

Введение 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 [1]. 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 [2]. Расчет выполняется при самом неблагоприятном сочетании нагрузок, которое имеет место, когда трубопровод не заглублен, т.е. находится на дне водоема в траншее без засыпки грунтом. При обтекании потоком жидкости подводные трубопроводы подвергаются силовому воздействию потока и действию подъемной силы Архимеда. При положении, когда трубопровод уложен в подводную траншею, засыпан грунтом и заполнен транспортируемым продуктом, число нагрузок, снижающих устойчивость трубопровода, значительно уменьшается. Расчет устойчивости подводного трубопровода

Силы, действующие на трубопровод:

1. Вес трубопроводной конструкции складывается из веса транспортируемого теплоносителя, стальной трубы, теплоизоляционно-балластного покрытия и полиэтиленовой трубы:
$$G = G_1 + G_2 + G_3 + G_4$$
 где γ - коэффициент перегрузки по весу трубопровода и конструкции; G_1 - сила тяжести трубопроводной конструкции с теплоносителем и балластом; ρ_1 - плотность теплоносителя; ρ_2 - плотность материала стальной трубы; ρ_3 - плотность теплоизоляционно-балластного арболитового покрытия; ρ_4 - плотность материала защитной полиэтиленовой оболочки; d_1 - внутренний диаметр стальной трубы; d_2 - наружный диаметр стальной трубы - внутренний диаметр теплоизоляционно-балластного арболитового покрытия; d_3 - наружный диаметр теплоизоляционно-балластного арболитового покрытия - внутренний диаметр защитной полиэтиленовой оболочки; d_4 - наружный диаметр защитной полиэтиленовой оболочки.
2. Выталкивающая сила Архимеда определяется по формуле:
$$F_A = \gamma_w V$$
 где γ_w - коэффициент перегрузки выталкивающей силы Архимеда; ρ_w - плотность воды водоема.
3. Сила трения трубопровода о грунт определяется по формуле:
$$F_{tr} = \mu R$$
 где μ - коэффициент трения поверхности трубы о грунт; R - реакция опоры.
4. Составляющие гидродинамического воздействия потока: сила лобового сопротивления и подъемная сила потока со скоростью определяются по формулам, в которой коэффициенты характеризуют следующие виды сопротивлений: сопротивление трения, обусловленное касательными напряжениями, приложенными к поверхности обтекаемого трубопровода; сопротивление давления, обусловленное нормальными напряжениями, приложенными к поверхности обтекаемого трубопровода:
$$F_{др} = \rho V^2 S C_{др}$$
- (4) В общем виде уравнение условия равновесия для трубопроводной конструкции, помещенной в водоем:
$$G + F_{др} - F_A - F_{tr} = 0$$
- (5) Расчетная схема

нагрузок и воздействий приведена на рис.1. а б Рис. 1 - Расчетная схема нагрузок и воздействий на подводный трубопровод в траншее: а) общая схема размещения трубопровода на дне водоема; б) схема сил, действующих на трубопровод

Проекция сил на ось X: (6) Проекция сил на ось Y: (7) Из уравнения (6) следует: (8) Из уравнения (7) следует: (9) Таким образом, устойчивость трубопроводной конструкции в пространстве определяется из условия: (10) В общем случае условие устойчивости единицы длины трубопровода с учетом коэффициента запаса устойчивости имеет вид: (11) Левая половина уравнения представляет собой горизонтальную сдвигающую силу, а правая половина уравнения - силу трения трубы о грунт. Авторы [1,3,4,5,6], обобщая результаты выполненных ими опытов и исследований, рекомендуют принимать:

- коэффициент лобового сопротивления ;
- в практических расчетах при касании трубопровода дна коэффициент подъемной силы ;
- коэффициент перегрузки по весу трубопроводной конструкции для двухтрубной конструкции с заполнением межтрубного пространства цементно-песчаным раствором при диаметре трубы равен 1,00, для трубы равен 0,95;
- коэффициент перегрузки выталкивающей силы Архимеда при диаметре трубы для пресной воды равен 1,00, для трубы равен 1,05;
- донную скорость потока 0,4 - 0,6 от поверхностной скорости ;
- коэффициент устойчивости равен 1,10 при диаметре трубы и 1,15 при ;
- наибольшее значение коэффициента трения поверхности трубы о грунт равно .
- наименьшее значение угла внутреннего трения грунта примем для глины ;
- средняя скорость течения потока принимается 5 км/ч.

Используя приведенные выше расчетные формулы и рекомендации по определению составляющих, выполнены расчеты устойчивости подводной конструкции трубопроводов, представляющей собой стальную трубу в защитном полиэтиленовом кожухе с межтрубным пространством, заполненным арболитом в качестве теплоизоляционно-балластного материала [7,8,9,10,11,12,13]. Необходимые для расчета данные о стальных электросварных трубах принимаются согласно [14], о полиэтиленовых трубах, применяемых в качестве наружной защитной оболочки, принимаются согласно [15]. Толщина нанесенного на стальную трубу теплоизоляционно-балластного арболитового покрытия определяется как разность между внутренним диаметром полиэтиленовой трубы и наружным диаметром стальной трубы : (12) С учетом этого, принимая плотность теплоизоляционно-балластного материала , определяем массу арболитового покрытия. Массу транспортируемого теплоносителя для каждого типоразмера стальной трубы принимаем согласно [16]. По формулам (1) и (2) определяем вес трубопроводной конструкции и величину выталкивающей силы Архимеда с учетом коэффициентов перегрузки. Результаты расчетов сведены в табл.1.

Таблица 1 - Расчет веса трубопроводной конструкции и силы Архимеда с учетом 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
100	100	100
150	150	150
200	200	200
250	250	250
300	300	300
350	350	350
400	400	400
450	450	450
500	500	500
550	550	550
600	600	600
650	650	650
700	700	700
750	750	750
800	800	800
850	850	850
900	900	900
950	950	950
1000	1000	1000

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 Используя формулы (3), (4), (9) выполним
расчет устойчивости. Как видно из табл.1,2 для всего ряда типоразмера труб
условие отрицательной плавучести соблюдается, в то время как условие
устойчивости подводной трубопроводной конструкции соблюдается только для
трубопроводов, имеющих условный диаметр стальной трубы Ду 100 мм. Таблица
2 - Результаты расчет устойчивости подводного трубопровода Условный диаметр
стальной трубы, мм Горизонтальная сдвигающая сила, Н/п.м. Сила трения трубы
о грунт, Н/п.м. 50 27.95 13.90 70 31.94 23.87 80 35.94 28.91 100 39.93 42.67 125
49.91 56.57 150 55.90 68.18 200 70.88 112.58 250 89.84 161.86 300 99.83 202.67
350 111.80 237.56 400 119.79 263.71 450 125.78 285.47 500 141.75 249.00 600
159.72 246.68 700 187.85 267.49 800 229.60 360.45 900 297.43 440.34 1000 297.43
499.51 1200 333.96 516.78 Выводы 1. Условие устойчивости подводной
трубопроводной конструкции, состоящей из стальной трубы, помещенной в
защитную полиэтиленовую оболочку с заполнением межтрубного пространства
теплоизоляционно-балластным арболитовым материалом с плотностью 1160
кг/м³, соблюдается для трубопроводов, имеющих условный диаметр стальной
трубы Ду 100 мм. 2. При необходимости прокладки подводных трубопроводов Ду
= 50, 70, 80 мм требуется дополнительная балластировка пригрузами весом
более 14.05Н/п.м, 8.07Н/п.м, 7.03Н/п.м. соответственно. 3. Выполненные расчеты
доказывают возможность применения трубопроводной конструкции, состоящей
из стальной трубы в защитном полиэтиленовом кожухе с межтрубным
пространством, заполненным арболитом [7] для прокладки теплопроводов по
дну водоемов.