитие современных городов.

Дефицит в обеспечении необходимого уровня функционирования данной инфраструктуры может возникать вследствие старения (износа) существующих систем или в результате расши-

рения и освоения новых территорий. Обеспечение необходимого уровня функционирования системы предполагает замену существующих и строительство новых трубопроводов водоснабжения и водоотведения.

Современный рынок предлагает трубы для сетей водоснабжения и водоотведения из различных материалов. Наиболее востребованными в настоящее время являются трубы, выполненные из полимерных материалов. Данные материалы обладают одновременно упругостью и вязкостью, что характеризуется соответствующей зависимостью между напряжением и линейной деформацией материалов.

Эластичность, с точки зрения жесткости трубы, подразумевает что при приложении нагрузки к трубе она теряет свое первоначальное сечение (круглая труба овализуется), стенки трубы встречают сопротивление грунта, в результате чего деформации трубы и изгибающие моменты значительно уменьшаются, а несущая способность трубы увеличивается [1].

В соответствии с Федеральным законом № 384-ФЗ¹ трубопроводы систем водоснабжения и водоотведения должны рассчитываться по прочности и устойчивости на предельные состояния, характеризующиеся:

- разрушением любого характера;
- потерей устойчивости формы;
- потерей устойчивости положения;
- нарушением эксплуатационной пригодности и иными явлениями, связанными с угрозой причинения вреда жизни и здоровью людей, имуществу физических или юридических лиц, государственному или муниципальному имуществу, окружающей среде, жизни и здоровью животных и растений.

Первое предельное состояние предполагает расчет по несущей способности (расчет на прочность), который обязателен как для жестких, так и для эластичных труб. Здесь также следует учитывать, что для труб, проложенных на небольшой глубине, динамические воздействия (например, транспортные нагрузки) могут оказывать существенное статических. Для таких случаев требуется расчет на выносливость с учетом динамических свойств материала.

Второе предельное состояние предполагает расчет на деформацию, который выполняется только для эластичных труб. Расчетом определяются такие деформации трубы, при которых нарушится работоспособность системы (например, потеря герметичности либо деформация, приводящая к потере несущей способности).

Третье предельное состояние предполагает расчет на потерю положения трубы. К такому можно отнести расчет на всплытие трубопровода, изменение его положения при перемещении грунта в результате сейсмического воздействия и т. п.

Четвертое предельное состояние предполагает расчет с учетом изменения свойств трубы в течение всего периода эксплуатации и аварийных предельных состояний². К такому можно отнести расчеты, учитывающие изменение свойств материала трубы за счет истирания, коррозионной активности при взаимодействии с внешней или транспортируемой средой и т. п.

Таким образом, расчетами требуется подтверждать отсутствие наступления предельных состояний при определенном сочетании факторов для конкретных расчетных ситуаций.

На сегодняшний день на федеральном уровне не существует обязательной методики, регламентирующей прочностные расчеты подземных трубопроводов водоснабжения и водоотведения, что делает возможным использование упрощенных (неполных) методик, не учитывающих все возможные варианты нагрузок и состояний трубопровода.

На региональном уровне существующие рекомендации по расчету³ дают возможность для расчета эластичных труб, прокладываемых открытым способом, использовать три различные методики^{4,5,6}, обеспечивающие разный уровень точности получаемых результатов.

На региональном уровне существующие рекомендации по расчету³ дают возможность для расчета эластичных труб, прокладываемых открытым способом, использовать три различные методики^{4,5,6}, обеспечивающие разный уровень точности получаемых результатов.

² Федеральный закон РФ «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений» от 30.12.2009 № 384-ФЗ (в ред. от 02.07.2013).

³ РМД 40-20-2016. Устройство сетей водоснабжения и водоотведения в Санкт-Петербурге. Актуализированная редакция РМД 40-20-2013.

⁴ СП 40-102-2000. Проектирование и монтаж трубопроводов систем водоснабжения и канализации из полимерных материалов. Общие требования. М.: ФГУП ЦПП, 2000. 35 с.

⁵ AWWA Manual M45. Fiberglass pipe design. 2nd ed. AWWA, 2005. 170 p.

⁶ ATV-DVWK-A 127. Statische Berechnung von Abwasserkanälen und -leitungen. Germany: GFA, 2000.

¹ Федеральный закон РФ «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений» от 30.12.2009 № 384-ФЗ (в ред. от 02.07.2013).

В качестве примера в таблице представлены результаты статических расчетов деформации безнапорной (PN1) стеклопластиковой трубы (номинальной жесткости SN10000) по трем вышеприведенным методикам. При расчете были использованы следующие исходные данные: труба прокладывается открытым способом в суглинистых грунтах с модулем деформации $E = 10$ МПа, стенки траншеи принимаются вертикальными, способ крепления стенок траншеи не учитывается. Ширина траншеи принимается в соответствии с СП 45.13330.2012⁷. Обратная засыпка выполняется песком с послойным уплотнением не менее 95 %. Постоянные параметры — характеристики местного грунта, грунта обратной засыпки. Переменные параметры — глубина прокладки, диаметр трубы.

Как видно из таблицы, полученные результаты расчетов по трем методикам в среднем имеют расхождение около 50 %, что делает затруднительным обоснованный выбор оптимальных параметров трубы.

Каждая из методик учитывает ряд разных факторов, влияющих на конечную величину деформации подземного трубопровода. С нашей точки зрения, из всех рассматриваемых факторов можно выделить пять наиболее значимых:

- статические нагрузки (включая дополнительные нагрузки, приложенные на поверхность земли);
- динамические нагрузки (включая возможные варианты перемещения грунта, в том числе для сейсмически активных зон);
- способ проведения строительно-монтажных работ (включая ширину траншеи и способы крепления ее стенок);
- геологические условия прокладки трубопровода;
- изменение свойств трубы в течение всего периода эксплуатации (включая изменения под воздействием окружающей и транспортируемой среды).

Анализируя методики проведения статических расчетов, можно заметить, что учет геологических условий прокладки, способов проведения СМР и изменения свойств трубы в течение периода эксплуатации не всегда является достаточно полным и обоснованным, хотя между этими факторами прослеживается явная взаимосвязь.

В соответствии с рекомендациями СП 45.13330.2012 ширину траншеи и крепление ее стенок при открытом способе прокладки трубопроводов следует выбирать с учетом обеспечения размещения людей, конструкций, оборудования и удовлетворения требований безопасности при производстве работ. Чаще всего, с учетом стесненных условий, характерных для застроенных территорий, а также объемов

⁷ СП 45.13330.2012. Земляные сооружения, основания и фундаменты. Актуализированная редакция СНиП 3.02.01–87. М.: ФГУП ЦПП, 2012. 145 с.

Расчетные деформации безнапорной стеклопластиковой трубы

№ п/п	Номинальный диаметр трубы DN, мм	Глубина до верха трубы, м	Ширина траншеи, м	Расчетная деформация, %, определяемая по методике			Разница, %
				ATV DVWK-A127	AWWA M45	СП 40-102–2000	
1	500	2	1,3	1,44	0,57	1,14	60,4
2		4		1,73	1,04	1,27	39,9
3		6		1,91	1,49	1,39	27,2
4		8		2,02	1,9	1,52	24,8
6	1000	2	1,9	1,48	0,74	2,01	63,2
7		4		1,86	1,39	2,81	50,5
8		6		2,14	2,01	3,61	44,3
9		8		2,34	2,59	4,41	46,9
11	1500	2	2,6	1,47	0,82	2,11	61,1
12		4		1,91	1,55	2,91	46,7
13		6		2,25	2,26	3,71	39,4
14		8		2,53	2,93	4,51	43,9

перемещаемого грунта при производстве работ, предусматривается минимально возможная ширина траншеи, что при соответствующей глубине может привести к увеличению деформационных нагрузок и необходимости использования трубы большей номинальной жесткости.

Помимо ширины траншеи, следует учитывать физико-механические характеристики местного грунта, воспринимающего перераспределенные напряжения от эластичной трубы, деформирующейся под воздействием внешних нагрузок.

Немаловажное влияние на расчетную деформацию трубы оказывает и использование для крепления стенок траншеи конструкций (щитов, шпунтовых элементов и т. д.), извлекаемых после полной или частичной засыпки траншеи. Следствием этого является разуплотнение грунта, происходящее в зоне укладки трубопровода, что неизбежно приводит к снижению модуля деформации грунта засыпки и к увеличению деформаций трубы.

Влияние ширины траншеи, свойств местного грунта и вида креплений стенок траншеи на расчетную деформацию трубы показано на гра-

фиках (рис. 1, 2), построенных по результатам статических расчетов для безнапорной (PN1) стеклопластиковой трубы номинальной жесткости SN5000, проложенной открытым способом в траншее с вертикальными стенками, для случаев использования извлекаемых и не извлекаемых креплений стенок траншеи. Труба проложена на глубине 6 м от верха трубы до поверхности земли, обратная засыпка выполняется песком с уплотнением 95 %. Переменными параметрами являются значения модуля деформации местного грунта E и отношение ширины траншеи B к номинальному диаметру уложенной трубы DN : B/DN .

Из графика на рис. 1 видно, что развитие деформаций эластичной трубы зависит от модуля деформации местного грунта лишь до определенных пределов. Увеличение ширины траншеи ведет к замещению местного грунта грунтом обратной засыпки, который, как правило, обладает значительно большим модулем деформации (для песка со степенью уплотнения 95 % модуль деформации составляет около 8 МПа). Таким образом, при замещении местного грунта на ширину

Рис. 1. График зависимости деформаций трубы, %, от ширины траншеи, B/DN , для различных значений модуля деформации местного грунта E , МПа, при глубине заложения от верха трубы $H = 6$ м, без учета крепления стенок траншеи

Рис. 2. График зависимости деформаций трубы, %, от ширины траншеи B/DN , для различных значений модуля деформации местного грунта E , МПа, при глубине заложения до верха трубы $H = 6$ м, с учетом извлекаемого крепления стенок траншеи

более четырех диаметров трубы его влияние на деформацию трубы становится малозначимым.

Анализируя график, представленный на рис. 2, можно сделать вывод, что способ крепления стенок траншеи в значительной мере влияет на развитие деформаций эластичной трубы. В данном случае влияние модуля деформации местного грунта не столь существенно. Решающим фактором для развития деформаций трубы является снижение значения модуля деформации грунта обратной засыпки, происходящее вследствие его разуплотнения при извлечении элементов креплений стенок траншеи.

Как отмечалось ранее, при выборе материала трубы следует обеспечить ее надежную работу в течение всего периода эксплуатации. Для многих систем инженерных сетей расчетный срок эксплуатации составляет 50 лет и более.

С течением времени под воздействием постоянной нагрузки пластичный материал трубы испытывает непрерывный рост деформаций, определяемый ползучестью материалов [2, 3]. В большинстве случаев данный параметр определяют по изменению значений модуля упругости, полученных экстраполяцией результатов долгосроч-

ных (как правило, не более двух лет) испытаний. Отношение первоначального модуля упругости к конечному (экстраполированному на срок до 50 лет) называют коэффициентом ползучести.

Для сравнения влияния ползучести на развиваемые деформации пластичных труб, изготовленных из различных материалов, с течением времени при разных глубинах прокладки были проведены статические расчеты безнапорных (PN1) стеклопластиковых и гофрированных полипропиленовых труб диаметром 1000 мм. При расчете учитывались следующие условия: труба прокладывается открытым способом в траншее с вертикальными стенками. Модуль деформации окружающего грунта $E = 2$ МПа, ширина траншеи $B/DN = 2$. Стеклопластиковая труба принимается номинальной жесткости SN5000, полипропиленовая труба — номинальной жесткости SN8000. Для стеклопластиковой трубы коэффициент ползучести при периоде времени 50 лет составляет $k = 2$, для полипропиленовой трубы и аналогичного периода времени $k = 4$. Результаты расчета представлены на графиках (рис. 3).

Анализируя данный график, можно сделать вывод, что изменение деформации трубы с пе-

Рис. 3. Графики зависимости деформаций труб, % от глубины прокладки (над поверхностью трубы H , м) для разных материалов с учетом значения их коэффициента ползучести

риодом времени будет в значительной мере зависеть от характеристик материала трубопровода (сочетания показателей упругости и вязкости), что в значительной степени проявляется при воздействии значительных (близких к предельным) нагрузок. Таким образом, показатель начальной кольцевой жесткости трубы не может являться достаточным условием для обоснованного выбора типа и материала трубопровода.

Выводы

Трубопроводы систем водоснабжения и водоотведения должны соответствовать требованиям по надежности и безопасности в течение всего жизненного цикла. Расчет предельных состояний трубопровода с учетом максимального количества значимых факторов является одним из условий обеспечения данных требований и позволяет подобрать трубу с оптимальными параметрами в рамках решаемой задачи.

На сегодняшний день ни одна из методик, рекомендуемых для расчета, не учитывает в полной мере факторы, влияющие на наступление предельных состояний трубопровода, более того, каждая из рассмотренных выше методик учиты-

вает свой ряд параметров, что не позволяет обоснованно сравнивать полученные результаты.

Для обоснованного выбора трубы, оптимально соответствующей конкретным условиям работы, необходима разработка единой методики расчета прочностных характеристик, которая сможет более полно учитывать статические и динамические нагрузки, методы ведения строительно-монтажных работ, изменение свойств трубы в течение всего периода эксплуатации (включая изменения под воздействием окружающей и транспортируемой среды).

Библиографический список

1. Клейн Г. К. Расчет труб, уложенных в земле. М.: Госстройиздат, 1957. 196 с.
2. Писаренко Г. С., Мажаровский Н. С. Уравнения и краевые задачи теории пластичности и ползучести. Киев: Наукова думка, 1981. 496 с.
3. Верхотуров В. П., Разумова М. В. Оценка рисков аварий на тоннельных коллекторах вследствие износа их конструктивных элементов // Инженерные системы и городское хозяйство: материалы 1-й Региональной науч.-практ. конф. — магистерские слушания. СПб.: СПбГАСУ, 2019. С. 39–44.

References

1. Kleyn G. K. *Raschet trub, ulozhennykh v zemle* [Calculation of pipes laid in the ground]. Moscow, Gosstroyizdat Publ., 1957, 196 p.
2. Pisarenko G. S., Mozharovskiy N. S. *Urvneniya i kraevye zadachi teorii plastichnosti i polzuchesti* [Equations and boundary value problems of plasticity and creep theory]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1981, 496 p.
3. Verkhoturov V. P., Razumova M. V. *Otsenka riskov avariyn na tunnel'nykh kollektorakh vsledstvie iznosa ikh konstruktivnykh ehlementov* [Risk assessment of accidents at tunnel collectors due to wear of their structural elements]. *Trudy 1-y Regional'noy nauch.-prakt. konf. «Inzhenernye sistemy i gorodskoe khozyaystvo»* [Proc. of the 1-st Regional sci.-pract. conf. "Engineering systems and urban economy"]. St. Petersburg, SPbGASU Publ., 2019, pp. 39–44.