

УДК 622.692.4

М.Н. Мансуров, Т.И. Лаптева, Л.А. Копаева

Влияние донных наносов и дампинга грунта на устойчивость морских подводных трубопроводов

Проектирование и строительство морских подводных трубопроводов требуют дифференцированного подхода к принимаемым техническим и технологическим решениям в зависимости от природно-климатических характеристик региона. Важное внимание при этом должно уделяться их устойчивости после укладки.

Одним из условий обеспечения устойчивости является строгое соблюдение нормативных требований по расчету и проектированию трубопроводов. Однако они не охватывают все многообразие факторов, воздействующих на трубопровод.

Самое неблагоприятное сочетание нагрузок, влияющих на устойчивость, имеет место, когда трубопровод не заглублен, а лежит на дне. В других случаях, например, когда трубопровод уложен в подводную траншею и засыпан грунтом, число нагрузок, снижающих запас устойчивости, соответственно, уменьшается. В [1, 2] при проведении статического расчета поперечной устойчивости подводных трубопроводов рекомендуется применять значение коэффициента запаса устойчивости трубопровода $k_{н.в.}$, равное не менее 1,1.

На устойчивость подводных трубопроводов существенное влияние оказывают сложные инженерно-геологические условия дна морской акватории. К числу основных причин развития опасных геологических процессов относятся геодинамические и гидрометеорологические факторы [3]. Наблюдается весьма сложное переплетение прямых и опосредованных влияний всех указанных факторов. Самое активное и повсеместное воздействие на геологическую среду шельфа оказывает динамика водной морской среды, определяющая характер развитие зон и литодинамических (гидродинамических) процессов, обусловленных придонными перемещениями грунтовых масс. По характеру и степени воздействия гидродинамических факторов на донные отложения шельф можно разделить на зоны: прибрежную, переходную и глубоководную (табл. 1).

Ключевые слова:

литодинамические процессы, дампинг грунта, коэффициент устойчивости трубопроводов против всплытия, концентрация взвешенных наносов, мутьевые потоки.

Keywords:

tectonics, ground damping, pipelines' factor of stability against surfacing, density of suspended sediments, mud flows.

Таблица 1

Зоны воздействия гидродинамических факторов

Зона	Глубина моря, м	Основные гидродинамические процессы
Прибрежная (преимущественное влияние волновых факторов)	0–30	Абразия берега и дна, интенсивные вдольбереговые потоки наносов, выносные потоки
Переходная (совместное влияние волновых факторов и течений)	30–140	Взмучивание донных отложений, приливно-отливные и постоянные течения
Глубоководная (преимущественное влияние течений)	> 140	Постоянные и квазипостоянные течения

Прибрежная зона характеризуется неустойчивым гидродинамическим режимом, при котором процессы выноса обломочного материала находятся в неустойчивом равновесии с процессами его приноса, часто с кратковременным (в том числе периодическим, сезонным) преобладанием размыва или аккумуляции. Переходная зона характеризуется совместным влиянием волновых процессов и приливно-отливных явлений. Влияние штормового волнения на наносы прослеживается до глубины,

равной 1/3 длины наиболее крупных штормовых волн. Глубоководная зона характеризуется ведущей ролью течений.

Под действием различных экзогенных факторов осадочные частицы, поступающие на какой-либо ограниченный участок поверхности моря, обычно во взвешенном состоянии вместе с толщей воды перемещаются на более или менее значительное расстояние. В ходе разноса одни частицы опускаются на дно быстрее, другие – медленнее [4]. Содержание взвешенного осадочного материала в морской воде колеблется в широких пределах. Под каждым квадратным метром площади океана в столбе воды от его поверхности до дна содержится от 1 до 10 кг взвеси.

Частицы, осевшие на дно или сконцентрированные в придонном слое воды, также подвержены дальнейшему перемещению. Важнейшими факторами донного перемещения в береговой зоне и на мелководье являются волнение, приливные и нагонные течения. На больших глубинах массовое перемещение осадочных частиц осуществляют мутьевые потоки, подводные оползни, а также донные плотностные течения.

На частички грунта, находящиеся в воде, действуют силы, вызывающие их всплытие и движение в воде в виде взвеси или движение по грунту без всплытия в виде наносов [5]. Согласно [6], полагается, что на песчинку диаметром d_s и плотностью ρ_s при плотности морской воды ρ_w , находящуюся в наружном слое песчаного дна, действуют две силы: горизонтальная, пропорциональная напряжению трения воды τ :

$$F_\tau = \tau d_s^2, \quad (1)$$

и вертикальная, пропорциональная силе Архимеда:

$$F_g = (\rho_s - \rho_w) g d_s^3. \quad (2)$$

Начало движения песчинок определяется из условия равенства моментов этих сил. Если учитывается уклон дна (выражаемый углом φ), отсчитываемый от вертикальной оси, то равенство моментов сил записывается в виде

$$F_\tau \sin \varphi = F_g \cos \varphi. \quad (3)$$

Отношение упомянутых сил, называемое параметром Шилдса Ψ , представляется формулой

$$\Psi = \frac{F_\tau}{F_g} = \frac{\tau}{g d_s (\rho_s - \rho_w)} \operatorname{tg} \varphi. \quad (4)$$

Предельное значение этого параметра, при котором происходит сдвиг песчинок и начинается их движение сначала в виде скольжения, качения и коротких прыжков (сальтаций), оценивается величиной $\Psi_c = 0,05$.

Скорость оседания взвеси может быть определена из простейшего уравнения

$$\frac{dW_s}{dt} = g \left(1 - \frac{\rho_w}{\rho_s} \right) - 4 \frac{k W_s}{\pi d_s^2}, \quad (5)$$

где k – коэффициент вязкости воды.

Из уравнения (5) при нулевой начальной скорости оседания взвеси следует, что

$$W_s = \frac{\pi g d_s^2}{4k} \left(1 - \frac{\rho_w}{\rho_s} \right) \left(1 - e^{-\frac{4kt}{\pi d_s^2}} \right). \quad (6)$$

С ростом плотности и размера частицы взвеси скорость ее оседания увеличивается. В принципе к этой скорости должна добавляться вертикальная составляющая скорости движения воды. Более просто скорость оседания взвеси оценивается по эмпирической формуле, полученной для песчаной взвеси:

$$W_s = 0,155 d_s - 0,0075. \quad (7)$$

Поток наносов q_b определяется за счет их влечения по дну и за счет взвеси. Первое слагаемое представляется формулой

$$q_b = \frac{\varepsilon_b}{\operatorname{tg} \varphi} \tau u, \quad (8)$$

где u – донная орбитальная скорость; ε_b – часть мощности всего потока τu , расходуемая на перемещение влекомых наносов. В работе [6] эта доля оценивается как 10^{-1} .

Второе слагаемое, характеризующее поток взвеси, записывается выражением

$$q_s = \varepsilon_s \frac{u}{W_s} \tau u, \quad (9)$$

где $\varepsilon_s \sim 10^{-2}$.

Этот поток взвеси может быть также выражен через произведение градиента взвеси и коэффициента вертикальной турбулентности. Общий поток наносов представляется суммой

влекомых и взвешенных компонентов. Если выразить напряжение трения в виде стандартной формулы

$$\tau = \frac{f_w}{2} \rho_w |u| u, \quad (10)$$

то формула для расчета потока наносов принимает вид:

$$q = \frac{\rho_w f_w}{2} \left(\frac{\varepsilon_b}{\operatorname{tg} \varphi} + \frac{\varepsilon_s}{W_s} |u| u \right) |u|^2. \quad (11)$$

Общий поток наносов представляется выражением

$$q = \left[\frac{3 \rho_w f_w}{4} \frac{\varepsilon_b}{\operatorname{tg} \varphi} u^2 + \frac{\varepsilon_s}{W_s} \left(\frac{8}{3\pi} f_w \rho_w u^3 + B \right) \right] u, \quad (12)$$

где $B = \rho_w k_b^{3/2}$; k_b – осредненный квадрат пульсационных скоростей течения; в u может входить скорость прибрежного течения.

По расчетам [6], взвесь составляет более 2/3 общей массы перемещающихся наносов, причем половина взвеси в области пика транспорта наносов создается за счет обрушения волн.

Поперечный расход наносов [6] определяется по формулам:

$$q_x = G(U_b - 2s_x \sqrt{U_b^2 + [V_\delta^2 + V_B^2]}); \quad (13)$$

$$G = \frac{9\pi}{8} \frac{\varepsilon_b}{\operatorname{tg} \varphi} \frac{F}{u} + \frac{\varepsilon_s}{W_s} (4F + B); \quad (14)$$

$$F = \frac{2}{3\pi} f_w \rho_w u^3, \quad (15)$$

где F – потери мощности на донное трение, а G характеризует погруженный вес движущихся песчаных зерен на единицу площади; U_b , V_b – компоненты скорости переноса в волновом пограничном слое; s_x – уклон дна; V_δ – скорость движения воды на верхней границе придонного пограничного слоя. Остальные составляющие скоростей характеризуют обычные переносные скорости в придонном слое. Чтобы оценить общий перенос наносов в некотором слое эту формулу следует проинтегрировать по заданному слою. Этот поток может переносить наносы как в сторону берега, так и в сторону моря в зависимости от рельефа дна и изменения скоростей течения.

Поскольку перенос взвеси имеет важное значение для решения целого ряда задач, то применительно к шельфу Карского моря, в частности на Байдарацкой губе, проводился комплекс

исследований динамики взвешенных наносов. Исследования на трассе морского перехода газопровода Бованенково – Ухта показали, что основная часть транспорта наносов сосредоточена в прибрежной зоне, где дно сложено мелкими или пылеватыми песками [7]. За пределами зоны обрушения волн отсутствуют современные подвижные донные формы, свойственные более активным участкам шельфа, такие как песчаные волны и гряды. Поэтому существенных деформаций рельефа дна в центральной части губы ожидать не следует, и проектирование трубопроводов необходимо вести от существующих отметок дна. Основная часть материала, поступающего в Байдарацкую губу в результате размыва берегов и дна, переносится в виде взвеси. При сильных штормах на большом расстоянии от берега (вплоть до глубин 5–6 м) фоновые концентрации взвешенных наносов составляют 1–2 г/л. На больших глубинах увеличивается влияние связности грунта, и концентрация взвеси уменьшается. Вдольбереговой транспорт наносов, включающий перемещение влекомых и взвешенных наносов на прибрежном мелководье, рассчитывался по модели Леонтьева (1993), которая базируется на модели трансформации нерегулярных волн в береговой зоне и учитывает влияние особенностей рельефа дна на формирование прибрежной циркуляции и действие течений неволнового происхождения. Интенсивность вдольберегового транспорта на восточном участке перехода существенно выше, что объясняется преобладанием здесь более тонких осадков. Приведенные величины вдольберегового переноса близки к объему наносов, поступающих в море на восточном и западном участках перехода. Отметим, что величины вдольберегового транспорта наносов могут изменяться от года к году в пределах 50–100 % в зависимости от вариаций штормовой активности и продолжительности безледного периода.

Полученные оценки вдольберегового переноса нашли подтверждение в ходе экспериментов по заносимости опытной траншеи, прорытой в 1993 г. на восточном мелководном участке перехода. Траншея, имеющая ширину 15–20 м и глубину до 4–5 м, была занесена наполовину в течение 1994 г. и практически полностью – в 1995 г. При этом в траншее отлагалось 25–30 % от общего объема взвеси, переносимой за счет вдольберегового транспорта наносов. Приведенные выше оценки особенностей

динамики наносов в Байдарацкой губе отвечают фоновому состоянию.

Поступление большого количества материала в результате дноуглубительных работ может существенно повлиять на устойчивость морских подводных трубопроводов при их строительстве.

Согласно отечественным и зарубежным данным натурных исследований дамплинга грунта в различных условиях сброса, во взвесь переходит обычно 1–5 % сбрасываемого грунта. В процессе разгрузки грунтоотвозной шаланды или землесоса формируется поток грунта (водо-грунтовой смеси), проходящего через толщу воды до дна. При этом часть грунта в результате его трения о воду теряет связность и переходит во взвешенное состояние, перераспределяясь в слое воды, примыкающем к потоку. В соответствии с [10] было определено количество грунта, переходящего во взвешенное состояние при дамплинге. Количество образующейся взвеси зависит от свойств самого грунта (гранулометрического состава, удельных сцеплений, объемного веса грунта и удельного веса частиц грунта), технологии разгрузки судна (типа судна, времени опорожнения трюма, времени полного открытия днищевых люков и их конструктивных параметров) и природных условий в месте строительства (глубины воды, плотностной стратификации толщи). При перемещении и изъятии донного грунта гидромеханизованным способом переход тонкодисперсного материала во взвешенное состояние при погружке грунтоотвозного судна происходит, главным образом, с переливом технологической воды за борт. Масса частиц грунта m_n , выходящего во взвесь при погружке с переливом, определяется согласно [10, п. 1.1.1].

С точки зрения проектирования при расчете морских трубопроводов на устойчивость против всплытия [11] важно корректно определить коэффициент надежности устойчивого положения трубопровода против всплытия, который прямо пропорционален сумме расчетных нагрузок G , действующих сверху вниз, и обратно пропорционален сумме расчетных нагрузок на трубопровод Q , действующих снизу вверх:

$$k_{н.в.} = \frac{G}{Q}. \quad (16)$$

Как отмечалось ранее, значение коэффициента $k_{н.в.}$ принимается обычно не менее 1,1. Однако в научно-технической и нормативной

литературе для морских трубопроводов случаи применения иных значений коэффициента $k_{н.в.}$ не приводятся, кроме [11], где для подводных переходов трубопроводов даются его различные значения. В связи с этим важно определять значение $k_{н.в.}$ для тех ситуаций, когда при проектировании не только не всегда удастся получать достоверные данные о составе донных грунтов и гидрологические данные, но и не учитываются концентрация взвеси, возможной при дамплинге грунта при проведении строительных работ, а также фоновая концентрация взвешенных наносов, что может впоследствии при расчетах устойчивости трубопровода привести к некорректным значениям, например, толщины стенки бетона. Это может обусловить потерю устойчивости морского трубопровода как в период его строительства, так и при эксплуатации.

Авторы в рамках данных исследований первоначально провели расчеты по оценке концентрации взвеси, возможной при дамплинге грунта при проведении строительных работ. Затем для определенных условий была рассчитана разница масс, которую в целях обеспечения устойчивого положения морского трубопровода необходимо компенсировать, а также толщина слоя бетона, обеспечивающая устойчивое положение морского трубопровода.

В табл. 2 для акватории Байдарацкой губы приводятся данные расчета разницы масс для морского трубопровода диаметром 1219 мм с толщиной стенки 27 мм на давление 11,8 МПа. В табл. 3 даны показатели толщины слоя бетона с учетом взвешенных наносов и дамплинга грунта и отдельно – только с учетом взвешенных наносов. Для расчета был взят самоходный трюмный землесос с волочащимся грунтоприемником POSEIDON вместимостью трюма грунтоотвозного судна 4720 м³ и производительностью по грунту до 4000 м³/ч. При углублении дна разрабатываются пески мелкие пылеватые, плотность сухого грунта которых составляет 1600 кг/м³. Значение отношения производительности землесоса к вместимости трюма грунтоотвозного судна [10] составило примерно 0,85, а $\delta_z = 0,058$. Масса частиц выходящего во взвесь грунта, содержащихся в 1 м³, составила 92,8 кг. При расчете максимальной скорости течения воды на уровне уложенного на дно подводной траншеи трубопровода, возможной один раз в год, при высоте волны 13 % обеспеченности (3,1 м) принималась рав-

Таблица 2

Расчетная разница масс, подлежащая компенсации

Обеспеченность высоты волны, %	Плотность морской воды, кг/м ³	Разница масс, подлежащая компенсации, кг/м	
		с учетом взвешенных наносов	с учетом взвешенных наносов и дампинга грунта
13	1020	317,346	359,870
	1025	323,252	365,777
	1029	327,977	370,501
1	1020	317,937	360,461
	1025	323,843	366,367
	1029	328,568	371,092
0,1	1020	319,118	361,642
	1025	325,024	367,548
	1029	329,749	372,273

Таблица 3

Расчетная толщина слоя бетона, обеспечивающая устойчивое положение морского трубопровода

Обеспеченность высоты волны, %	Плотность морской воды, кг/м ³	Толщина слоя бетона, м	
		с учетом взвешенных наносов	с учетом взвешенных наносов и дампинга грунта
13	1020	0,089	0,099
	1025	0,091	0,100
	1029	0,092	0,101
1	1020	0,098	0,107
	1025	0,099	0,109
	1029	0,100	0,110
0,1	1020	0,104	0,114
	1025	0,105	0,115
	1029	0,106	0,117

ной 0,48 м/с; при высоте волны 1 % обеспеченности (4,5 м) – 0,7 м/с; при высоте волны 0,1 % обеспеченности (5,3 м) – 0,82 м/с. Для высоты волны 13 % обеспеченности фоновая концентрация взвешенных наносов принималась равной 0,5 г/л; для высоты волны 1 % обеспеченности – 1 г/л; для высоты волны 0,1 % обеспеченности – 2 г/л.

По результатам анализа табл. 2 и 3 можно сделать вывод, что в целях сохранения устойчивости морского трубопровода при условии отсутствия учета частиц выходящего во взвесь грунта и фоновой концентрации взвешенных наносов необходимо примерно на 10 % увеличить толщину слоя бетона. Для трубопроводов, потеря устойчивости которых может вызвать тяжелые последствия, $k_{н.в.}$ должен быть увеличен. Так, при проектировании для условий строительства в целях учета в неявном виде условий фоновой концентрации взвешенных наносов и частиц выходящего во взвесь грунта при дампинге необходимо, чтобы значение коэффициента $k_{н.в.}$ для мелких пылеватых песков

составляло 1,19. В дальнейшем этот же принцип расчета будет распространен и на другие типы грунтов, что приведет к более обоснованному применению тех или иных значений коэффициента $k_{н.в.}$.

Список литературы

1. ГОСТ Р 54382-2011. Подводные трубопроводные системы.
2. DNV RP E305. Расчет устойчивости на дне подводных трубопроводов.
3. Козлов С.А. Опасные для нефтегазопромысловых сооружений геологические и природно-техногенные процессы на Западно-Арктическом шельфе России / С.А. Козлов. – http://www.ogbus.ru/2005_1.shtml
4. Леонтьев О.К. Морская геология / О.К. Леонтьев. – М.: Высшая школа, 1982. – 344 с.

5. Доронин Ю.П. Океанография шельфовой зоны / Ю.П. Доронин. – СПб., 2007. – 105 с.
6. Леонтьев И.О. Прибрежная динамика: волны, течения, потоки наносов / О.К. Леонтьев. – М.: ГЕОС, 2001. – 228 с.
7. Одишария Г.Э. Природные условия Байдарацкой губы: Основные результаты исследований для строительства подводного перехода системы магистральных газопроводов Ямал – Центр / Г.Э. Одишария, А.С. Цвезинский, В.В. Ремизов и др. – М.: ГЕОС, 1997. – 432 с.
8. Прозоров А.А. Методика расчета зоны короткопериодного воздействия дампинга грунтов дноуглубления: дис. ... к.ф.-м.н.: 11.00.2011. – СПб., 2000. – 132 с.
9. Геоэкология шельфа и берегов морей России / под. ред. Н.А. Айбулатова. – М.: Ноосфера, 2001. – 428 с.
10. Порядок расчета платы за загрязнение акваторий водных объектов, являющихся федеральной собственностью Российской Федерации (исключая подземные водные объекты), при производстве работ, связанных с перемещением и изъятием донных грунтов, добычей нерудных материалов из подводных карьеров и захоронением грунтов в подводных отвалах (утв. Госкомэкологии РФ 04.07.1997 г.) (ред. от 02.11.1999 г.).
11. Левин С.И. Подводные трубопроводы / С.И. Левин. – М.: Недра, 1970. – 280 с.

Научно-технический сборник
«Вести газовой науки»

2014

Современные подходы и перспективные технологии в проектах освоения нефтегазовых месторождений российского шельфа

В тематическом выпуске будут представлены новые результаты в области применения современных технологий и технических средств в масштабных проектах освоения шельфовых месторождений углеводородов. Особое внимание планируется уделить дополнительным трудностям и проблемам, возникающим при разработке проектов обустройства морских месторождений, расположенных в Арктике и других ледовитых морях, и подходам к их преодолению.