

УДК 621.643.053:624.042.7(204.1)

**Л. В. Муравьева**

## **ВОПРОСЫ КОНТАКТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПОДВОДНОГО ТРУБОПРОВОДА С УПРУГО-ПЛАСТИЧНЫМ ГРУНТОМ ПРИ СЕЙСМИЧЕСКОЙ НАГРУЗКЕ**

Рассмотрены вопросы динамического расчета на сейсмостойкость подводного трубопровода с учетом методов задания сейсмических воздействий и динамических прочностных характеристик грунта.

**К л ю ч е в ы е с л о в а:** морской подводный трубопровод, комплексный анализ надежности подводных трубопроводов, проблемы оценки сейсмостойкости.

The author considers the issues of dynamic calculation for seismic stability of underwater pipeline taking into account the methods of the task of seismic influences and dynamic strength characteristics of soil.

**К е y w o r d s:** marine underwater pipeline, complex analysis of underwater pipeline stability, problem of seismic stability assessment.

Проблема обеспечения надежности и безопасности проектируемых, эксплуатируемых строительных конструкций приобретает все большее значение. Разработка новых и совершенствование существующих методов моделирования и расчета различных состояний и процессов в инженерных конструкциях по-прежнему является одной из актуальных проблем.

Подводные трубопроводы под высоким давлением и температурой широко применяются при разработке подводных месторождений.

Исследование морских трубопроводов при учете комбинации нагрузок от внутреннего давления и температурного воздействия в основном фокусировалось на вопросах местной потери устойчивости трубопроводов с дефектами и потерь устойчивости в поперечном направлении при учете начальных дефектов.

Вопросы анализа комбинации сейсмических и эксплуатационных нагрузок являются важной проблемой при разработке проектов подводных трубопроводов в сейсмоопасных регионах.

Целью данного исследования является рассмотрение методов моделирования (задания) сейсмических воздействий и анализ поведения конструкции при сейсмических воздействиях.

Дифференциальное уравнение изгибных колебаний подводного трубопровода под действием гидродинамических сил, с учетом действия продольной нагрузки с начальными и соответствующими краевыми условиями, при  $t = 0$ ;  $x(t) = 0$ ;  $x'(t) = 0$  представлено в [1]:

$$(m + m_{\text{пр}}) \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} + (C + 2K_D K_L) \frac{\partial y}{\partial t} + EI \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} - N \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = \tilde{F}(t), \quad (1)$$

где  $m$  и  $m_{\text{пр}}$  — масса трубопровода на 1 пог. м и присоединенная масса воды соответственно;  $K_D = \frac{1}{2} \rho D C_D$ ;  $K_L = \sqrt{\frac{8}{\pi}} \sigma_v$ .

В случае распространения по основанию сейсмических возмущений движения сооружения будут вызваны колебаниями поверхности контакта, т. е. активным давлением упругого полупространства на подошву сооружения.

Общепринятого математического описания сейсмических возмущений не существует. Чаще всего такие возмущения представляют в виде отрезков синусоид определенной амплитуды и частоты. В этом случае для вертикальной компоненты смещений можно записать следующее:

$$w^*_1(x, 0, t) = \sum_{i=0}^n (w^*_m)_{i+1} \sin \frac{\pi}{\tau_{i+1}} \left( t_i - \frac{l_1 + x}{c^*} \right) \left\{ \sigma_0 \left( t_i - \frac{l_1 + x}{c^*} \right) - \sigma_0 \left[ t_i - \left( \frac{l_1 + x}{c^*} + \tau_{i+1} \right) \right] \right\}, \quad (2)$$

где  $t$  — время, отсчитываемое с момента подхода сейсмической волны к подошве сооружения;  $t_0 = t$ ;  $t_1 = t - \tau_1$ ;  $t_2 = t - \tau_1 - \tau_2$  и т. д.;  $n$  — количество фаз, учитываемых в расчете;  $(w^*_m)_{i+1}$  — максимальная амплитуда  $(i + 1)$ -й фазы колебаний со своим знаком;  $\tau_{i+1}$  — продолжительность  $(i + 1)$ -й фазы сейсмических колебаний;  $c^*$  — скорость распространения сейсмической волны вдоль подошвы сооружения;

Для решения проблемы динамического расчета конструкции рассматривается конечно-элементная схематизация расчетной области, и решение динамической задачи осуществляется методом прямого пошагового интегрирования Ньюмарка. При замене бесконечной области грунта конечным фрагментом в виде плоскости использован метод построения демпфирующих границ, поглощающих энергию падающих упругих волн и реализуемых путем установки в граничных узлах элементов вязкого демпфирования.

К трубопроводам применимы несколько методов анализа, позволяющих оценить его реакцию на сейсмическое воздействие: квазистатический (для подземных трубопроводов, пересекающих зону разлома); анализ спектров отклика; временной анализ.

Сейсмическое воздействие представляет собой случайный процесс колебаний грунта в вертикальном и горизонтальном направлениях. В нормах СТО Газпром DNV нагрузки от сейсмического воздействия классифицируются как случайные (аварийные), зависящие от частоты появления землетрясений.

Пространственные записи перемещений во времени показаны на рис. 1—2.

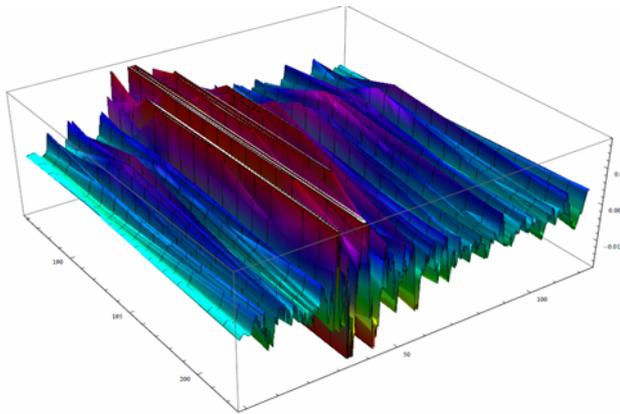


Рис. 1. Поле перемещения морского дна при землетрясении по Z

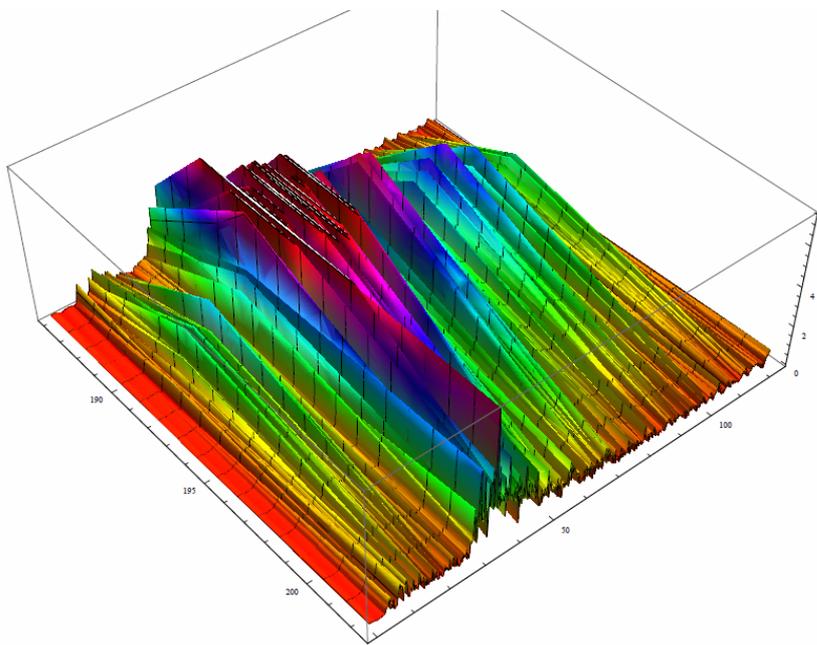


Рис. 2. Поле общих перемещений морского дна при землетрясении

При выполнении анализа конструкции на сейсмическое воздействие с помощью стандартных модулей расчетной программы выполняется расчет по квазистатическому методу.

Задача динамического расчета формулируется, как и в статическом случае, в виде вариационного равенства

$$\frac{d}{dt^2} y_i(t) + 2\xi_i \omega_i \frac{d}{dt} y_i(t) + \omega_i^2 y_i(t) = F_i(t), \quad t > 0, \quad \text{при } y_i(0) = y_i^0;$$

$$\frac{dy_i}{dt}(0) = y_i^1, \quad (3)$$

где  $\omega = \lambda_i^{-0,5}$ ;  $0 < \xi_i < 1$ ;  $F_i(t) = \omega_i^2 < F(t)$ .

Решение уравнения (3) имеет вид

$$y_i = e^{-\xi_i \omega_i t} \left( \frac{y_i^1 + y_i^0 \xi_i \omega_i}{\omega_i} \sin \omega_{Di} t + y_i^0 \cos \omega_{Di} t \right) + \frac{1}{\omega_{Di}} \int_0^t F_i(\tau) e^{-\xi_i \omega_i t(t-\tau)} \sin \omega_{Di} (t-\tau) d\tau,$$

где  $\omega_{Di} = \omega_i \sqrt{1 - \xi_i^2}$ .

В частности при расчете на сейсмическую нагрузку по акселерограмме в каждый момент времени  $t_k$  задается вектор  $F_k = F(t_k)$ . Далее уравнение (3) решается методом конечных разностей по схеме Ньюмарка. В результате по-

лучаем значения перемещений  $y_{i,k} = y_i(t_k)$  и инерционных сил  $S_{i,k} = S_i(t_k)$ , по которым вычисляется

$$S_{i,0} = \max_k \left\{ \left| \omega_i^2 y_i(t_k) \right| \right\}.$$

В конечно-элементной модели учтено пространственное движение основания при сейсмическом воздействии и нагрузки от внутреннего давления и температуры транспортировки. Динамическое воздействие задается акселерограммой (рис. 3).

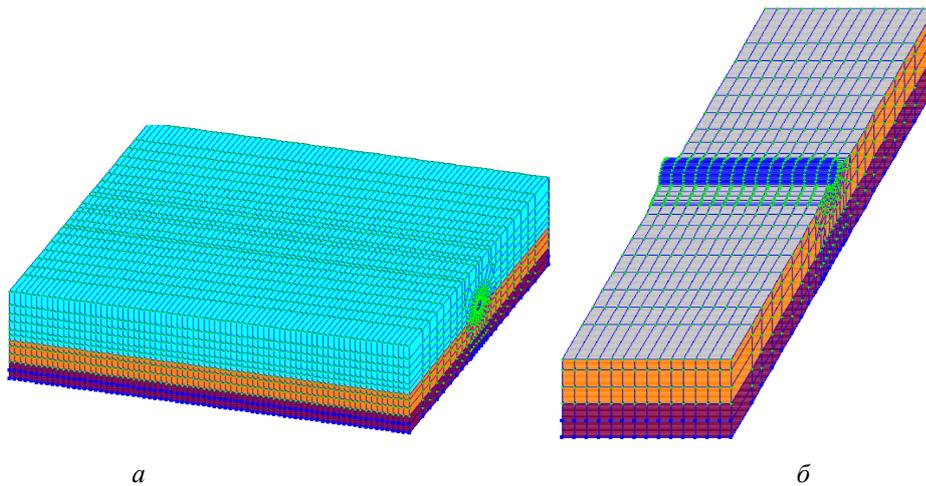


Рис. 3. Конечно-элементная модель подводного трубопровода: *а* — общая модель; *б* — элементы основания (дна)

Расчетная динамическая модель подводного трубопровода включает следующие элементы:

оболочку трубопровода, которая моделируется пластинчатыми элементами (на этапе предварительного расчета возможно представление в виде балочной модели);

основание (поверхность морского дна), выполняемая пластинчатыми элементами жесткость основания вычисляется согласно коэффициенту постели.

При формировании матрицы масс учитываются присоединенные элементы среды, взаимодействующие с сооружением.

Взаимодействие трубопровода и грунта учитывается с помощью специальных элементов трения в продольном и поперечных направлениях, жесткости элементов задаются по результатам натурных экспериментов или по условиям (2).

Наиболее драматичным последствием землетрясений является разжижение песчаных и пылеватых грунтов. Изменение во времени касательных напряжений, вызванных вертикальным прохождением сейсмических сдвиговых волн через массив грунта с ровной поверхностью, будет непериодическим и разнонаправленным при рассмотрении в горизонтальной плоскости (рис. 4).

Динамическая нагрузка (комбинация статической и циклической составляющих нагрузок) может приводить к значительному изменению параметров прочности и деформируемости грунтов по сравнению с их статическими величинами.

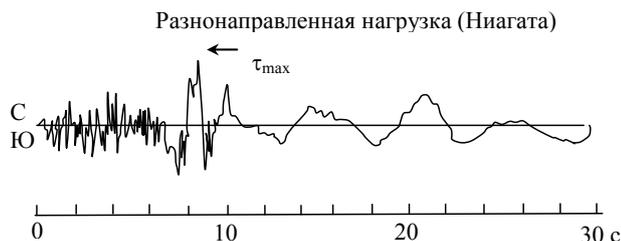


Рис. 4. Изменение деформаций сдвига

Динамическая прочность грунта на сдвиг определяется как предельное значение суммы статической компоненты сдвиговых напряжений  $\tau_a$  и циклической составляющей  $\tau_{cy}$  на поверхности разрушения

$$(\tau_{f, cy})_{\text{пред}} = (\tau_a + \tau_{cy})_{\text{пред}} = f(N, d_{50}, \mu_\sigma, \omega_1, \dots, \omega_n), \quad (4)$$

где  $\tau_{f, cy}$  — пиковые значения динамических сдвигающих напряжений;  $N$  — число циклов нагружения;  $d_{50}$  — характеристика гранулометрического состава грунта;  $\mu_\sigma$  — параметр Лоде;  $\omega_1, \omega_n$  — другие определяющие параметры.

Касательное сопротивление грунта определяется согласно [2]:

$$\tau_{\max} = \sqrt{s_u^2 - \left( \frac{0,5(1 - k_c) R_V}{b} \right)^2}, \quad (5)$$

где  $s_u$  — сопротивления сдвигу глины;  $k_c$  определяется по соотношению [3];  $R_V$  — вертикальное сопротивление грунта в статических условиях на погонный метр длины трубопровода.

В конечной элементной модели касательное сопротивление реализовано с помощью специальных конечных элементов (рис. 5).

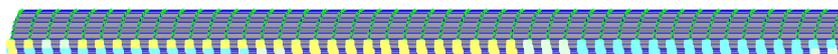
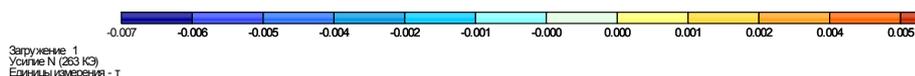


Рис. 5. Усилие в специальных конечных элементах трения

В новую редакцию РМРС внесены соотношения по определению модуля сдвига грунта  $G_{\max}$  и алгоритм определения динамических характеристик грунтов.

При расчете подводного трубопровода по предельным состояниям необходимо учитывать упругопластические характеристики работы материала.

Модель Ramberg-Osgood выбрана для моделирования упруго-пластических свойства стали. Модель Ramberg-Osgood:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E_0} \left[ 1 + \frac{n}{1+\gamma} \left( \frac{\sigma}{\sigma_y} \right)^r \right], \quad (6)$$

где  $\varepsilon$  — деформация;  $\sigma$  — напряжение;  $E_0$  — модуль начальной Юнга;  $\sigma_y$  — напряжение, соответствующие пределу текучести;  $n$  и  $\gamma$  — параметры Ramberg-Osgood. Критерий Мизеса принят при учете правил текучести и кинематики упрочнения.

Критерии прочности конструкции трубопровода, согласно требованию [4],

$$\sigma_{\max} \leq 1,1R_e. \quad (7)$$

При анализе НДС учитывались технологические нагрузки на трубопровод: избыточное давление транспортируемого продукта 5,5 МПа (природный газ), волновые нагрузки, сейсмическое воздействие.

В ходе выполнения исследований по оценке надежности морского магистрального газопровода учитывается сейсмическое воздействие, определялось напряженно-деформированное состояние газопровода, проложенного в районе с сейсмичностью 9 баллов.

В общем случае усилия и несущая способность являются случайными функциями времени, но в рассматриваемой постановке  $\tilde{R}$  и  $\tilde{F}$  считаются случайными функциями изменения технологических параметров работы конструкции с заданными законами распределения. Основной задачей вероятностного расчета является вычисление характеристики прочности  $\tilde{S}$ .

Примером четкого отказа может служить потеря несущей способности статически определимой конструкцией, нечеткого — развитие пластических деформаций или накопление повреждений в элементе трубопроводной конструкции.

Целесообразный уровень надежности конструкции устанавливается на основании анализа работы и уровня надежности существующих конструкций, анализа последствий аварий (имевших место и моделируемых), а также на основании эффективности использования материальных ресурсов и требований безопасности.

Определение области безотказной работы линейного участка газопровода с заданным уровнем риска производится в результате анализа графиков областей безотказной работы, построенных по отмеченным точкам отказов.

Изучение величин нагрузок вдоль линий отказов с учетом выбранных пределов изменения параметров дает возможность эффективно оценить работу исследуемой конструкции.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бородавкин П. П., Березин В. Л., Шадрин О. Б. Подводные трубопроводы. М. : Недра, 1979.
2. Справочник проектировщика / под ред. Б. Г. Коренева, И. М. Рабиновича. М. : Стройиздат, 1984. 215 с.
3. ВН 39-1.9-005—98. Нормы проектирования и строительства морского газопровода. М. : ОАО «Газпром», 1998.
4. Правила классификации и постройки морских подводных трубопроводов. СПб., 2011.

1. Borodavkin P. P., Berezin V. L., Shadrin O. B. Podvodnye truboprovody. M. : Nedra, 1979.

2. Spravochnik proektirovshchika / pod red. B. G. Koreneva, I. M. Rabinovicha. M. : Stroyizdat, 1984. 215 s.
3. VN 39-1.9-005—98. Normy proektirovaniya i stroitel'stva morskogo gazoprovoda. M. : OAO «Gazprom», 1998.
4. Pravila klassifikatsii i postroyki morskikh podvodnykh truboprovodov. SPb., 2011.

© *Муравьева Л. В.*, 2013

*Поступила в редакцию  
в декабре 2012 г.*

*Ссылка для цитирования:*

*Муравьева Л. В.* Вопросы контактного взаимодействия подводного трубопровода с упруго-пластичным грунтом при сейсмической нагрузке // Интернет-вестник ВолгГАСУ. Сер.: Политематическая. 2013. Вып. 1(25). URL: [http://vestnik.vgasu.ru/attachments/Muraveva-2013\\_1\(25\).pdf](http://vestnik.vgasu.ru/attachments/Muraveva-2013_1(25).pdf)