

УДК 674.8

ПРИМЕНЕНИЕ АРБОЛИТА В КАЧЕСТВЕ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННО-БАЛЛАСТНОГО МАТЕРИАЛА ПОДВОДНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ ЦЕНТРАЛИЗОВАННОГО ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ

А. Н. Чемоданов¹, Ю. А. Горинов¹, Р. Г. Сафин², С. Я. Алибеков¹

¹Поволжский государственный технологический университет,
Российская Федерация, 424000, Йошкар-Ола, пл. Ленина, 3
E-mail: gelios62@mail.ru

²Казанский национальный исследовательский технологический университет,
Российская Федерация, 420015, Казань, ул. К.Маркса, 68
E-mail: safin_rg@kstu.ru

Обосновано применение арболита для тепловой изоляции и балластировки подводных теплопроводов. Выполнены расчёты устойчивости трубопровода и передачи теплоты через стенку трубопроводной конструкции, включающей стальную трубу в защитном полиэтиленовом кожухе с заполненным межтрубным пространством арболитом в качестве теплоизоляционно-балластного материала.

Ключевые слова: теплоизоляционно-балластное арболитовое покрытие трубопроводов; подводная прокладка теплопроводов; расчёт устойчивости; расчёт передачи теплоты через стенку.

Введение. Развитие современной техники невозможно без замены применяемых традиционных «чистых» материалов на композиционные материалы. В отличие от традиционных материалов, композиты обладают более широким спектром физико-механических свойств. Это позволяет применять материал с характеристиками, максимально отвечающими требованиям эксплуатации и экологической безопасности. К таким материалам относится арболит, который при установленном компонентном составе, помимо традиционного применения в виде строительного материала для малоэтажного строительства, может быть использован в качестве теплоизоляционно-балластного материала покрытия теплопроводов централизованного теплоснабжения при сооружении переходов через водные преграды. Потребность сооружения таких переходов возникает при наличии единой с одним источником тепла системы централизованного теплоснабжения населённого пункта, расположенного на противоположных берегах водоёма, либо необходимости объеди-

нения тепловых сетей, подключённых к различным источникам тепла в одну общую систему, с целью оптимизации и повышения надёжности теплоснабжения. Трубопроводная конструкция с арболитом, используемым в качестве заполнителя межтрубного пространства между стальной рабочей трубой и защитной полиэтиленовой оболочкой, отвечает требованиям по балластирующей способности, теплопроводности, прочности, надёжности, технологичности изготовления, ремонтпригодности и экологической безопасности.

Целью работы является обоснование применения разработанного композиционного арболитового материала, имеющего плотность 1160 кг/м^3 и коэффициент теплопроводности $0,12 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$, в качестве теплоизоляционно-балластного материала подводной конструкции трубопроводов централизованного теплоснабжения [1].

Решаемые задачи: 1) проверка условия устойчивости данной подводной трубопроводной конструкции; 2) определение потерь тепла через стенку.

Под устойчивым состоянием подводного трубопровода понимается такое состояние, при котором он будет находиться в покое в заранее заданном (проектом) положении при самой неблагоприятной комбинации нагрузок, стремящихся вывести его из этого положения [2].

В общем случае такими нагрузками являются: выталкивающая архимедова сила, горизонтальная и вертикальная составляющие гидродинамического воздействия потока. Для компенсации этих сил и воздействий используется собственная масса трубопроводной конструкции и заполняющего его перекачиваемого продукта, а также балластные устройства. Описание

способов балластировки изложено в [3].

Самое неблагоприятное сочетание нагрузок имеет место, когда трубопровод не заглублён, т.е. находится на дне водоёма в траншее без засыпки грунтом. При обтекании потоком жидкости подводные трубопроводы подвергаются силовому воздействию потока и действию подъёмной силы Архимеда. При положении, когда трубопровод уложен в подводную траншею, засыпан грунтом и заполнен транспортируемым продуктом, число нагрузок, снижающих устойчивость трубопровода, значительно уменьшается

Для выполнения расчётов введём необходимые обозначения (табл. 1):

Таблица 1

Условные обозначения, принятые в расчётах устойчивости

Символ	Название	Единица измерения
ρ	плотность воды водоёма	кг/м ³
ρ_1	плотность теплоносителя	кг/м ³
ρ_2	плотность материала стальной трубы	кг/м ³
ρ_3	плотность теплоизоляционно-балластного арболитового покрытия	кг/м ³
ρ_4	плотность материала защитной полиэтиленовой оболочки	кг/м ³
D_1	внутренний диаметр стальной трубы	м
D_2	наружный диаметр стальной трубы – внутренний диаметр теплоизоляционно-балластного арболитового покрытия	м
D_3	наружный диаметр теплоизоляционно-балластного арболитового покрытия – внутренний диаметр защитной полиэтиленовой оболочки	м
D_4	наружный диаметр защитной полиэтиленовой оболочки	м
$m\vec{g}$	сила тяжести трубопроводной конструкции с теплоносителем и балластом	Н
\vec{F}_A	выталкивающая сила Архимеда	Н
\vec{N}	реакция опоры	Н
\vec{F}_{TP}	сила трения покоя	Н
\vec{P}_X	сила лобового сопротивления потока со скоростью \vec{U}	Н
\vec{P}_Y	подъёмная сила потока со скоростью \vec{U}	Н
f_{TP}	коэффициент трения поверхности трубы о грунт	-
s	расстояние от трубопровода до дна траншеи	м
$U_{нов}$	скорость потока на поверхности водоёма	м/с
$U_{дон}$	скорость потока у дна водоёма	м/с
$k_{y.c.}$	коэффициент запаса устойчивости на сдвиг	-
$\varphi_{ГР}$	угол внутреннего трения грунта	градус
n_1	коэффициент перегрузки по весу трубопровода и конструкции	-
n_2	коэффициент перегрузки выталкивающей силы Архимеда	-

Расчётная схема нагрузок и воздействий приведена на рис. 1.

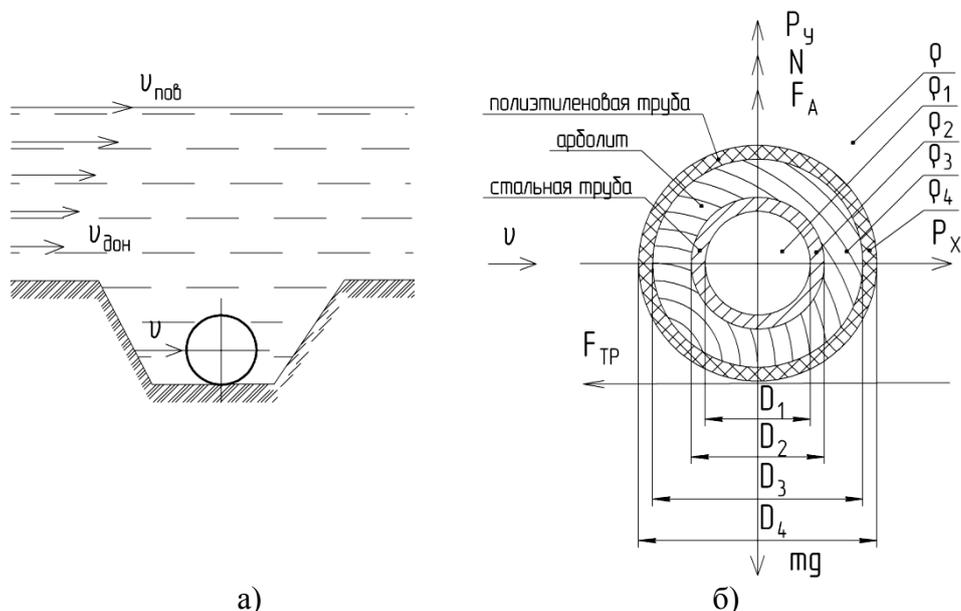


Рис. 1. Расчётная схема нагрузок и воздействий на подводный трубопровод в траншее: а – общая схема размещения трубопровода на дне водоёма; б – схема сил, действующих на трубопровод

В общем виде уравнение условия равновесия для трубопроводной конструкции, помещённой в водоём:

$$m\vec{g} + \vec{F}_A + \vec{N} + \vec{F}_{TP} + \vec{P}_X + \vec{P}_Y = 0. \quad (1)$$

Проекция сил на ось X:

$$\vec{F}_{TP} - \vec{P}_X = 0. \quad (2)$$

Проекция сил на ось Y:

$$-m\vec{g} + \vec{F}_A + \vec{N} + \vec{P}_Y = 0. \quad (3)$$

Силы, действующие на трубопровод:

1) вес трубопроводной конструкции складывается из веса транспортируемого теплоносителя, стальной трубы, теплоизоляционно-балластного покрытия и полиэтиленовой трубы:

$$n_1 mg = \frac{1}{4} \pi [\rho_1 D_1^2 + \rho_2 (D_2^2 - D_1^2) + \rho_3 (D_3^2 - D_2^2) + \rho_4 (D_4^2 - D_3^2)] g; \quad (4)$$

2) выталкивающая сила Архимеда определяется по формуле:

$$F_A = \frac{1}{4} n_2 \rho g \pi D_4^2; \quad (5)$$

3) сила трения трубопровода о грунт определяется по формуле:

$$F_{TP} = f_{TP} N; \quad (6)$$

4) составляющие гидродинамического воздействия потока определяются по формулам, в которых коэффициенты C_X, C_Y характеризуют следующие виды сопротивлений: сопротивление трения, обусловленное касательными напряжениями, приложенными к поверхности обтекаемого трубопровода; сопротивление давления, обусловленное нормальными напряжениями, приложенными к поверхности обтекаемого трубопровода:

$$P_X = \frac{1}{2} C_X \rho v^2 D_4, \quad (7)$$

$$P_Y = \frac{1}{2} C_Y \rho v^2 D_4.$$

Из уравнения (2) следует:

$$F_{TP} = P_X. \quad (8)$$

Из уравнения (3) следует:

$$N = mg - F_A - P_Y. \quad (9)$$

Таким образом, устойчивость трубопроводной конструкции в пространстве определяется из условия:

$$P_X \cdot (mg - F_A - P_V) f_{TP}. \quad (10)$$

В общем случае условие устойчивости единицы длины трубопровода с учётом коэффициента запаса устойчивости $k_{y.c.}$ имеет вид:

$$P_X \cdot k_{y.c.} \leq (mg - F_A - P_V) f_{TP}. \quad (11)$$

Левая половина уравнения представляет собой горизонтальную сдвигающую силу, а правая половина уравнения – силу трения трубы о грунт.

Авторы [2,4–7], обобщая результаты выполненных ими опытов и исследований, рекомендуют принимать:

- коэффициент лобового сопротивления $C_X = 1,2$;

- в практических расчётах при касании трубопровода дна ($s/D=0$) коэффициент подъёмной силы $C_V = 0,6$;

- коэффициент перегрузки по весу трубопроводной конструкции для двухтрубной конструкции с заполнением межтрубного пространства цементно-песчаным раствором n_1 при диаметре трубы $D \leq 600$ мм равен 1,00, для трубы $D > 600$ мм равен 0,95;

- коэффициент перегрузки выталкивающей силы Архимеда при диаметре трубы $D \leq 700$ мм для пресной воды равен 1,00, для трубы $D \geq 700$ мм равен 1,05;

- донную скорость потока (0,4 – 0,6) м/с от поверхностной скорости;

- коэффициент устойчивости $k_{y.c.}$ равен 1,10 при диаметре трубы $D \leq 600$ мм и 1,15 при $D > 600$ мм;

- наибольшее значение коэффициента трения поверхности трубы о грунт f_{TP} равно $tg \varphi_{GP}$;

- наименьшее значение угла внутреннего трения грунта φ_{GP} примем для глины, имеющей наименьшее значение по табл. 2.

Таблица 2

Расчётные характеристики уплотнённых влажных грунтов

Грунт	φ_{GP} , градусы
Гравелистый песок	36...40
Песок средней крупности	33...38
Мелкий песок	30...36
Супеси	21...25
Суглинки	17...22
Глины	15...18
Торф	16...30

- среднюю скорость потока 5 км/ч.

Используя приведённые выше расчётные формулы и рекомендации по определению составляющих, выполнены расчёты устойчивости подводных трубопроводов из труб различного типоразмера.

Данные о стальных электросварных прямошовных трубах, изготовленных по [ГОСТ 10704-91], применяемых для прокладки тепловых сетей, приведены в табл. 3.

Таблица 3

Трубы стальные электросварные прямошовные

Ду, мм	Дн, мм	δ , мм	Масса, кг/п.м
50	57	3,0	4,00
70	76	4,0	7,10
80	89	4,0	8,38
100	108	5,0	12,70
125	133	5,0	15,78
150	159	5,0	18,99
200	219	6,0	31,52
250	273	6,5	42,64
300	325	7,0	54,90
350	377	7,0	63,87
400	426	7,0	72,33
450	480	7,0	81,65
500	530	7,0	90,28
600	630	8,0	122,72
700	720	8,0	140,50
800	820	9,0	180,00
900	920	9,0	202,20
1000	1020	10,0	249,10
1200	1220	10,0	298,00

Таблица 4

Трубы напорные из полиэтилена

Дн, мм	δ, мм	Масса, кг/п.м.
140	3,0	0,62
160	3,0	0,71
180	3,0	0,80
200	3,0	0,89
250	4,0	1,48
280	5,0	2,07
355	6,0	3,15
450	7,0	4,66
500	8,0	5,92
560	8,8	7,29
600	9,4	8,35
630	9,5	8,86
710	11,1	11,66
800	12,5	14,80
900	14,0	18,65
1100	17,5	28,48
1425	23,5	49,53
1425	23,5	49,53
1600	30,2	71,39

Данные о полиэтиленовых трубах, изготовленных согласно [ГОСТ 18599-2001], применяемых в качестве наружной защитной оболочки, приведены в табл. 4.

Толщина нанесённого на стальную трубу теплоизоляционно-балластного арболитового покрытия определяется как разность между внутренним диаметром полиэтиленовой трубы и наружным диаметром стальной трубы:

$$\delta = \frac{D_3 - D_2}{2}. \quad (12)$$

С учётом этого, принимая плотность теплоизоляционно-балластного материала $\rho = 1160 \text{ кг/м}^3$, определяем массу арболитового покрытия.

Массу транспортируемого теплоносителя для каждого типоразмера стальной трубы принимаем согласно [8].

Результаты расчётов сведены в табл. 5.

Таблица 5

Расчёт массы теплоизоляционно-балластного покрытия и транспортируемого теплоносителя

Условный диаметр стальной трубы, мм	Теплоизоляционно-балластное покрытие		Масса теплоносителя кг/п.м
	толщина δ, мм	масса, кг/п.м	
50	38,5	14,13	2,29
70	39,0	17,19	4,07
80	42,5	21,32	5,67
100	43,0	24,72	8,33
125	54,5	39,00	12,86
150	55,5	45,84	18,62
200	62,0	67,24	35,61
250	81,5	110,84	55,75
300	79,5	124,24	79,38
350	82,7	147,24	107,47
400	77,6	152,37	137,82
450	65,5	140,80	175,63
500	78,9	189,01	214,72
600	72,5	203,30	303,70
700	76,0	242,76	397,95
800	122,5	454,76	516,31
900	229,0	1017,87	651,49
1000	179,0	841,21	800,78
1200	159,8	888,63	1149,32

По формулам (4) и (5) определяем вес трубопроводной конструкции и величину выталкивающей силы Архимеда с учётом коэффициентов перегрузки. Результаты расчётов сведены в табл. 6.

Таким образом, для всего принятого ряда типоразмера труб условие отрицательной плавучести соблюдается.

Используя формулы (7), (8), (9), выполним расчёт устойчивости (табл. 7).

Таблица 6

Расчёт веса трубопроводной конструкции и силы Архимеда с учётом коэффициентов перегрузки

Условный диаметр стальной трубы, мм	Вес трубопроводной конструкции с коэфф. n_1 , Н/п.м	Сила Архимеда с коэфф. n_2 , Н/п.м
50	206,42	150,9367
70	285,12	197,1418
80	354,79	249,5075
100	308,03	308,034
125	678,06	481,3031
150	838,95	603,7466
200	1349,10	970,4996
250	2098,28	1559,422
300	2594,18	1925,213
350	3196,75	2414,987
400	3638,18	2772,306
450	3992,02	3056,467
500	4712,57	3881,998
600	6006,60	5174,971
700	7454,30	6549,573
800	10992,85	9783,93
900	17903,63	16419,42
1000	18085,68	16419,42
1200	22435,17	20699,88

Таблица 7

Расчёт устойчивости подводного трубопровода

Условный диаметр стальной трубы, мм	Сила лобового сопротивления потока R_x , Н/п.м	Подъёмная сила потока R_y , Н/п.м	Горизонтальная сдвигающая сила, Н/п.м	Сила трения трубы о грунт, Н/п.м
50	25,41	12,71	27,95	13,90
70	29,04	14,52	31,94	23,87
80	32,67	16,34	35,94	28,91
100	36,30	18,15	39,93	42,67
125	45,38	22,69	49,91	56,57
150	50,82	25,41	55,90	68,18
200	64,43	32,22	70,88	112,58
250	81,68	40,84	89,84	161,86
300	90,75	45,38	99,83	202,67
350	101,64	50,82	111,80	237,56
400	108,90	54,45	119,79	263,71
450	114,35	57,17	125,78	285,47
500	128,87	64,43	141,75	249,00
600	145,20	72,60	159,72	246,68
700	163,35	81,68	187,85	267,49
800	199,65	99,83	229,60	360,45
900	258,64	129,32	297,43	440,34
1000	258,64	129,32	297,43	499,51
1200	290,40	145,20	333,96	516,78

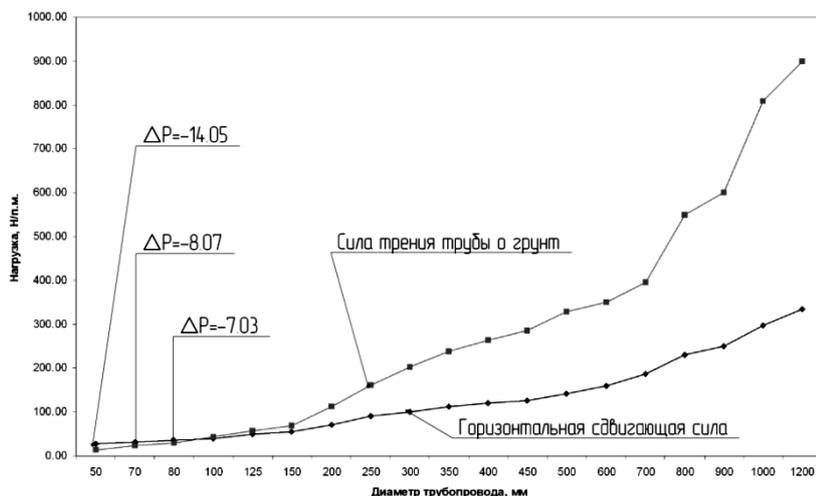


Рис. 2. Устойчивость трубопроводной конструкции в зависимости от действия сил: ΔP – превышение силы трения трубы о грунт над горизонтальной сдвигающей силой

Графическое изображение с помощью программы Microsoft Office Excel устойчивости трубопроводной конструкции приведено на рис. 2.

Из выполненного расчёта следует, что условие устойчивости (11) соблюдается для всего ряда типоразмера стальных труб за исключением первых трёх позиций.

Исследуемая трубопроводная конструкция представляет собой цилиндриче-

скую многослойную трубу. Особенность теплопроводности через цилиндрическую стенку, как и через другие криволинейные ограждения, заключается в том, что при прохождении тепла поверхности входа и выхода теплового потока не равны. При распространении тепла изнутри трубы поверхность входа теплового потока меньше, чем поверхность его выхода [9–11]. Расчёты выполним, используя схему рис. 3.

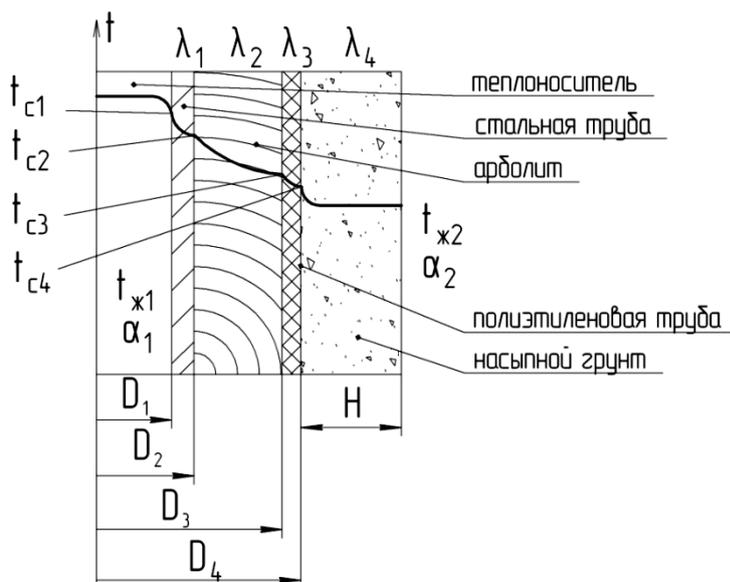


Рис. 3. Схема передачи тепла теплопроводностью через многослойную цилиндрическую стенку

В формулах приняты следующие обозначения, представленные в табл.8.

Таблица 8

Условные обозначения расчёта передачи тепла

Символ	Название	Единица измерения
$t_{ж1}$	температура теплоносителя в трубопроводе	К
$t_{ж2}$	температура окружающей среды (грунтовой засыпки траншеи)	К
α_1	коэффициент теплоотдачи со стороны теплоносителя к стенке трубы	Вт/м ² К
α_2	коэффициент теплоотдачи со стороны грунтовой засыпки траншеи	Вт/м ² К
$t_{c1}, t_{c2}, t_{c3}, t_{c4}$	температура на внутренней и наружной поверхности: стальной трубы, тепловой изоляции, защитной полиэтиленовой оболочки	К
$\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4$	коэффициент теплопроводности стальной трубы, тепловой изоляции, защитной полиэтиленовой оболочки, засыпного грунта	Вт/(м К)
d_1	внутренний диаметр стальной трубы	м
d_2	наружный диаметр стальной трубы – внутренний диаметр тепловой изоляции	м
d_3	наружный диаметр тепловой изоляции – внутренний диаметр защитной полиэтиленовой оболочки	м
d_4	наружный диаметр защитной полиэтиленовой оболочки	м
H	толщина засыпки траншеи	м
q	плотность теплового потока	Вт/м ²
k	коэффициент теплопередачи	Вт/(м К)
λ	коэффициент теплопроводности воды	Вт/(м К)
ν	коэффициент кинематической вязкости	м ² /сек
a	коэффициент температуропроводности	м ² /ч
w	скорость теплоносителя в трубопроводе	м/сек
l	характерный линейный размер поверхности теплообмена	м

Засыпной грунт траншеи является водонасыщенным, следовательно, его температуру можно принять равной температуре воды водоёма.

При условии установившегося (стационарного) теплового состояния плотность теплового потока q через отдельные элементы конструкции равна [9–11]:

$$q = \alpha_1 \pi D_1 (t_{ж1} - t_{c1}); q = \frac{\pi(t_{c1} - t_{c2})}{\frac{1}{2\lambda_1} \ln \frac{D_2}{D_1}};$$

$$q = \frac{\pi(t_{c2} - t_{c3})}{\frac{1}{2\lambda_2} \ln \frac{D_3}{D_2}}; q = \frac{\pi(t_{c3} - t_{c4})}{\frac{1}{2\lambda_3} \ln \frac{D_4}{D_3}}; \quad (13)$$

$$q = \alpha_2 \pi D_4 (t_{c4} - t_{ж2}).$$

Из этих уравнений определяем частные температурные напоры по формулам:

$$t_{ж1} - t_{c1} = \frac{q}{\pi \alpha_1 D_1}; t_{c1} - t_{c2} = \frac{q}{\pi 2\lambda_1} \ln \frac{D_2}{D_1}$$

$$t_{c2} - t_{c3} = \frac{q}{\pi 2\lambda_2} \ln \frac{D_3}{D_2}; \quad (14)$$

$$t_{c3} - t_{c4} = \frac{q}{\pi 2\lambda_3} \ln \frac{D_4}{D_3}; t_{c4} - t_{ж2} = \frac{q}{\pi \alpha_2 D_4}.$$

Сумма этих частных температурных напоров составляет полный температурный напор через конструкцию, который определяется по формуле:

$$t_{ж1} - t_{ж2} = \frac{q}{\pi} \left(\frac{1}{\alpha_1 D_1} + \frac{1}{2\lambda_1} \ln \frac{D_2}{D_1} + \frac{1}{2\lambda_2} \ln \frac{D_3}{D_2} + \frac{1}{2\lambda_3} \ln \frac{D_4}{D_3} + \frac{1}{\alpha_2 D_4} \right). \quad (15)$$

Следовательно, плотность теплового потока равна:

$$q = \frac{\pi(t_{ж1} - t_{ж2})}{\frac{1}{\alpha_1 D_1} + \frac{1}{2\lambda_1} \ln \frac{D_2}{D_1} + \frac{1}{2\lambda_2} \ln \frac{D_3}{D_2} + \frac{1}{2\lambda_3} \ln \frac{D_4}{D_3} + \frac{1}{\alpha_2 D_4}}. \quad (16)$$

Коэффициент теплопередачи для трёхслойной стенки определяется по формуле:

$$k = \frac{1}{R} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1 D_1} + \frac{1}{2\lambda_1} \ln \frac{D_2}{D_1} + \frac{1}{2\lambda_2} \ln \frac{D_3}{D_2} + \frac{1}{2\lambda_3} \ln \frac{D_4}{D_3} + \frac{1}{\alpha_2 D_4}}. \quad (17)$$

В общем случае для многослойной стенки трубы термическое сопротивление определяется по формуле:

$$R = \frac{1}{k} = \frac{1}{\alpha_1 D_1} + \sum_{i=1}^n \frac{1}{2\lambda_i} \ln \frac{D_{i+1}}{D_i} + \frac{1}{\alpha_2 D_4}. \quad (18)$$

В общем случае коэффициент теплопередачи будет равен:

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1 D_1} + \sum_{i=1}^n \frac{1}{2\lambda_i} \ln \frac{D_{i+1}}{D_i} + \frac{1}{\alpha_2 D_4}}. \quad (19)$$

Чтобы определить температуры стенок $t_{c1}, t_{c2}, t_{c3}, t_{c4}$, значение q_i из уравнения (16) подставляем в уравнение (14). Решая их, получаем:

$$\begin{aligned} t_{c1} &= t_{ж1} - \frac{q}{\pi \alpha_1 D_1}, \\ t_{c2} &= t_{ж1} - \frac{q}{\pi} \left(\frac{1}{\alpha_1 D_1} + \frac{1}{2\lambda_1} \ln \frac{D_2}{D_1} \right), \\ t_{c3} &= t_{ж1} - \frac{q}{\pi} \left(\frac{1}{\alpha_1 D_1} + \frac{1}{2\lambda_1} \ln \frac{D_2}{D_1} + \frac{1}{2\lambda_2} \ln \frac{D_3}{D_2} \right), \\ t_{c3} &= t_{ж1} - \frac{q}{\pi} \left(\frac{1}{\alpha_1 D_1} + \frac{1}{2\lambda_1} \ln \frac{D_2}{D_1} + \right. \\ &\quad \left. + \frac{1}{2\lambda_2} \ln \frac{D_3}{D_2} + \frac{1}{2\lambda_3} \ln \frac{D_4}{D_3} \right), \\ t_{c4} &= t_{ж1} - \frac{q}{\pi} \left(\frac{1}{\alpha_1 D_1} + \frac{1}{2\lambda_1} \ln \frac{D_2}{D_1} + \right. \\ &\quad \left. + \frac{1}{2\lambda_2} \ln \frac{D_3}{D_2} + \frac{1}{2\lambda_3} \ln \frac{D_4}{D_3} \right). \end{aligned} \quad (20)$$

Согласно системе уравнений (14), внутри каждого слоя трубопроводной конструкции температура изменяется по логарифмическому закону. Для многослойной стенки температурная кривая представляет собой ломаную кривую.

Определение коэффициента теплоотдачи со стороны теплоносителя к стенке трубы α_1 и коэффициента теплоотдачи со стороны грунтовой засыпки траншеи α_2 является задачей, решение которой возможно только экспериментальным способом. Распространять результаты экспериментов можно только на подобные между собой явления. Закон теплового подобия определяет условия, при которых геометрически и гидромеханически подобные системы подобны и в тепловом отношении. Критерием теплового подобия являются [10]:

1) критерий Рейнольдса, характеризующий отношение сил инерции и сил вязкости в потоке жидкости:

$$Re = \frac{wl}{\nu}, \quad (21)$$

2) критерий Пекле, характеризующий отношение конвективных и кондуктивных потоков тепла при конвективном теплообмене:

$$Pe = \frac{wl}{a}, \quad (22)$$

3) критерий Нуссельта, характеризующий интенсивность теплообмена на границе «жидкость – стенка»:

$$Nu = \frac{al}{\lambda}, \quad (23)$$

4) критерий Прандтля, характеризующий физические свойства жидкости:

$$Pr = \frac{Pe}{Re} = \frac{\nu}{a}. \quad (24)$$

Критериальное уравнение для определения теплоотдачи капельной или упругой жидкости при турбулентном режиме течения ($Re > 10^4$) имеет вид [10]:

$$Nu = 0,023 Re^{0,8} Pr^{0,4}. \quad (25)$$

Коэффициент теплоотдачи от теплоносителя к стенке трубы α_1 определяется по формуле:

$$\alpha_1 = 0,023 \frac{\lambda}{d} Re^{0,8} Pr^{0,4}. \quad (26)$$

Для расчёта внешнего коэффициента теплоотдачи α_2 подводного трубопровода применяем формулу Форхгеймера-Власова [12]:

$$\alpha_2 \approx \frac{2\lambda_4}{d_4 \ln \left[\frac{2H}{d_4} + \sqrt{\left(\frac{2H}{d_4} \right)^2 - 1} \right]}. \quad (27)$$

При $H/D_4 \gg 1$

$$\alpha_2 \approx \frac{2\lambda_4}{D_4 \ln \frac{4H}{D_4}}. \quad (28)$$

Авторами [9] опытным путём при оценочных расчётах установлено, что $\alpha_1 \gg \alpha_2$, и α_2 для влажной глины можно принять – 1,5, для мокрого песка – 3,5.

По таблицам физических свойств воды при максимальной температуре теплоносителя в подающем трубопроводе 150°C находим $\lambda = 68,4 \cdot 10^{-2} \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$, $\nu = 2,03 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{сек}$, $a = 6,22 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{ч}$.

Критерий Прандтля рассчитываем по формуле (24):

$$Pr = \frac{2,03 \cdot 10^{-7} \cdot 3600}{6,22 \cdot 10^{-4}} = 1,18. \quad (29)$$

Результаты расчёта критерия Рейнольдса по формуле (21) и критерия Нуссельта по формуле (25) для каждого типоразмера стальной трубы сведены в табл. 9.

Таблица 9

**Значение критериев Рейнольдса и Нуссельта
в зависимости от условного диаметра стальной трубы**

Условный диаметр стальной трубы D_v , мм	Критерий Рейнольдса Re	Критерий Нуссельта Nu
50	246305	505
70	344828	662
80	394089	736
100	492611	880
125	615764	1052
150	738916	1217
200	985222	1532
250	1231527	1832
300	1477833	2119
350	1724138	2397
400	1970443	2668
450	2216749	2931
500	2463054	3189
600	2955665	3690
700	3448276	4174
800	3940887	4645
900	4433498	5104
1000	4926108	5552
1200	5911330	6424

Таблица 10

Значение коэффициента теплопередачи α_1 в зависимости от условного диаметра стальной трубы

Условный диаметр стальной трубы D_y , мм	Коэффициент теплопередачи α_1 , Вт/м ² К
50	6914
70	6464
80	6294
100	6019
125	5756
150	5550
200	5240
250	5011
300	4832
350	4685
400	4562
450	4456
500	4363
600	4206
700	4079
800	3971
900	3879
1000	3798
1200	3662

Таблица 11

Плотность теплового потока трубопроводной конструкции

Условный диаметр стальной трубы D_y , мм	Плотность теплового потока Вт/м
50	52,41
70	61,43
80	67,14
100	75,59
125	83,96
150	94,16
200	114,80
250	124,59
300	142,58
350	157,22
400	176,78
450	206,28
500	209,01
600	248,54
700	272,78
800	245,79
900	272,00
1000	240,20
1200	294,19

Коэффициент теплопередачи α_1 определяется по формуле (26), результаты расчётов сведены в табл.10.

Плотность теплового потока для трубопроводных конструкций принятых типоразмеров рассчитана по формуле (16) с использованием программы Microsoft Office Excel и сведена в табл.11.

Таким образом, полученная в результате расчёта плотность теплового потока ниже нормируемых значений.

Выводы.

1. Физико-механические свойства разработанного композиционного материала арболита (плотность 1160 кг/м³, коэффициент теплопроводности 0,12 Вт/(м·К)), позволяют его использование в качестве

теплоизоляционно-балластного материала подводных конструкций трубопроводов централизованного теплоснабжения [1].

2. Плотность теплового потока через стенку разработанной трубопроводной конструкции при расположении в воде ниже нормируемых значений.

3. Условие устойчивости данной подводной трубопроводной конструкции выполняется для трубопроводов, имеющих условный диаметр стальной трубы $D_y \geq 100$ мм.

4. При необходимости прокладки подводных трубопроводов $D_y = 50, 70, 80$ мм требуется дополнительная балластировка пригрузами весом более 14,05Н/п.м, 8,07Н/п.м, 7,03Н/п.м. соответственно.

Список литературы

1. Пат. 122746 Российская Федерация, МПК⁸ F16 L59/02. Труба централизованного теплоснабжения для сооружения переходов через водные преграды / Горин Ю.А., Чемоданов А.Н., Алибеков С.Я.; заявитель и патентообладатель: Феде-

ральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Марийский государственный технический университет». – № 2012122952/28; заявлено 04.06.2012; опубл. 10.12.2012, Бюл. № 34.

2. *Бородавкин, П.П.* Подводные трубопроводы / П.П. Бородавкин, В.Л. Березин, О.Б. Шадрин. – М.: Недра, 1979. – 415 с.
3. *Соколов, Е.Я.* Теплофикация и тепловые сети / В. Я. Соколов; 6-е изд., перераб. – М.: Издательство МЭИ, 1999. – 472 с.:ил.
4. *Бородавкин, П.П.* Подземные магистральные трубопроводы (проектирование и строительство) / П.П. Бородавкин. – М.: Недра, 1982. – 384 с.
5. Основания, фундаменты и подземные сооружения / М.И. Горбунов-Посадов, В.А. Ильичев, В.И. Крутов и др.; Под общ.ред. Е.А.Сорчана и Ю.Г.Трофименкова. – М.: Стройиздат, 1985. – 480 с., ил.
6. Строительные конструкции нефтегазовых объектов / Ф.М. Мустафин, Ю.Л.И. Быков, В.Н. Мохов и др. – СПб.: ООО «Недра», 2008. – 780 с.
7. *Тугунов, П.И.* Типовые расчеты при проектировании и эксплуатации нефтебаз и нефтепроводов / П.И. Тугунов, В.Ф. Новоселов, А.А. Коршак, А.М.Шаммазов; Изд. 2-е, переработанное. – Уфа: ООО «ДизайнПолиграфСервис», 2002. – 658 с.
8. *Николаев, А.А.* Справочник проектировщика. Проектирование тепловых сетей / А.А. Николаев. – М.: Стройиздат, 1965. – 359 с.
9. *Михеев, М. А.* Основы теплопередачи / М. А. Михеев, И. М. Михеева; Изд. 2-е, стереотип. М.: «Энергия», 1977. – 344 с.
10. *Швец, И.Т.* Общая теплотехника / И.Т. Швец. – М.: Машгиз, 1961. – 463 с.
11. *Коротких, А.Г.* Теплопроводность материалов / А.Г.Коротких; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011. – 97 с.

Статья поступила в редакция 09.10.13.

Ссылка на статью: Чемоданов А. Н., Горинов Ю. А., Сафин Р. Г., Алибеков С. Я. Применение арболита в качестве теплоизоляционно-балластного материала подводных трубопроводов централизованного теплоснабжения // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Сер.: Лес. Экология. Природопользование. – 2014. – № 3 (23). – С. 43-56.

Информация об авторах

ЧЕМОДАНОВ Александр Николаевич – кандидат технических наук, профессор, заведующий кафедрой деревообрабатывающих производств, Поволжский государственный технологический университет. Область научных интересов – технология и оборудование лесопромышленных складов, оборудование деревообрабатывающих производств, сушильные камеры периодического действия. Автор более 120 публикаций.

E-mail: ChemodanovAN@volgatech.net

ГОРИНОВ Юрий Аркадьевич – аспирант кафедры деревообрабатывающих производств, Поволжский государственный технологический университет. Область научных интересов – древесиноведение, технология и оборудование деревопереработки, трубопроводный транспорт энергоносителей. Автор 17 публикаций.

E-mail: gelios62@mail.ru

САФИН Рушан Гареевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой переработки древесных материалов, Казанский национальный исследовательский технологический университет (КНИТУ). Область научных интересов – исследование тепло-массообменных процессов; разработка энергосберегающих безотходных технологий и оборудования. Автор более 300 публикаций.

E-mail: safin_rg@kstu.ru

АЛИБЕКОВ Сергей Якубович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой машиностроения и материаловедения, Поволжский государственный технологический университет. Область научных интересов – материаловедение и технологии современных и перспективных материалов. Автор более 200 публикаций.

E-mail: mim@volgatech.net

USAGE OF WOOD CONCRETE AS THERMAL INSULATION-BALLAST MATERIAL OF UNDERWATER PIPELINES OF THE CENTRALIZED HEATING SYSTEM

A. N. Chemodanov¹, Yu. A. Gorinov¹, R. G. Safin², S. Ya. Alibekov¹

¹Volga State University of Technology,
3, Lenin Sq., Yoshkar-Ola, 424000, Russian Federation
E-mail: gelios62@mail.ru

²Kazan National Research Technological University
68, K-Marks St., Kazan, 420015, Russian Federation
E-mail: safin_rg@kstu.ru

Key words: thermal insulation and ballast pipeline coating; underwater construction of heat pipes; stability calculation; calculation of heat passage through the wall.

ABSTRACT

New technique development is impossible without composite materials. By means of the optimum selection of the components, it is possible to obtain the best physical and mechanical properties of the materials. Wood concrete belongs to such materials. It can be used both for buildings construction and for underwater construction of heat pipes. Pipeline consists of a steel pipe in the plastic protective cover and tube space, filled with wood concrete. The goal of the research is to ground the usage of a new wood concrete composite with 1160 kg/m³ density and with the coefficient of heat conduction of 0.12 W/mK as a cover of underwater pipelines of the centralized heat supply. With this end in view, a test of stability was carried out and the waste of heat through the wall was defined. Results. The calculations showed the following: underwater pipe construction has a negative buoyancy and stable position in the soil, waste of heat is less than the normalized value. Based on these results, it was concluded that the elaborated wood concrete composite has the necessary properties to be used as thermal insulation and ballasting of underwater pipelines.

REFERENCES

1. Gorinov Yu.A., Chemodanov A.N., Alibekov S.Ya. Truba tsentralizovannogo teplosnabzheniya dlya sooruzheniya perekhodov cherez vodnye pregrady [A Pipe of Centralized Heat Supply to Construct Water Crossing]. Patent RF, no 122746 2012.
2. Borodavkin P.P., Berezin V.L., Shadrin O.B. *Podvodnye truboprovody* [Subwater Pipelines]. Moscow: Nedra, 1979. 415 p.
3. Sokolov E.Ya. *Teplofikatsiya i teplovye seti: 6-e izd., pererab.* [District Heating and Heat Network: 6d edition, improved]. Moscow: MEI publishing house, 1999. 472 p.:illustrated.
4. Borodavkin P.P. *Podzemnye magistralnye truboprovody (proektirovanie i stroitelstvo)* [Subwater Main Pipelines (engineering and construction)]. Moscow: Nedra, 1982. 384 p.
5. Gorbunov-Posadov M.I., Ilichev V.A., Krutov V.I. et al. *Osnovaniya, fundamenty i podzemnye sooruzheniya: pod obshch.red. E.A.Sorchana, Yu.G.Trofimenkova* [Foundation and Underground Constructions :under the general editorship of E.A.Sorchan and Yu.G.Trofimenkov]. Moscow: Stroyizdat, 1985. 480 p., illustrated.
6. Mustafin F.M., Bykov L.I., Mokhov V.N., et al. *Stroitelnye konstruksii neftegazovykh obektov* [Building Structures of Oil and Gas Facilities]. Saint-Petersburg: LLC «Nedra», 2008. 780 p.
7. Tugunov P.I., Novoselov V.F., Korshak A.A., Shammazov A.M. *Tipovye raschety pri projektirovanii i ekspluatatsii neftebaz i nefteprovodov: izd.2e, pererabotannoe* [Routine Calculations in Designing and Exploitation of Oil Plants: 2d edition, improved]. Ufa: LLC «Dizayn Poligraf Servis», 2002. 658 p.
8. Nikolaev A.A. *Spravochnik projektirovshchika. Proektirovanie teplovykh setey.* [A Guide of a Designer. Designing of Heat Networks]. Moscow: Stroyizdat, 1965. 359 p.
9. Mikheev M. A., Mikheeva I. M. *Osnovy teploperedachi. Izd. 2-e, stereotip* [Heat-Transfer Principles;2d edition, stereotypical]. Moscow: "Energiya", 1977. 344 p.
10. Svets I.T. *Obshchaya teplotekhnika* [General Heat Engineering]. Moscow: Mashgiz, 1961. 463 p.
11. Korotkikh A.G. *Teploprovodnost materialov* [Thermal Conductivity of Materials: study guide]. Tomskiy politechnicheskii universitet [Tomsk Polytechnical University]. Tomsk: Publishing house of Tomsk Polytechnical Univesity, 2011. 97 p.

The article was received 09.10.13.

Citation for an article: Chemodanov A.N., Gorinov Yu.A., Safin R.G., Alibekov S.Ya. Usage of wood concrete as thermal insulation-ballast material of underwater pipelines of the centralized heating system. Vestnik of Volga State University of Technology. Ser.: Forest. Ecology. Nature Management. 2014. No 3(23). Pp. 43-56.

Information about the authors

CHEMODANOV Alexander Nikolayevich – Candidate of Technical Sciences, Professor, Head at the Chair of Woodworking Industry, Volga State University of Technology. Research interests – technology and equipment of forest industrial warehouses, equipment of woodworking industry, intermittent kilns. The author of more than 120 publications.

E-mail: ChemodanovAN@volgatech.net

GORINOV Yuriy Arkadiyevich – Postgraduate student (PhD student) at the Chair of Woodworking Industry, Volga State University of Technology. Research interests – wood technology, technology and equipment of wood industry, pipe transport of energy sources. The author of 17 publications.

E-mail: gelios62@mail.ru

SAFIN Rushan Gareevich – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head at the Chair of Wood Materials Manufacturing, Kazan National Research Technological University. Research interests – study of heat and mass exchange processes; development of energy-saving non-waste technologies and equipment. The author of more than 300 publications.

E-mail: safin_rg@kstu.ru

ALIBEKOV Sergey Yakubovich – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head at the Chair of Machine Construction and Material Science, Volga State University of Technology. Research interests – material science and technologies of modern and perspective materials. The author of more than 200 publications.

E-mail: mim@volgatech.net