



# Исследование напряженно-деформированного состояния всплывшего участка газопровода на болоте, балластированного железобетонными утяжелителями

Зарипов Р.М.<sup>1</sup>, Масалимов Р.Б.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт механики им. Р.Р. Мавлютова УФИЦ РАН, Уфа,

<sup>2</sup>Уфимский государственный нефтяной технический университет Уфа

## Введение

Трубопроводы, проложенные на болотах и заболоченной местности, пересекающие различные водные преграды (реки, водохранилища, подводные морские переходы) и в карстовой зоне [1-5], деформируясь с водонасыщенным грунтом, подвергаются обводнению. Несмотря на балластировку трубопроводов железобетонными утяжелителями, закрепление их в грунте анкерными устройствами и замену гладких труб обетонированными трубами при сооружении и капитальном ремонте при их эксплуатации происходит всплытие труб. Всплывшие участки газопровода на болоте, балластированные железобетонными утяжелителями, квалифицируются как «поврежденные» и выводятся из эксплуатации [1,2]. Целью исследований является установление влияния на всплытие газопровода на болоте веса утяжелителей, изменение величин физико-механических характеристик грунта за счет его обводнения, и параметров эксплуатации газопровода.

## 1. Постановка задачи о напряженно-деформированном состоянии всплывшего участка газопровода на болоте, балластированного утяжелителями и ее решение методом конечных элементов в перемещениях

Профиль трассы рассматриваемого участка газопровода на болоте, балластированного утяжелителями, состоит из затопленной подводной части, в которой на трубу установлены железобетонные утяжелители и прилегающих к ней подземных частей, где труба находится в траншее, засыпанная грунтом при сооружении газопровода. Моделирование НДС (напряженно-деформированного состояния) рассчитываемого участка газопровода осуществляется одномерной стержневой системой, состоящей из полых стержней трубчатого сечения и узлов их сопряжения [3,5]. Их количество задается в зависимости от профиля трассы газопровода и условий его эксплуатации.

НДС стержневого элемента описывают нелинейные кинематические и физические зависимости, нелинейные дифференциальные уравнения равновесия [3,5], которые учитывают условия нагружения в затопленной части и прилегающих к ней подземных частях, в которых труба совместно деформируется с грунтом, а также воздействие внутреннего давления и температурных напряжений, которое вызывает дополнительный изгиб трубопровода [3-5,6]. Далее, вышеупомянутые кинематические и физические зависимости, нелинейные дифференциальные уравнения равновесия преобразуются в нормальную систему обыкновенных нелинейных дифференциальных уравнений. В каждом узле сопряжения стержневых элементов составляются уравнения равновесия с учетом действия веса утяжелителей в болотной воде и граничных условий, поставленных в начале конце рассчитываемого участка газопровода. Эти уравнения равновесия преобразуются в системы алгебраических уравнений, в которых неизвестными являются компоненты обобщенных перемещений узлов [3,5,7]. Используя решения преобразованной системы алгебраических уравнений, составляется система дифференциальных уравнений для стержневых элементов. Решение этих систем методом ортогональной прогонки Годунова определяет компоненты вектора обобщенных усилий и перемещений в узловых точках, полученных разбиением на части отрезка интегрирования, длины стержневого элемента. Поскольку решение системы дифференциальных уравнений осуществляется для всех стержней, поэтому полученные решения будут представлять полную картину деформирования газопровода на болоте, балластированного утяжелителями.

## 2. Составление базы данных расчета

В затопленной части выбирается тип утяжелителей, их количество и расстояния между ними задаются в зависимости от выталкивающей силы воды, которая в свою очередь, зависит от концентрации молей в болотистой воде [1]. В прилегающих подземных частях по информации, которая содержится в проектно-исполнительской документации трассы газопровода, для каждого стержневого элемента вводятся значения следующих физико-механических характеристик грунтов и трубы: модулю деформации грунта-засыпки (

$E_{gr.zas}$ ); удельному весу грунта (скелета) засыпки, соответственно ( $\gamma_{gr.zas}, \gamma_{yd.zas}$ ); углу внутреннего трения и сцеплению, соответственно ( $\phi_{gr}, c_{gr}$ ); модулю деформации и коэффициенту Пуассона грунта-основания, соответственно ( $E_{gr.osn}, \mu_{gr.osn}$ ); обобщенному коэффициенту касательного сопротивления и несущей способности грунта основания, соответственно ( $c_{xo}, R_{gr.osn}$ ); категории участка; наружному диаметру и толщине стенки трубы, соответственно ( $D_H, \delta$ ); пределу текучести и пределу прочности стали трубы, соответственно ( $R_2^H, R_1^H$ ); глубине заложения от верха засыпки до нижней образующей трубы и от верха засыпки до уровня воды, соответственно ( $h_x, h_y$ ) [1, 3-5].

### 3. Анализ напряженно-деформированного состояния участка газопровода на болоте, балластированного утяжелителями и установление основных причин его всплытия

1. Анализ напряженно-деформированного состояния участка газопровода на болоте, балластированного утяжелителями, показал, что причиной его всплытия являются: воздействие температурных напряжений; неравномерное неодинаковое проседание трубы в грунт на подземных частях, находящиеся слева и справа от размывтой оголенной балластированной части; уменьшение веса утяжелителей в воде, за счет роста величины выталкивающей силы воды вследствие увеличения удельного веса воды, зависящего от концентрации растворенных молей в воде. Найдены критические значения параметров эксплуатации, при достижении которых изменяется форма изгиба трубы, предшествующей ее всплытию.

2. Расчеты напряженно-деформированного состояния участка газопровода на болоте, балластированного железобетонными утяжелителями, по инженерным формулам, в которых воздействие последних на трубу задается распределенной внешней поверхностной нагрузкой, дают удовлетворительные результаты только для случая, когда имеет место равномерная одинаковая осадка трубы в грунт в прилегающих подземных частях. В этом случае начальный этап выпучивания трубы со стрелой изгиба, направленной вверх, которое соответствует первому этапу всплытия трубы, определяется параметрами эксплуатации газопровода.

В случае, когда имеет место неравномерная неодинаковая осадка трубы в грунте на прилегающих подземных частях, то результаты расчета по инженерным формулам указывают на выпучивание трубы со стрелой изгиба, направленной вверх, независимо от параметров эксплуатации. В этом случае расчет по инженерным формулам дает некорректное решение задачи.

3. Установленные в данной статье основные причины, которые обуславливают всплытие балластированных магистральных трубопроводов в условиях болот и обводненной местности (изменении грунтовых условий и уменьшение веса утяжелителей, за счет роста величины выталкивающей силы воды, вследствие увеличения удельного веса воды с растворенными в ней молями) сложно устранить в сложно-геологических условиях их эксплуатации. Поэтому более перспективным является широко применяемые в последние годы технологии, в которых балластированные трубы при сооружении и капитальном ремонте заменяются обетонированными трубами. Как было указано в работе [5], имелись случаи всплытия обетонированных труб на подводных переходах морского газопровода через Байдарацкую губу на Ямале. Поэтому в дальнейшем необходимо выполнить исследования, посвященные на выявление причин возможного всплытия обетонированных труб, применяемых в технологии сооружения на болоте, в зависимости от сложно-геологических условий эксплуатации газопроводов.

### Список литературы

- [1] Типовые расчеты при проектировании, строительстве и ремонте газонефтепроводов: Учеб. пособие / Л.И. Быков, Ф.М. Мустафин, С.К. Рафиков и др. / СПб: Недра, 2011. – 748 с.
- [2] Васильев Г.Г., Горяинов Ю.А., Саксаганский А.И. Достоинства и недостатки современных подходов к балластировке подводных переходов // НГС. – 2012. – №1. – С. 30–37.
- [3] Зарипов Р.М., Масалимов Р.Б. Использование компенсаторов в подводном участке морского газопровода для предотвращения его всплытия // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2023. – Т. 334. – № 2. – С. 196–205.
- [4] Расчет магистральных трубопроводов на прочность и устойчивость. Справочное пособие / А.Б. Айнбиндер, А.Г. Камерштейн / М.: Недра, 1982. – 341 с.
- [5] Зарипов Р.М., Масалимов Р.Б. Численное моделирование напряженно-деформированного состояния подводного морского газопровода с учетом разжижения грунта и параметров эксплуатации // Известия Российской академии наук. Механика твердого тела. – 2023. – № 4. – С. 152–166.
- [6] Ильгамов М.А. Модель всплытия подводного трубопровода. Физика. Технические науки // ДАН. – 2022. – Т. 504. – С. 12–16.
- [7] Методы и алгоритмы расчета пространственных конструкций на ЭВМ ЕС / В.И. Мяченков, В.П. Мальцев / М.: Машиностроение, 1984. – 280 с.