

Портнова София Эдуардовна, студент,  
Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II  
Portnova Sofia Eduardovna, student,  
Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University

## СООРУЖЕНИЕ ПОДВОДНЫХ ПЕРЕХОДОВ МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ В ОСЛОЖНЁННЫХ УСЛОВИЯХ CONSTRUCTION OF UNDERWATER CROSSINGS OF MAIN PIPELINES UNDER COMPLICATED CONDITIONS

**Аннотация.** Рассмотрены методы сооружения магистральных трубопроводов в осложнённых условиях с акцентом на подводные переходы. Для трубопровода диаметром 1420 мм из стали 12Г2С ( $P = 5,0$  МПа) определена толщина стенки, проверена устойчивость против всплытия и оценено напряжённо-деформированное состояние при укладке с поверхности воды. Установлено, что расчётные изгибающие напряжения существенно превышают допустимые, что требует дополнительных технологических мер. Результаты подтверждены моделированием методом конечных элементов в Ansys.

**Abstract.** Methods for constructing main pipelines under complicated conditions are considered, with an emphasis on underwater crossings. For a pipeline with a diameter of 1420 mm made of 12G2S steel ( $P = 5.0$  MPa), the wall thickness was determined, buoyancy stability was checked and the stress-strain state during laying from the water surface was assessed. It was found that the calculated bending stresses significantly exceed the permissible values, which requires additional technological measures. The results are confirmed by finite-element modelling in Ansys.

**Ключевые слова:** Магистральный трубопровод, подводный переход, устойчивость против всплытия, балластировка, укладка, напряжённо-деформированное состояние.

**Keywords:** Main pipeline, underwater crossing, buoyancy stability, ballasting, laying, stress-strain state.

Магистральные трубопроводы являются ключевым звеном системы транспортировки углеводородов. Истощение легкодоступных месторождений вовлекает в разработку территории со сложными природно-климатическими и инженерно-геологическими условиями – районы Крайнего Севера, заболоченные зоны, акватории рек и морей. Наибольшую сложность представляют подводные переходы, где на трубопровод действуют не только традиционные нагрузки, но и выталкивающая сила, гидродинамическое воздействие потока и значительные изгибающие напряжения, возникающие в процессе укладки [1, 2]. Целью работы являются систематизация методов сооружения таких переходов и расчёт конкретного подводного участка.

По характеру воздействия нагрузки на трубопровод разделяют на постоянные (масса трубы, изоляции и грунта, гидростатическое давление), временные (внутреннее давление, вес продукта, температурные и монтажные воздействия) и особые (сеймика, оползни, размыв русла). Для обводнённых участков и подводных переходов определяющим является выталкивающая сила, для компенсации которой применяют балластировку и анкерное закрепление. К балластирующим устройствам относятся чугунные и железобетонные кольцевые грузы, сплошное обетонирование и навешиваемые пригрузы; анкерные устройства передают выталкивающие усилия в прочные слои грунта, работая по принципу защемления. Выбор способа выполняется на основе технико-экономического сравнения с учётом инженерно-геологических условий трассы и диаметра трубопровода [3, 4].



Укладку подводного участка выполняют траншейными и бестраншейными способами. К траншейным относят укладку с плавучих средств, укладку со льда и протаскивание по дну; к бестраншейным – горизонтально-направленное бурение (ГНБ) и микротоннелирование, которые не нарушают русловой режим реки. При глубоководной укладке методом протаскивания или свободного погружения для снижения напряжений применяют подвижные понтоны, разгружающие опасные сечения [5, 6].

Расчётная часть выполнена для трубопровода диаметром  $D_n = 1420$  мм из стали 12Г2С с рабочим давлением  $P = 5,0$  МПа, пределом прочности

$\sigma_{\text{вр}} = 430$  МПа, коэффициентом условий работы  $m = 0,66$  и глубиной перехода 16 м. Расчётное сопротивление металла труб составило  $R_1 = 193,06$  МПа. С учётом продольных осевых сжимающих напряжений (коэффициент двухосного напряжённого состояния  $\psi_1 = 0,89$ ) толщина стенки определяется по формуле

$$\delta = \frac{npD_n}{2(R_1 + np)}, \quad (1)$$

и составляет 22,02 мм; ближайшее значение по сортаменту – 23 мм – принято за окончательное. Проверка устойчивости против всплытия по величине дополнительной пригрузки на 1 м трубы дала  $B = -4502,91$  Н/м  $< 0$ , то есть собственного веса трубы и продукта достаточно для обеспечения проектного положения, и пригрузка не требуется.

Оценка напряжённо-деформированного состояния при укладке с поверхности воды (S-метод) выполнена по расчётной схеме с распределёнными нагрузками на надводном и подводном участках  $q_1 = -6914,07$  Н/м и  $q_2 = 7913,27$  Н/м. Длина провисающего участка составила  $s = 426,51$  м, а максимальные изгибающие напряжения достигли  $\sigma_{\square_{\text{ax}}} = 4125$  МПа.

Моделирование методом конечных элементов в Ansys подтвердило характер распределения напряжений по длине трубопровода (рисунок 1). Основные результаты расчёта сведены в таблице 1.

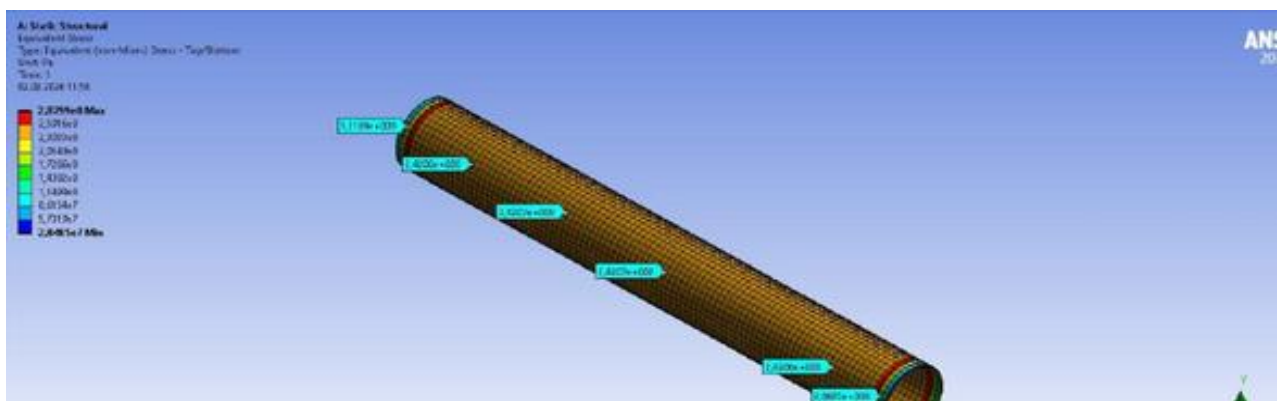


Рисунок 1. Распределение эквивалентных напряжений по длине трубопровода (Ansys)

Таблица 1

Результаты расчёта подводного перехода

| Параметр                                                                | Значение                |
|-------------------------------------------------------------------------|-------------------------|
| Расчётное сопротивление металла труб $R_1$ , МПа                        | 193,06                  |
| Толщина стенки: расчётная / принятая, мм                                | 22,02 / 23              |
| Дополнительная пригрузка $B$ , Н/м                                      | -4502,91 (не требуется) |
| Длина провисающего участка $s$ , м                                      | 426,51                  |
| Максимальные изгибающие напряжения $\sigma_{\square_{\text{ax}}}$ , МПа | 4125                    |
| Допускаемые напряжения $0,9 \cdot \sigma_{\text{вр}}$ , МПа             | 459                     |



Высокие изгибающие напряжения объясняются большой длиной провисающего участка (более 400 м), которая напрямую зависит от малой разности нагрузок  $q_1$  и  $q_2$ , а также отсутствием поддерживающих устройств. Для обеспечения прочности при укладке предложены: регулировка соотношения нагрузок за счёт ускоренного заполнения трубы водой или установки временных понтонов, применение трубы с увеличенной толщиной стенки (рост момента сопротивления) и использование промежуточных понтонов для сокращения длины свободного провиса.

Таким образом, систематизированы методы сооружения подводных переходов и выполнен расчёт перехода трубопровода Ø1420 мм: определены толщина стенки, обеспечена устойчивость против всплытия и выявлено невыполнение условия прочности при укладке, требующее дополнительных технических решений. Полученные результаты могут использоваться при проектировании подводных переходов магистральных трубопроводов в аналогичных условиях.

*Список литературы:*

1. СП 36.13330.2012. Магистральные трубопроводы: актуализированная редакция СНиП 2.05.06-85\*. – Москва: Стандартинформ, 2013. – 93 с.
2. Березин В. Л. Сооружение подводных переходов магистральных трубопроводов / В. Л. Березин, П. П. Бородавкин, И. Я. Захаров, Э. М. Ясин. – Москва: ВНИИОЭНГ, 1974. – 74 с.
3. Бородавкин П. П. Подводные трубопроводы / П. П. Бородавкин, В. Л. Березин, О. Б. Шадрин. – Москва: Недра, 1979. – 415 с.
4. Бородавкин П. П. Прочность магистральных трубопроводов / П. П. Бородавкин. – Москва: Недра, 1984. – 245 с.
5. Иванов В. А. Сооружение подводных переходов магистральных трубопроводов: курс лекций / В. А. Иванов, С. В. Кузьмин, В. Ф. Крамской, С. Ю. Торопов. – Тюмень: ТюмГНГУ, 2003. – 217 с.
6. Мустафин Ф. М. Технология сооружения газонефтепроводов / Ф. М. Мустафин, Л. И. Быков, Г. Г. Васильев [и др.]. – Уфа: Нефтегазовое дело, 2007. – 632 с.
7. Шарафутдинов З. З. Строительство переходов магистральных трубопроводов через естественные и искусственные препятствия / З. З. Шарафутдинов, В. И. Парижер, Д. Н. Сорокин [и др.]. – Новосибирск: Наука, 2013. – 339 с.
8. Вансович К. А. Численные методы исследования напряжённо-деформированного состояния трубопроводов и резервуаров: учебное пособие / К. А. Вансович. – Омск: ОмГТУ, 2021. – 130 с.

