

УДК 621.644.073

Костин Александр Андреевич

Магистрант

Самарский Государственный Технический Университет

Россия, г. Самара

**ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО
СОСТОЯНИЯ МОРСКОГО ТРУБОПРОВОДА ПРИ УКЛАДКЕ S-
МЕТОДОМ С ПОМОЩЬЮ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА ANSYS.
МЕТОДИКА РАСЧЕТА.**

***Аннотация:** В статье рассматривается анализ напряженно-деформированного состояния морского трубопровода при укладке S-методом на примере объекта "Каменномысское-море". Обоснована необходимость расчета напряжений и деформаций при укладке. Предложена методика расчета с помощью программного комплекса Ansys Workbench.*

***Ключевые слова:** морской трубопровод, укладка S-методом, расчет напряженно-деформированного состояния трубопровода в Ansys.*

***Abstract:** The article deals with the analysis of the stress-strain state of an offshore pipeline during S-method laying on the example of the "Kamennomyskoe-Sea" object. The necessity of calculating stresses and deformations during laying is substantiated. A calculation technique using the Ansys Workbench software package is proposed.*

***Keywords:** offshore pipeline, S-method laying, pipeline stress-strain analysis in Ansys.*

Актуальность исследования напряженно-деформированного состояния при укладке морского трубопровода

Строительство и проектирование морских трубопроводов ОАО «Газпром» в настоящее время выполняется в соответствии с требованиями морского стандарта СТО Газпром 2-3.7-050-2006 (DNV-OS-F101) и СП 378.1325800.2017.

Согласно требованиям этих стандартов, расчёт напряженно-деформированного состояния (НДС) трубопровода для всех режимов укладки при строительстве, является обязательным элементом проектных работ. По результатам такого расчёта определяется проектная толщина трубопровода, рассчитываются технологические карты укладки. Однако методы и алгоритмы требуемого расчёта НДС при укладке как необетонированных трубопроводов, так и трубопроводов с бетонным утяжеляющим покрытием данными стандартами не регламентированы.

В проектной практике Российской Федерации для расчета напряжений при укладке использовали зарубежное специализированное программное обеспечение ‘‘OFFPIPE’’. Ввиду наложенных санкций, доступ к лицензионному продукту стал невозможен или проблематичен, а аналогов отечественного производства в данный момент не существует.

В связи с этим, предлагается использовать универсальную программную систему для анализа методом конечных элементов Ansys Workbench, пользующуюся большим спросом и хорошей сходимостью результатов. Ansys позволяет построить модель упругой балки трубчатого сечения, учесть необходимые силы и давления, действующие в процессе укладки, проанализировать возникающие напряжения, сравнив их с допустимыми.

Технология укладки и наиболее опасные места трубопровода с точки зрения прочности

При укладке плеть испытывает значительные изгибные напряжения (рис. 1), наибольшие значения которых возникают на участке трубы, находящейся между точкой схода с баржи и дном моря, а именно на выпуклом или вогнутом участке кривой. Напряжения на вогнутом участке регулируют с помощью натяжных устройств, а на выпуклом ограничиваются стингером. С увеличением диаметра трубопровода или глубины моря применяют более мощные системы натяжения и увеличивают габариты стингера (радиус кривизны и длину) [1].

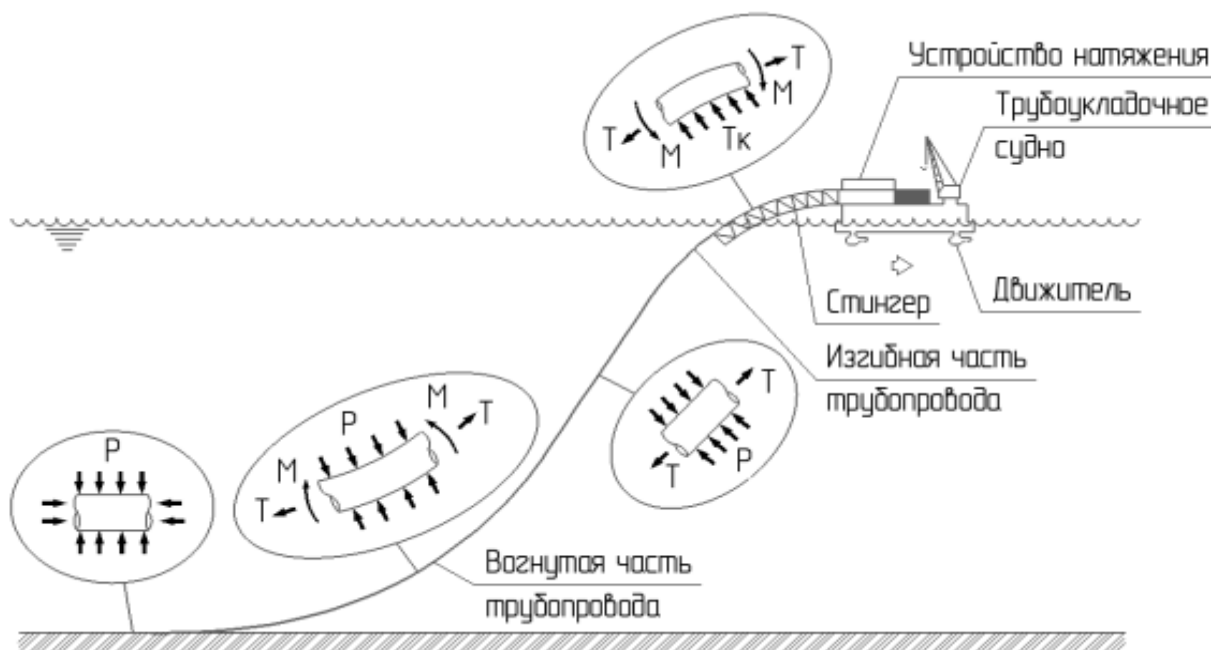


Рисунок 1. Схема напряжений, возникающий при укладке S-методом

Аналитическое решение напряженно-деформированного состояния при укладке S-методом

В отечественной и зарубежной литературе приводятся формулы для расчета геометрии укладки и напряжений, возникающих в любой точке, на основе науки сопротивления материалов [2], [3].

На практике, при расчёте процесса укладки морских трубопроводов, особенно на большие глубины, требуется численно решать двухточечную задачу Коши в условиях высокой жесткости полученной системы дифференциальных уравнений, а также в условиях неединственности и неавтономности получаемого решения. Решение аналитическим путём представляет большую сложность. Необходимо написать программу на языке программирования, которая описывала бы упругую форму провисающего трубопровода, решая систему нелинейных дифференциальных уравнений.

Ввиду этого, предлагается методика анализа укладки S-методом с помощью расчёта геометрии по несложным математическим формулам и дальнейшему моделированию в программной системе Ansys Workbench.

Расчёт геометрии трубопровода ‘Каменномысское-море’ при укладке S-методом

Параметры исследуемого трубопровода с обетонированным покрытием представлены в таблице 1.

Таблица 1.

Параметры исследуемого морского трубопровода

Наименование параметра	Величина	Размерность
Наружный диаметр стальной трубы	1067	мм
Толщина стенки трубы	22,2	мм
Плотность стали	7850	кг/м ³
Толщина бетонного покрытия	100	мм
Плотность бетонного покрытия	3250	кг/м ³
Класс прочности стали по API 5L	X65	
Предел текучести стали	450	МПа
Предел временного сопротивления	535	МПа
Модуль упругости стали	206000	МПа
Коэффициент Пуассона	0,3	

Профиль морского дна в данном расчете принимается параллельный поверхности воды, но может быть изменен.

По отчёту инженерно-гидрометеорологических изысканий течение и волнение в данном регионе, в момент укладки (летний период), отсутствует. Укладку производят в маловетренную или безветренную погоду. Плотность воды: $\rho_{ж} = 1050$ кг/м³. Глубина акватории от 8м до 20м.

Алгоритм расчета предварительной геометрии:

1) Площадь поперечного сечения металлической трубы:

$$F = \frac{\pi}{4} (D_{н}^2 - D_{вн}^2) = \frac{\pi}{4} \cdot (1,067^2 - 1,023^2) = 0,0722 \text{ м}^2. \quad (1)$$

2) Момент сопротивления металлической трубы:

$$W = \frac{\pi}{32D_{н}} (D_{н}^4 - D_{вн}^4) = \frac{\pi}{32 \cdot 1,067} \cdot (1,067^4 - 1,023^4) = 0,0185 \text{ м}^3. \quad (2)$$

3) Момент инерции металлической трубы:

$$J = \frac{\pi}{64} (D_{н}^4 - D_{вн}^4) = \frac{\pi}{64} \cdot (1,067^4 - 1,023^4) = 0,0099 \text{ м}^4. \quad (3)$$

4) Минимальная сила натяжения определяется по формуле [3]:

$$T \geq q_{в} H_0 = 12\,671 \cdot 20 = 253\,420 \text{ Н}, \quad (4)$$

$$\text{где } q_{в} = \rho_{в} g V_{погр} = 1050 \cdot 9,81 \cdot 1,23 = 12\,671 \frac{\text{Н}}{\text{м}}.$$

5) Минимальный радиус стингера [4]:

$$r_s \geq \frac{EJ}{W([\sigma] - \frac{N}{F})} = r_{min} = \frac{206\,000 \cdot 0,0099}{0,0185 \cdot (450 - \frac{0,3}{0,0722})} = 250 \text{ м}. \quad (5)$$

6) Высота концевой опоры стингера от ватерлинии ТУС [4]:

$$h_s = r_s \cdot \left(1 - \cos\left(\frac{l_s}{r_s}\right)\right) = 250 \cdot \left(1 - \cos\left(\frac{40}{250}\right)\right) = 3,2 \text{ м}. \quad (6)$$

7) Угол наклона в точке схода трубопровода со стингера (для случая, когда начальный угол наклона стингера 6°):

$$\beta = \alpha + \frac{l_s}{r_s} \cdot 57,3^\circ = 6 + \frac{40}{250} \cdot 57,3^\circ = 15,2^\circ. \quad (7)$$

8) Длина провисающей части трубопровода (для случая, когда начальный угол наклона стингера 6° и глубина моря в месте укладки 20м) [4]:

$$l = \frac{H - h_s}{1 - \cos\beta} \sin\beta = \frac{20 - 3,2}{1 - \cos 15,2^\circ} \cdot \sin 15,2^\circ = 125,91 \text{ м}. \quad (8)$$

Моделирование укладки в Ansys Workbench

Зная значения, посчитанные по формулам(), строится предварительная S-кривая в любой другой CAD программе (или в модуле “Geometry” ansys).

Далее геометрия импортируется в Ansys Workbench, создается балочное трубчатое сечение и прикладываются нагрузки (рис. 4): гравитация, давления веса бетона, выталкивающая сила воды, гидростатическое давление воды и сила натяжения. Указываем закрепления на барже, стингере и поверхности морского дна.

В результате расчета рассмотрим возникающий момент (рис. 3), продольную силу (рис. 4) и суммарные напряжения (рис. 5).

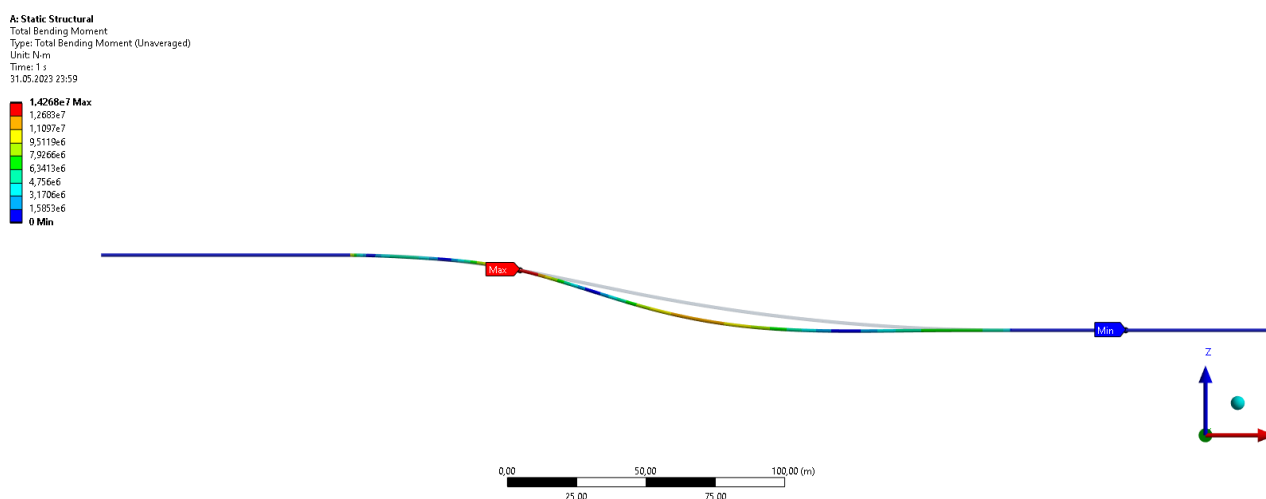


Рисунок 3 – Изгибающие момент

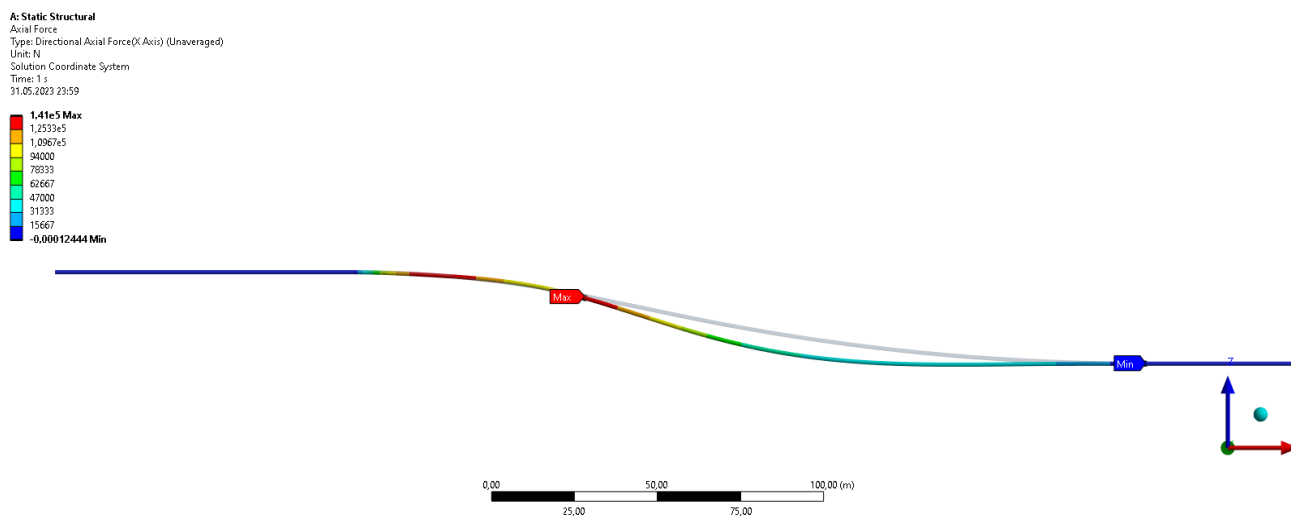


Рисунок 4 – Продольная сила

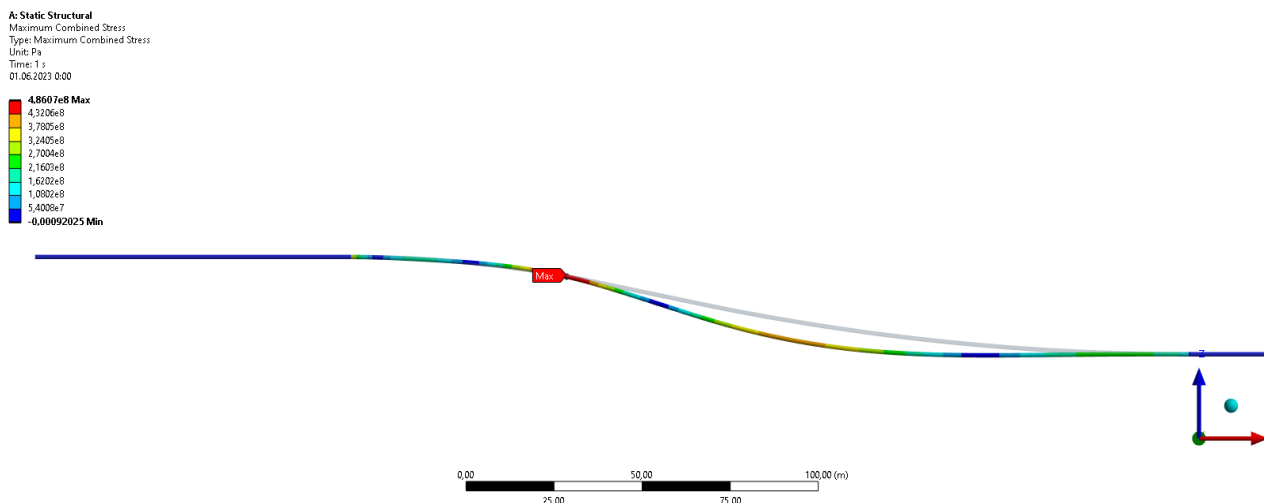


Рисунок 5 – Суммарные напряжения

Таким образом, в процессе укладки трубопровода S-методом возникает изгибающий момент, максимально равный 14 268 000 Н·м и продольная растягивающая сила, максимально равная 141 000 Н. Суммарные напряжения для данного случая составляют 436 МПа.

Как видно из рисунков, самым опасным местом с точки зрения прочности является конец стингера и точка схода трубопровода с него. Суммарные напряжения практически полностью создаются изгибающим моментом.

Заключение

Согласно требованиям стандартов СТО Газпром 2-3.7-050-2006 (DNV-OS-F101) и СП 378.1325800.2017, расчёт напряженно-деформированного состояния (НДС) трубопровода для всех режимов укладки при строительстве, является обязательным элементом проектных работ. Однако методы и алгоритмы требуемого расчёта НДС при укладке данными стандартами не регламентированы.

Была предложена методика расчета напряженно-деформированного состояния трубопровода при его укладке S-методом. На примере газопровода “Каменномысское-море” произведен анализ НДС. Определены оптимальные

параметры укладки (для случая, когда глубина моря 20м): радиус стингера 250м, длина стингера 30м, угол наклона стингера 6° , сила натяжения 280 000 Н.

Список литературы:

1. Мовсумадзе Э.М., Мастобаев Б.Н., Мастобаев Ю.Б. Морская нефть. Развитие технических средств и технологий. СПб.: Недра, 2005. 236 с.
2. Ю.А. Горяинов, А.С. Федоров, Г.Г. Васильев. Морские трубопроводы. Недра, 2001 – 131с.
3. И.Ю. Морин, В.М. Ковех. Особенности расчёта напряженно - деформированного состояния морских обетонированных газопроводов, Сборник научных статей аспирантов и соискателей ООО «Газпром ВНИИГАЗ», стр. 50 – 54, 2011.
4. Васильев Г.Г., Горяинов Ю.А., Беспалов А.П. Сооружение морских трубопроводов: учеб. для вузов. М.: Изд-во РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2015. 200 с.
5. СТО Газпром 2–3.7–050-2006. Морской стандарт DNV-OS-F101 Подводные трубопроводные системы. М.: ИРЦ Газпром, 2006. 430 с
6. Рекомендации по проектированию и строительству морских подводных нефтегазопроводов. Р 412-81. М., ВНИИСТ, 1981.
7. Руководство по технологии укладки и заглубления трубопроводов через водохранилища и крупные реки. Р 537-84. М., ВНИИСТ, 1984.