

Интернет-журнал «Транспортные сооружения» <https://t-s.today>

Russian journal of transport engineering

2020, №1, Том 7 / 2020, No 1, Vol 7 <https://t-s.today/issue-1-2020.html>

URL статьи: <https://t-s.today/PDF/04SATS120.pdf>

DOI: 10.15862/04SATS120 (<http://dx.doi.org/10.15862/04SATS120>)

Ссылка для цитирования этой статьи:

Дмитриев А.В. Исследование частоты свободных колебаний для трубопроводов с различными физико-механическими свойствами материала // Интернет-журнал «Транспортные сооружения», 2020 №1, <https://t-s.today/PDF/04SATS120.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ. DOI: 10.15862/04SATS120

For citation:

Dmitriev A.V. (2020). Investigation of the frequency of free vibrations for pipelines with different physical and mechanical properties of the material. *Russian journal of transport engineering*, [online] 1(7). Available at: <https://t-s.today/PDF/04SATS120.pdf> (in Russian). DOI: 10.15862/04SATS120

УДК 624.074.433

ГРНТИ 73.39.31

Дмитриев Андрей Викторович

ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет», Тюмень, Россия

Аспирант

E-mail: dandid@mail.ru

РИНЦ: http://elibrary.ru/author_profile.asp?id=1034764

Исследование частоты свободных колебаний для трубопроводов с различными физико-механическими свойствами материала

Аннотация. В данной работе ставится вопрос о новом подходе к динамическому расчёту тонкостенных подземных трубопроводов большого диаметра. Этот подход основан на применении полубезмоментной теории оболочек среднего изгиба Власова-Новожилова, в которой пренебрегается моментами M_1 , изгибающими цилиндрическую оболочку в продольном направлении, так как они значительно меньше моментов M_2 , которые изгибают её в поперечном направлении. Разрешающим уравнением такого подхода является однородное дифференциальное уравнение 4-го порядка, для решения которого используется по два граничных условия на каждом конце. Полученное уравнение учитывает параметр продольной силы, величину внутреннего давления, коэффициента упругого отпора грунта, параметр тонкостенности, а также присоединённую массу грунта.

На основании данных, полученных по выведенным формулам, определяются частотные характеристики тонкостенных подземных трубопроводов большого диаметра с различными физико-механическими свойствами в зависимости от длины элемента, а также грунтовых условий. Установлено, что минимальные частоты по оболочечной форме колебаний в различных грунтовых условиях реализуются только для стальных труб, а для полиэтиленовых и стеклопластиковых труб в зависимости от коэффициента упругого отпора грунта могут реализовываться как по стержневой, так и по оболочечной форме.

Одновременно с этим, используя динамический критерий устойчивости, выведено выражения позволяющее, определить внешнее критическое давление, учитывающее длину трубопровода и количество полуолн поперечного сечения, при котором трубопровод

переходит в аварийное состояние. На основании данного выражения получена формула по определению критической глубины заложения для тонкостенных трубопроводов.

Ключевые слова: трубопровод; полиэтилен; стеклопластик; частоты свободных колебаний; внешнее давление грунта; коэффициент упругого отпора грунта; параметр тонкостенности; длина трубопровода

Трассы подземных трубопроводов большого диаметра получили широкое распространение при строительстве и эксплуатации инженерных сетей городского коммунального хозяйства. Данные трубопроводы с целью обеспечения долговечности и коррозионной стойкости устраиваются не только из стальных и железобетонных изделий, но с применением полиэтиленовых, а также стеклопластиковых труб. При эксплуатации данные сооружения подвергаются различного рода динамическим воздействиям. Такое воздействие может быть вызвано вибрациями от насосного оборудования, сейсмическими колебаниями, ну или как вариант, вибрациями, вызванными ударами молота сваебойного копра, при строительстве какого-либо объекта вблизи линейного сооружения.

Одной из задач обеспечения надёжности подземных инженерных систем является исключение резонансных явлений, поэтому определение частот собственных и вынужденных колебаний, зависящих от физико-механических свойств материала, является одним из наиболее важных параметров наряду с внешними нагрузками, давлением грунта на стенку трубопровода, внутренним давлением, продольной сжимающей силой. Работы по определению динамических характеристик трубопроводов отражены в трудах [1–15].

Для периода 50–80-е годы XX века трубопроводы при строительстве сооружений применялись диаметром менее 1000 мм с параметром тонкостенности ($h/R = 1/5 - 1/15$). Такие трубопроводы рассчитываются по методикам, основанным на стержневой теории [8–15], без учёта деформацию поперечного сечения трубы при $m = 1$, см. рис. 1. Данные методики не пригодны для расчёта трубопроводов с диаметром более 1000 мм, которые сложно охарактеризовать как стержень, следовательно, возникает необходимость в разработке новых приёмов и методов для расчёта тонкостенных подземных труб большого диаметра с учётом внутреннего рабочего давления, упругого отпора грунта, а так же внешней нагрузки.

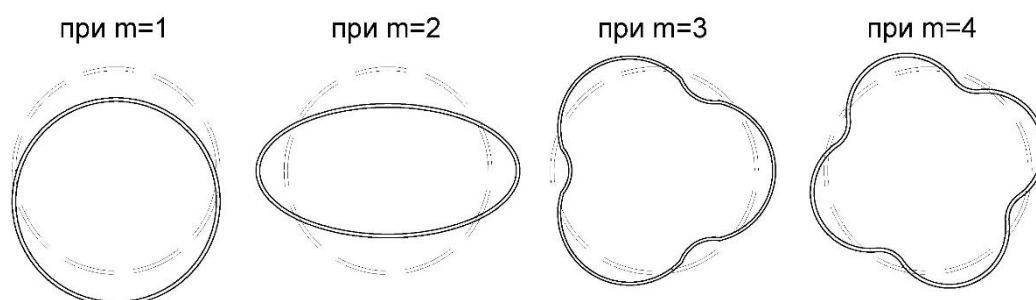


Рисунок 1. Образование полуволн в поперечном сечении (разработано авторами)

В данной статье, которая является продолжением [1], ставится вопрос о новом подходе к динамическому расчёту тонкостенных подземных трубопроводов большого диаметра. Этот подход основан на применении полубезмоментной теории оболочек среднего изгиба Власова-Новожилова [16; 17], в которой пренебрегается моментами M_1 , изгибающими цилиндрическую оболочку в продольном направлении, так как они значительно меньше моментов M_2 , изгибающие её в поперечном направлении, с учётом влияния внутреннего рабочего давления на стенку, которое впервые было учтено в работах В.Е. Бреславского [18], С.Н. Кукуджанова [19].

В работе [1] получено выражение по определению частот собственных колебаний подземного трубопровода подверженного действию внутреннего рабочего давления и продольной силы с учётом реакции упругого отпора грунта в виде:

$$\omega_{mn}^2 = \frac{\lambda_n^4 + m^4 (m^2 - 1)(m^2 - 1 + p^* - 2q_{sp}^*) + \kappa^* m^4 - \lambda_n^4 m^4 P / n^2}{\rho^* R h (\lambda^2 h_v + m^2 + m^4)}; \quad (1)$$

где $\omega_{m,n}$ – частота свободных колебаний (Гц); n – количество полуволн в продольном направлении; m – количество полуволн в окружном направлении (см. рис. 1);

$$\lambda_n = \frac{n\pi R}{L\sqrt{h_v}}, p^* = p_0 \frac{R}{Eh \cdot h_v^2}, \rho^* = \rho_0 \frac{R}{Eh \cdot h_v^2}, \kappa^* = \frac{R^2 \kappa}{Eh \cdot h_v^2}, q_{sp}^* = \frac{\gamma HR}{Eh \cdot h_v^2}, P = \frac{F}{F_s};$$

где L – длина участка трубопровода; H – глубина заложения трубопровода; R радиус срединной поверхности; γ – объемный вес грунта; h – толщина стенки трубопровода; E – модуль упругости материала трубы; ρ – плотность материала трубы; p_0 – внутреннее давление в трубе; κ – коэффициент упругого отпора грунта; F – продольная сжимающая сила;

$h_v = \frac{h}{R\sqrt{12(1-\nu^2)}}$ – параметр относительной толщины оболочки; $F_s = \frac{\pi^2 EI}{L^2}$ – Эйлера сила; $I = \pi R^3 h$ – момент инерции сечения.

Полученное выражение применимо для любых изотропных однородных материалов труб с различными геометрическими характеристиками, так как зависит от модуля упругости E и коэффициент Пуассона ν материала оболочки. К такому же выводу приходят авторы в работах [3; 4].

Используя данное выражение, проанализируем частоты свободных колебаний для безнапорных труб (внутреннее рабочее давление отсутствует), выполненных из стали, полиэтилена ПЭ-100 и стеклопластика различного диаметра и толщины стенки, для различных коэффициентов упругого отпора грунта. Глубина заложения принята 2 метра, продольная сжимающая сила принята $P = 0$, длина участка соответствует восьми и десяти диаметрам трубопровода. Полученные данные занесены в таблицу 1 и 2 соответственно, а также представлены в графическом виде на рис. 2 и рис. 3.

Таблица 1

Частоты свободных колебаний для безнапорных трубопроводов различных материалов при длине трубопровода $L = 8R$

h/R	$p_0 = 0$ МПа, $P = 0$, $L/R = 1/8$											
	$\kappa = 1 \cdot 10^6$, Н/м ³			$\kappa = 2 \cdot 10^6$, Н/м ³			$\kappa = 3 \cdot 10^6$, Н/м ³			$\kappa = 4 \cdot 10^6$, Н/м ³		
	ω_{11}	ω_{21}	ω_{31}	ω_{11}	ω_{21}	ω_{31}	ω_{11}	ω_{21}	ω_{31}	ω_{11}	ω_{21}	ω_{31}
Сталь 1220×25,0 (диаметр, мм × толщина стенки, мм)												
1/25	139,25	63,73	126,47	139,47	64,52	126,92	139,68	65,29	127,37	139,89	66,06	127,81
Сталь 1420×22,1 (диаметр, мм × толщина стенки, мм)												
1/32	119,74	49,27	83,54	120,02	50,41	84,31	120,30	51,53	85,07	120,57	52,62	85,83
Полиэтилен ПЭ-100 1200×23,5 (диаметр, мм × толщина стенки, мм)												
1/25	33,41	26,62	24,58	40,41	39,90	40,04	46,36	49,75	51,02	51,63	57,95	60,02
Полиэтилен ПЭ-100 1400×21,4 (диаметр, мм × толщина стенки, мм)												
1/32	31,75	27,60	21,85	39,69	41,61	39,68	46,28	51,97	51,69	52,05	60,59	61,40
Стеклопластик 1200×23,5 (диаметр, мм × толщина стенки, мм)												
1/25	39,64	23,97	32,63	43,01	32,41	40,04	46,13	39,07	46,28	49,06	44,75	51,77
Стеклопластик 1400×21,4 (диаметр, мм × толщина стенки, мм)												
1/32	35,44	22,95	24,39	39,51	32,39	34,44	43,21	39,64	42,16	46,11	45,76	48,67

Разработано авторами

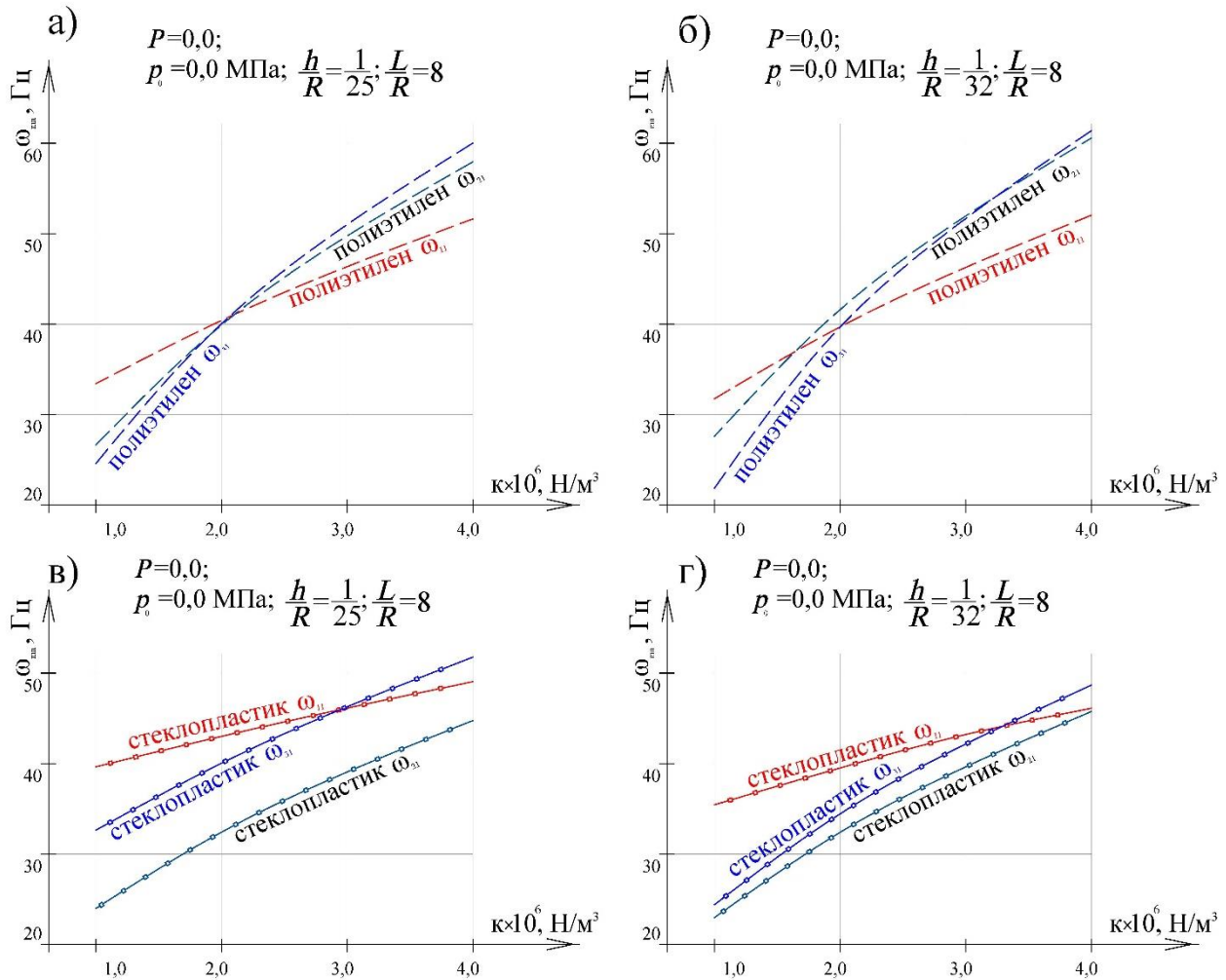


Рисунок 2. Зависимость частот свободных колебаний от коэффициента упругого отпора грунта (κ), для различных материалов труб, при $L = 8R$ (разработано авторами)

Таблица 2

Частоты свободных колебаний для безнапорных трубопроводов различных материалов при длине трубопровода $L = 10R$

h/R	$p_0 = 0 \text{ МПа}, P = 0, L/R = 1/10$											
	$\kappa = 1 \cdot 10^6, \text{ Н/м}^3$			$\kappa = 2 \cdot 10^6, \text{ Н/м}^3$			$\kappa = 3 \cdot 10^6, \text{ Н/м}^3$			$\kappa = 4 \cdot 10^6, \text{ Н/м}^3$		
	ω_{11}	ω_{21}	ω_{31}	ω_{11}	ω_{21}	ω_{31}	ω_{11}	ω_{21}	ω_{31}	ω_{11}	ω_{21}	ω_{31}
Сталь 1220×25,0 (диаметр, мм × толщина стенки, мм)												
1/25	90,49	53,38	125,42	90,83	54,32	125,88	91,16	55,24	126,33	91,49	56,15	126,78
Сталь 1420×22,1 (диаметр, мм × толщина стенки, мм)												
1/32	77,89	39,13	82,35	78,34	40,56	83,13	78,77	41,95	83,91	79,20	43,29	84,67
Полиэтилен ПЭ-100 1200×23,5 (диаметр, мм × толщина стенки, мм)												
1/25	27,97	25,94	24,41	36,22	39,47	39,95	42,93	49,43	50,95	48,71	57,70	59,97
Полиэтилен ПЭ-100 1400×21,4 (диаметр, мм × толщина стенки, мм)												
1/32	27,71	27,13	21,71	36,73	41,33	39,62	43,95	51,77	51,65	50,14	60,44	61,37
Стеклопластик 1200×23,5 (диаметр, мм × толщина стенки, мм)												
1/25	28,79	22,23	32,36	33,39	31,17	39,82	37,43	38,07	46,10	41,06	43,88	51,61
Стеклопластик 1400×21,4 (диаметр, мм × толщина стенки, мм)												
1/32	26,71	21,63	24,11	32,04	31,49	34,26	36,61	38,94	42,01	40,67	45,17	48,55

Разработано авторами

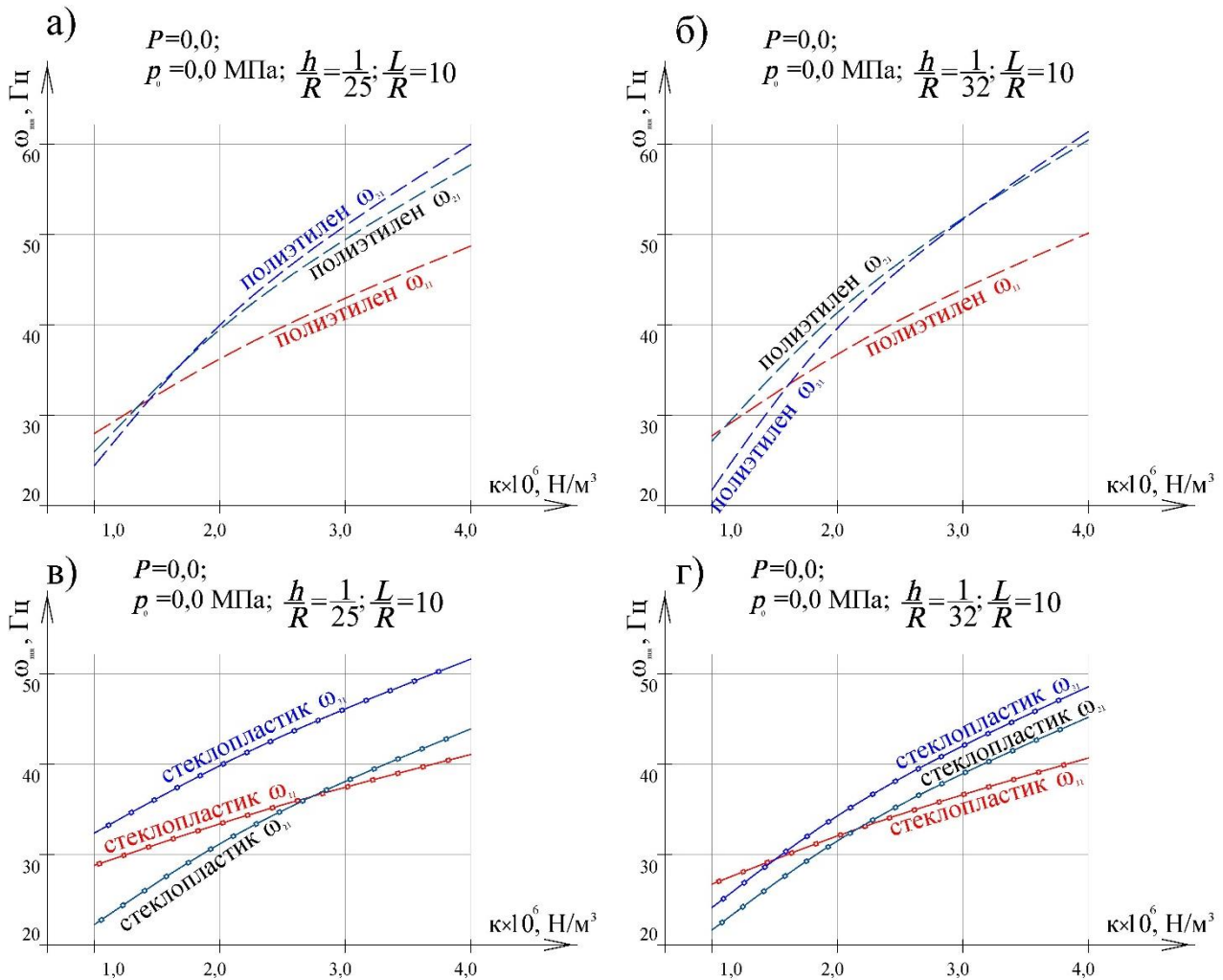


Рисунок 3. Зависимость частот свободных колебаний от коэффициента упругого отпора грунта (κ), для различных материалов труб, при $L = 10R$ (разработано авторами)

Анализ данных, занесённых в таблицу 1 и 2, показывает:

а) минимальные частоты для стального трубопровода при любых значений коэффициента упругого отпора грунта и длины участка реализуются при $m = 2$ (оболочечная форма колебаний, см. рис. 1).

б) для труб из полиэтилена длиной $L = 8R$, уложенных в грунт с коэффициентом упругого отпора $\kappa \leq 2,0 \times 10^6 \text{ H/m}^3$, минимум обеспечивается при $m = 3$ (три полуволны оболочечной формы колебаний см. рис. 1), а для значениях коэффициента упругого отпора грунта более указанного, минимум частот соответствует $m = 1$ (стержневая форма колебаний), что видно на рис. 2а,б. При увеличении длины участка до $L = 10R$ наблюдается смещение границы между оболочечной ($m = 3$) и стержневой ($m = 1$) формой в сторону уменьшения коэффициента до $\kappa \leq 1,4 \dots 1,6 \times 10^6 \text{ H/m}^3$ в зависимости от параметра тонкостенности см. рис. 3а,б.

в) минимальная частота трубопроводов длиной $L = 8R$, а так же длиной $L = 10R$ из стеклопластика соответствует оболочечным формам колебаний (при $m = 2$) в диапазоне значений коэффициента упругого отпора грунта от $1,0 \times 10^6 \text{ H/m}^3$ до $4,0 \times 10^6 \text{ H/m}^3$, при более высоком значении данного коэффициента минимум соответствует для $m = 1$ (стержневая теория), см. рис. 2в,г, рис. 3в,г.

Далее, используя динамический критерий устойчивости, для которого частота свободных колебаний обращается в ноль, из выражения (1), учитывая, что знаменатель не равен нулю получим:

$$\lambda_n^4 + m^4(m^2 - 1)(m^2 - 1 + p^* - 2q_{cp}^*) + \kappa^* m^4 - \lambda_n^4 m^4 P / n^2 = 0, \quad (2)$$

поделив каждый член выражения (2) на $m^4(m^2 - 1)$ выразим величину:

$$2q_{cp}^* = m^2 - 1 + p^* + \frac{\kappa^*}{(m^2 - 1)} + \frac{\lambda_n^4}{m^4(m^2 - 1)} - \frac{\lambda_n^4 P}{n^2(m^2 - 1)} \quad (3)$$

и подставляя $\lambda_n = \frac{n\pi R}{L\sqrt{h_v}}$, $p^* = p_0 \frac{R}{Eh \cdot h_v^2}$, $\kappa^* = \frac{R^2 \kappa}{Eh \cdot h_v^2}$, $q_{cp}^* = \frac{\gamma HR}{Eh \cdot h_v^2}$, $n = 1$, имеем:

$$2\gamma H \frac{R}{Ehh_v^2} = (m^2 - 1) + p_0 \frac{R}{Ehh_v^2} + \frac{\kappa R}{(m^2 - 1) Ehh_v^2} + \frac{\frac{n^4 \pi^4 R^4}{L^4 h_v^2}}{m^4(m^2 - 1)} - \frac{\frac{n^4 \pi^4 R^4}{L^4 h_v^2} P}{(m^2 - 1)}, \quad (4)$$

произведя элементарные математические преобразования, получаем формулу для определения критического внешнего давления $P_{кр} - 2\gamma H$ на трубопровод:

$$P_{кр} = \frac{(m^2 - 1)D}{R^3} + \frac{\kappa R}{m^2 - 1} + p_0 + \frac{\pi^4 R^3 Eh}{L^4(m^2 - 1)} \left(\frac{1}{m^4} - P \right); \quad (5)$$

где $D = \frac{Eh^3}{12(1 - \nu^2)}$ – цилиндрическая жёсткость трубы; p_0 – внутреннее рабочее давление; m, κ, R, L, E, P – то же, что и в выражении (1).

При нулевом внутреннем рабочем давлении, для бесконечно длинных участков трубопровода ($L \rightarrow \infty$) выражение (5) приобретает формулу критического внешнего давления, полученную Е.Л. Николаи [20] для кольца в упругой среде, оказывающей сопротивление перемещениям стенки:

$$P_{кр} = \frac{(m^2 - 1)D}{R^3} + \frac{\kappa R}{m^2 - 1}; \quad (6)$$

«Если исключается возможность продольных деформаций трубы, то в знаменатель первого члена формулы (4) должен быть введен множитель $(1 - \nu^2)$, где ν – коэффициент Пуассона материала трубы. Формула (6) для $m = 2$ при $\kappa = 0$... переходит в известную формулу М. Леви» [21]:

$$P_{кр} = \frac{3D}{R^3}; \quad (7)$$

Данные факты позволяют сделать вывод о правильности подхода к определению критического внешнего давления.

Полученное выражение (5) является наиболее полным для определения критического внешнего давления на стенки трубопровода, уложенного в земле. Данное выражение учитывает не только геометрические характеристики сечения и коэффициент упругого отпора грунта, но и величину внутреннего рабочего давления, а также длину рассматриваемого участка с учётом параметра продольной силы.

При помощи (5) произведём оценку критического давления на трубопроводы, выполненные из различных материалов, с одинаковым параметром тонкостенности для различных волновых чисел $m = 2 \dots 8$ в окружном направлении. Данные занесены в таблицу 3 и представлены на рис. 4.

Таблица 3

Зависимость величины внешнего критического давления на стенку трубопровода от волновых чисел m , выполненного из различных материалов, уложенного в грунте

Материал трубы	h/R	$P_{кр}, \text{КН/М}^2$						
		$\kappa = 0,5 \cdot 10^7, \text{Н/М}^3$						
		$m = 2$	$m = 3$	$m = 4$	$m = 5$	$m = 6$	$m = 7$	$m = 8$
Сталь	1/25	6622	10897	19704	31300	45542	62400	81864
	1/32	4188	5091	8787	13806	20015	27383	35899
Полиэтилен ПЭ100	1/25	1019	412	269	236	248	286	340
	1/32	1177	455	266	198	177	179	195
Стеклопластик	1/25	1075	513	457	535	684	884	1126
	1/32	1209	503	355	341	384	463	568

Разработано авторами

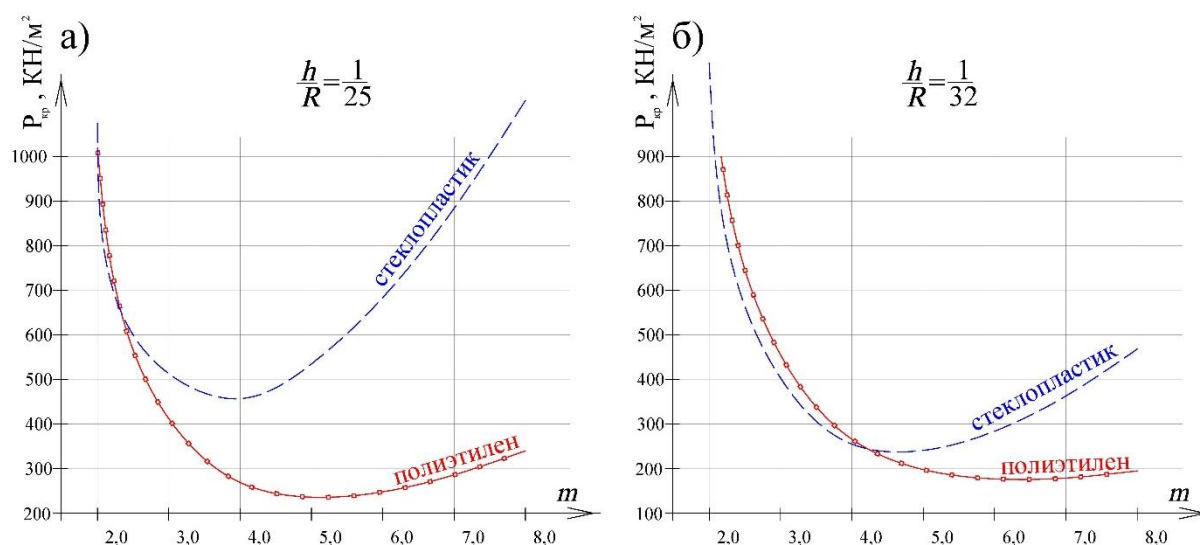


Рисунок 4. Зависимость величины внешнего критического давления на стенку трубопровода от волновых чисел m , выполненного из полиэтилена ПЭ100 и стеклопластика, уложенного в грунт (разработано авторами)

Анализ данных таблицы 3 и рис. 4 показывает, что минимальные значения внешнего критического давления преобладают для труб из полиэтилена ПЭ100, так например, для труб с параметром тонкостенности $h/R = 1/25$ минимум при волновом числе $m = 5$ равен $P_{кр} = 236 \text{ КН/М}^2$, для более тонких труб $h/R = 1/32$ минимум соответствует волновому числу $m = 6$ и равен $P_{кр} = 177 \text{ КН/М}^2$. Анализ данных для стального трубопровода проделан автором в работе [22] и не представляет особого интереса в отличии от полиэтиленового трубопровода.

Учитывая, что критическое внешнее давление принято $P_{кр} = 2\gamma H$ определим максимальную глубину заложения H , при которой трубопровод переходит в аварийное состояние:

$$H_{кр} = \frac{P_{кр}}{2\gamma}; \quad (8)$$

Для трубопроводов, выполненных из полиэтилена ПЭ-100, диаметром 1200 мм с толщиной стенки 23,5 мм, в грунтах с объёмным весом $\gamma = 19,5$ кН/м³ предельная глубина $H_{кр} = 6,05$ м. Предельная глубина заложения для трубопроводов диаметром 1400 мм с толщиной стенки 21,5 мм равна $H_{кр} = 4,54$ м. Данные результаты получены только с учётом воздействия грунта засыпки и не учитывают внешнюю нагрузку, при включении которой необходимо откорректировать значение критической глубины в меньшую сторону.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дмитриев А.В., Соколов В.Г., Березнёв А.В. Исследование параметра длины и продольной сжимающей силы по определению частот свободных колебаний подземных тонкостенных газопроводов большого диаметра. Транспортные сооружения, 2019 №3. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://t-s.today/PDF/40SAT319.pdf>.
2. Соколов В.Г., Разов И.О. Свободные колебания тонкостенных газопроводов большого диаметра при полуподземной прокладке. Вестник гражданских инженеров. 2016. №6 (59). С. 114–120. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://vestnik.spbgasu.ru/magazine-issue/no-6-59-dekabr-2016-vestnik-grazhdanskih-inzhenerov>.
3. Разов И.О., Соколов В.Г., Ашихмин О.В., Краев А.Н., Бартоломей Л.А. Исследование частот свободных колебаний полиэтиленовых магистральных газопроводов, уложенных на грунт. Промышленное и гражданское строительство. 2017 №10. С. 45–50. [Электронный ресурс] – Режим доступа: https://elibrary.ru/download/elibrary_30548531_82381722.pdf.
4. Березнёв А.В. Частоты и формы собственных колебаний криволинейных участков стальных и полиэтиленовых трубопроводов с протекающей жидкостью. Вестник гражданских инженеров. 2005. №3 (4). С. 20–24. [Электронный ресурс] – Режим доступа: https://elibrary.ru/download/elibrary_12870859_59578225.pdf.
5. Ишемгузин И.Е., Габбасов Т.И., Шаммазов И.А., Ситдииков М.Р., Кочекоев М.А. Демпфирование параметрических колебаний трубопровода. Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». 2011. №3. С. 84–93. [Электронный ресурс] – Режим доступа: http://ogbus.ru/authors/IshemguzhinIE/IshemguzhinIE_2.pdf.
6. Ильин В.П. Применение полубезмоментной теории к задачам расчета тонкостенных труб [Текст]: Проблемы расчета пространственных конструкций. Труды МИСИ. М., 1980. № 1. С. 45–55.
7. Ильин В.П., Халецкая О.Б. О применении полубезмоментной теории к определению частот свободных колебаний круговой цилиндрической оболочки [Текст]: Исследования по расчету строительных конструкций. Труды ЛИСИ. 1974. №89. С. 49–60.
8. Лалин В.В., Денисов Г.В. Динамическое поведение бесконечных стержневых элементов на упруго-вязком основании под действием точечного источника

- возмущения. Научный вестник Воронежского ГАСУ. Строительство и архитектура. 2013. № 2(30). С. 105–113.
9. Денисов Г.В., Лалин В.В. Предложения по расчету участков заглубленных магистральных трубопроводов с конструктивным включением на сейсмическое воздействие. Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородов сырья. 2013. №3. С. 20–23.
 10. Fyrileiv, Olav. (2010). Effect of Internal Pressure on Free Spanning Pipelines. 10.1115/IPC2010-31622.
 11. Massa, Andre & Galgoul, Nelson & Junior, Nestor & Fernandes, Antonio & Coelho, Fabio & Neto, Severino. (2009). The Influence of Internal Pressure on Pipeline Natural Frequency. 10.1115/OMAE2009-79666.
 12. Georgiadou, Sofia & Loukogeorgaki, Eva & Angelides, Demos. (2014). Dynamic analysis of a free span offshore pipeline. Proceedings of the International Offshore and Polar Engineering Conference. 80–87.
 13. Eugenio Ruocco, An exponential matrix method for the buckling analysis of underground pipelines subjected to landslide loads [Электронный ресурс]: Eugenio Ruocco etc. al. Procedia Earth and Planetary Science (2016) 25–34.
 14. Xü, W.-H. & Xie, W.-D. & Gao, X.-F. & Ma, Y.-X. (2018). Study on vortex-induced vibrations (VIV) of free spanning pipeline considering pipe-soil interaction boundary conditions. Chuan Bo Li Xue / Journal of Ship Mechanics. 22. 446–453. 10.3969/j.issn.1007-7294.2018.04.007.
 15. George P. Kourctzis, Sloan Analysis of buried pipelines subjected to ground surface settlement and heave [Электронный ресурс]: George P. Kourctzis, Dimitrios K. Karamitros, and Scott W. Sloan Analysis of buried pipelines subjected to ground surface settlement and heave, Published at www.nrcrcsearchprcss.com/cgj on 5 December 2014.
 16. Власов В.З. Общая теория оболочек и ее приложения в технике / В.З. Власов – М.: Гостехиздат. – 1949. – 784 с.
 17. Новожилов В.В. Теория тонких оболочек. [Текст]: Новожилов В.В. Теория тонких оболочек. Л.: Судпромгиз, 1962. 430 с.
 18. Бреславский В.Е. Собственные колебания круговой цилиндрической оболочки, находящейся под действием гидростатического давления / В.Е. Бреславский. – М.: Известия АН СССР. – 1956. – №12. – С. 117–120.
 19. Кукуджанов С.Н. О влиянии нормального давления на частоты собственных колебаний цилиндрических оболочек // Механика твердого тела, 1968. – №3. – С. 14–20.
 20. Николаи Е.Л. Труды по механике. Серия: Библиотека русской науки. М., Технико-теоретическая литература, 1955. – 583 с.
 21. Клейн Г.К. Расчет подземных трубопроводов. [Текст]: Клейн Г.К. Расчет подземных трубопроводов. М.: Госстройиздат, 1957. 147 с.
 22. Дмитриев А.В. Зависимость частот свободных колебаний тонкостенного подземного газопровода большого диаметра от глубины заложения / Электронный научный журнал «Инженерный вестник дона». 2019. №6. [Электронный ресурс] – Режим доступа: http://www.ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_94_6y19_Dmitriev.pdf_6054e8b529.pdf (дата обращения: 18.02.2020).

Dmitriev Andrey Viktorovich
Tyumen industrial university, Tyumen, Russia
E-mail: dandid@mail.ru

Investigation of the frequency of free vibrations for pipelines with different physical and mechanical properties of the material

Abstract. This paper raises the question of a new approach to the dynamic calculation of thin-walled underground pipelines of large diameter, which is based on the application of the Vlasov-Novozhilov half-time theory of medium-bend shells, which ignores the M_1 moments that bend the cylindrical shell in the longitudinal direction, since they are much smaller than the M_2 moments that bend it in the transverse direction. The resolving equation for this approach is a homogeneous 4th-order differential equation that uses two boundary conditions at each end to solve it. The resulting equation takes into account the parameter of the longitudinal force, the value of the internal pressure, the coefficient of elastic resistance of the soil, the parameter of thinness, as well as the attached mass of the soil.

Based on the data obtained from the derived formulas, the frequency characteristics of thin-walled underground pipelines of large diameter with different physical and mechanical properties are determined depending on the length of the element, as well as ground conditions. It is established that the minimum frequencies for the shell form of vibrations in various ground conditions are realized only for steel pipes, and for polyethylene and fiberglass pipes, depending on the coefficient of elastic resistance of the soil, they can be realized both in the rod and shell form.

At the same time, using a dynamic stability criterion, derived expressions to determine the critical external pressure, taking into account the pipe length and the number of half waves in the cross section in which there is a constructive denial of the pipeline. Based on this expression, a formula for determining the critical depth of laying for thin-walled pipelines is obtained.

Keywords: pipeline; polyethylene; fiberglass; frequency of free vibrations; external pressure of the soil; the coefficient of elastic resistance of the soil; the parameter of thinness; the length of the pipeline

REFERENCES

1. Dmitriev A.V., Sokolov V.G., Bereznev A.V. (2019). A study of the length parameter and the longitudinal compressive forces in the determination of frequencies of free vibrations of thin-walled underground pipelines of large diameter. *Russian journal of transport engineering*, [online] 3(6). Available at: <https://t-s.today/PDF/40SAT319.pdf> (in Russian). DOI: 10.15862/40SAT319.
2. Sokolov V.G., Razov I.O. (2016). Free vibrations of large-diameter thin-walled gas pipelines during semi-underground laying. *Bulletin of Civil Engineers*, [online] 6(59), pp. 114–120. Available at: <http://vestnik.spbgasu.ru/magazine-issue/no-6-59-dekabr-2016-vestnik-grazhdanskih-inzhenerov> (in Russian).
3. Razov I.O., Sokolov V.G., Ashikhmin O.V., Kraev A.N., Bartolomey L.A. (2017). Study of the frequencies of free vibrations of polyethylene gas pipelines laid on the ground. *Industrial and civil engineering*, [online] 10, pp. 45–50. Available at: https://elibrary.ru/download/elibrary_30548531_82381722.pdf (in Russian).

4. Bereznyov A.V. (2005). Frequencies and modes of natural vibrations of curved sections of steel and polyethylene pipelines with a flowing fluid. *Bulletin of Civil Engineers*, [online] 3(4), pp. 20–24. Available at: https://elibrary.ru/download/elibrary_12870859_59578225.pdf (in Russian).
5. Ishemguzhin I.E., Gabbasov T.I., Shammazov I.A., Sitdikov M.R., Kochekov M.A. (2011). Damping of parametric oscillations of the pipeline. *Electronic scientific journal "Oil and Gas Business"*, [online] 3, pp. 84–93. Available at: http://ogbus.ru/authors/IshemguzhinIE/IshemguzhinIE_2.pdf (in Russian).
6. Il'in V.P. (1980). Primenenie polubezmomentnoy teorii k zadacham rascheta tonkostennykh trub: Problemy rascheta prostranstvennykh konstruktsiy. [*Application of the semi-momentless theory to the problems of calculating thin-walled pipes: Problems of calculating spatial structures.*] Moscow: Proceedings of the Moscow Civil Engineering Institute, pp. 45–55.
7. Il'in V.P., Khaletskaya O.B. (1974). O primenении polubezmomentnoy teorii k opredeleniyu chastot svobodnykh kolebaniy krugovoy tsilindricheskoy obolochki: Issledovaniya po raschetu stroitel'nykh konstruktsiy. [*On the application of a semi-momentless theory to determining the frequencies of free vibrations of a circular cylindrical shell: Studies on the calculation of building structures.*] Leningrad: Proceedings of the Leningrad Civil Engineering Institute, pp. 49–60.
8. Lalin V.V., Denisov G.V. (2013). Dynamic behavior of infinite rod elements on an elastic-viscous base under the action of a point source of perturbation. *Scientific Bulletin of Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering. Construction and architecture*, 2(30), pp. 105–113 (in Russian).
9. Denisov G.V., Lalin V.V. (2013). Proposals for the calculation of sections of buried trunk pipelines with structural inclusion on seismic impact. *Transport and storage of petroleum products and hydrocarbons*, 3, pp. 20–23 (in Russian).
10. Fyrileiv Olav. (2010). *Effect of Internal Pressure on Free Spanning Pipelines*. 10.1115/IPC2010-31622.
11. Massa Andre, Galgoul Nelson, Junior Nestor, Fernandes Antonio, Coelho Fabio, Neto Severino (2009). *The Influence of Internal Pressure on Pipeline Natural Frequency*. 10.1115/OMAE2009-79666.
12. Georgiadou Sofia, Loukogeorgaki Eva, Angelides Demos (2014). Dynamic analysis of a free span offshore pipeline. *Proceedings of the International Offshore and Polar Engineering Conference*, pp. 80–87.
13. Eugenio Ruoccoa and etc. (2016). An exponential matrix method for the buckling analysis of underground pipelines subjected to landslide loads. *Procedia Earth and Planetary Science*, pp. 25–34.
14. Xü W.-H., Xie W.-D., Gao X.-F., Ma Y.-X. (2018). Study on vortex-induced vibrations (VIV) of free spanning pipeline considering pipe-soil interaction boundary conditions. Chuan Bo Li Xue. *Journal of Ship Mechanics*, 22, pp. 446–453. DOI: 10.3969/j.issn.1007-7294.2018.04.007.
15. George P. Kourtzis, Dimitrios K. Karamitros, Scott W. Sloan (2014). Sloan Analysis of buried pipelines subjected to ground surface settlement and heave. Analysis of buried pipelines subjected to ground surface settlement and heave. [online] Available at: www.nrcrcsearchprcss.com/cgj.

16. Vlasov V.Z. (1949). *Obshchaya teoriya obolochek i ee prilozheniya v tekhnike.* [General theory of shells and its applications in technology.] Moscow: Gostekhizdat, p. 784.
17. Novozhilov V.V. (1962). *Teoriya tonkikh obolochek.* [Theory of Thin Shells.] Leningrad: Sudpromgiz, p. 430.
18. Breslavskiy V.E. (1956). *Sobstvennyye kolebaniya krugovoy tsilindricheskoy obolochki, nakhodyashcheysya pod deystviem gidrostaticheskogo davleniya.* [Natural vibrations of a circular cylindrical shell under the influence of hydrostatic pressure.] Moscow: Proceedings of the USSR Academy of Sciences, 12, pp. 117–120.
19. Kukudzhanov S.N. (1968). On the effect of normal pressure on the natural frequencies of cylindrical shells. *Solid Mechanics*, 3, pp. 14–20 (in Russian).
20. Nikolai E.L. (1955). *Trudy po mekhanike. Seriya: Biblioteka russkoy nauki.* [Transactions in mechanics. Series: Library of Russian Science.] Moscow: Technical and theoretical literature, p. 583.
21. Kleyn G.K. (1957). *Raschet podzemnykh truboprovodov.* [Calculation of underground pipelines.] Moscow: Gosstroyizdat, p. 147.
22. Dmitriev A.V. (2019). Dependence of the frequencies of free oscillations of a thin-walled underground gas pipeline of large diameter on the depth of laying. *Electronic scientific journal "Engineering Bulletin of the Don"*, [online] 6. Available at: http://www.ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_94_6y19_Dmitriev.pdf_6054e8b529.pdf (in Russian) [Accessed 18.02.2020].