

Современные технологии расчета магистральных трубопроводов

*Д.т.н., профессор В.В. Лалин;
аспирант А.В. Яваров**

ГОУ Санкт-Петербургский государственный политехнический университет

Основные месторождения природного газа в нашей стране находятся в районах Крайнего севера за тысячи километров от основных потребителей. Это является причиной наличия в нашей стране уникальной газотранспортной системы, аналогов которой нет в мире. Высокая протяженность линейных сооружений и, как следствие, пересечение различных климатических зон вызывают необходимость учета специфических видов нагрузок и воздействий на сооружения.

При проектировании трубопроводных систем важное место в оценке напряженно-деформированного состояния конструкций занимают анализ совместной работы сооружения и грунтового массива и учет значительных температурных перепадов.

Грунтовой массив выступает в роли как основания в случае надземной прокладки, балочных переходов, так и вмещающей среды для трубопроводов подземной прокладки.

Температурное воздействие вызывает: температурные напряжения в стенках трубопровода, заземление трубопровода на границе мерзлых и талых пород, силы морозного пучения грунтов.

В местах выхода трубопровода на дневную поверхность происходит изменение характера воздействия на газопровод. В частности, имеет место значительный температурный перепад при переходе от мерзлого массива пород с температурами, равными минус 2-4°C, к воздушной среде, минимальная температура которой достигает в зимний период в районах Крайнего севера минус 56°C, а в летний период - плюс 39°C [1].



Рисунок 1. Выход из строя свайной опоры



Рисунок 2. Увеличение пролета вследствие разрушения опоры

Воздействие данных факторов на надземную прокладку газопровода приводит к выводу из строя свайных опор (рис. 1) и, как следствие, к увеличению пролетов, что может привести к возникновению ветрового резонанса (рис. 2).

Использование в практике проектирования мощных программных средств конечно-элементного моделирования позволило перейти на качественно новый уровень в формировании расчетных схем и к отражению реальных условий работы конструкций газопроводов, в частности, появилась возможность учитывать нелинейные свойства материалов конструкций и грунтов основания [2]. В данной статье рассматривается решение задач расчета магистральных трубопроводов с использованием программного комплекса «SOFiSTiK». Выбор программного продукта был обусловлен тем, что он позволяет производить расчет подземных и надземных сооружений с учетом сложных геотехнических условий.

Объектами исследования были участок надземной прокладки магистрального газопровода и балочный переход трассы Мессояха–Норильск.

Участок надземной прокладки магистрального газопровода

При построении модели была задана надземная прокладка газопровода длиной 140 м с компенсационным участком (рис. 3). Расстояние между опорами составляет 9-10 м. При конструировании

надземной прокладки заданы различные типы свайных опор: неподвижная четырехсвайная опора, продольно-подвижные опоры с длиной ригеля 1,45 м и 0,65 м, соответственно.

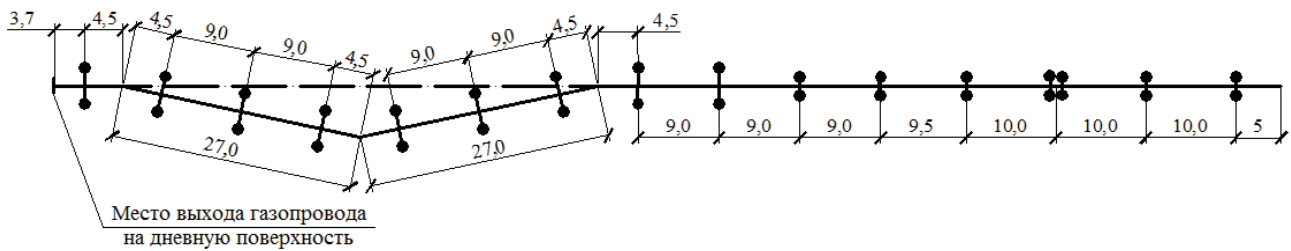


Рисунок 3. Схема надземной прокладки газопровода

Глубина сезонного оттаивания грунтов составляет 1,8 м, а величина заглубления свай опор трубопровода – 8 м. Заглубление свай в мерзлую толщу на глубину 6,2 м и наличие сравнительно небольшой вертикальной нагрузки 1,6 кН/м на трубопровод позволяют рассматривать сваи как сваи-стойки (рис. 4).

Труба газопровода моделировалась стержневыми элементами (рис. 5). Построение расчетной схемы надземной прокладки магистрального газопровода производилось в графическом препроцессоре SOFiPLUS-X, интегрированном в систему автоматизированного проектирования AutoCAD. С помощью стандартных инструментов AutoCAD был создан каркас расчетной схемы. Далее на его основе с помощью специальных инструментов – структурных линий, структурных площадей – была задана геометрия пространственной системы.

Характеристики поперечных сечений также задавались в SOFiPLUS-X с использованием нормативных документов, действующих на территории РФ. Параллельно с установлением поперечных сечений в отдельную группу «Working tube» были выделены элементы системы, соответствующие рабочей трубе магистрального трубопровода.

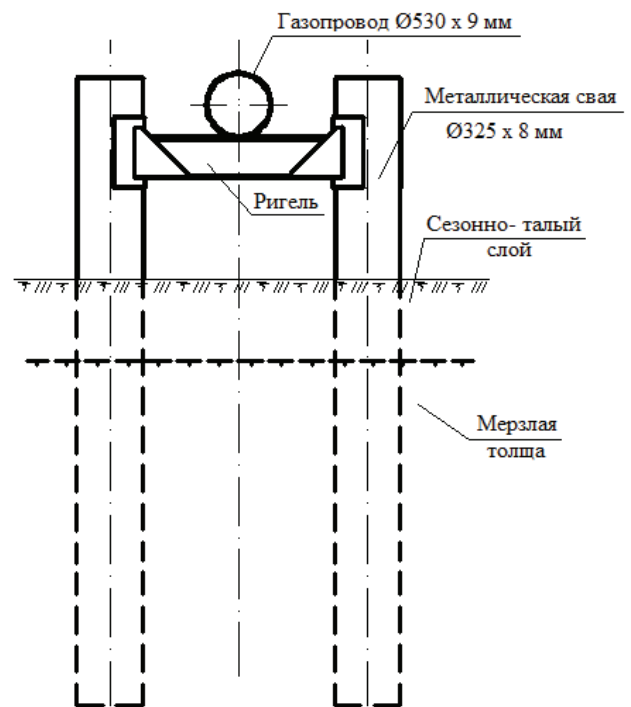


Рисунок 4. Общий вид системы газопровод-опора-мерзлое основание



Рисунок 5. Расчетная схема надземной прокладки газопровода

После формирования геометрии стержневой системы и установления характеристик поперечных сечений построенная модель была экспортирована в SOFiSTiK. При экспорте была построена конечно-элементная модель системы с заданными параметрами генерации сетки элементов.

В месте выхода трубопровода на дневную поверхность задавалась скользящая заделка с фиксацией трех углов поворота вокруг координатных осей. В точках контакта трубопровода с неподвижной опорой задавались условия жесткого защемления. В точках контакта трубопровода с продольно-подвижными опорами учтена возможность его проскальзывания относительно опорного ригеля. При задании системы «трубопровод–свайные опоры» была учтена несоосность оси трубопровода и опорного ригеля. В точках входа опорных свай в мерзлую толщу устанавливалось жесткое защемление. Массив талых пород основания в расчетную схему не включался.

Были заданы два расчетных сочетания нагрузок. Первое сочетание соответствует максимальному воздействию на трубопровод в зимний период времени и включает в себя: собственный вес материала трубы $\varnothing 530 \times 9$ мм, вес природного газа, вес от вспомогательных технических устройств, ветровую, ледовую, снеговую нагрузки, температурный перепад, равный 54°C . Второе расчетное сочетание нагрузок характеризует максимальное воздействие на газопровод в летний период времени и включает в себя: собственный вес материала трубы $\varnothing 530 \times 9$ мм, вес природного газа, вес от вспомогательных технических устройств, ветровую нагрузку, температурный перепад, равный 37°C . Для удобного формирования PCY использовался модуль параметрического ввода данных TEDDY, позволивший задать нагрузки для ранее заданной группы элементов «Working tube» без последовательного выделения трубы газопровода на всем участке трассы.

Таблица 1. Результаты расчетов

Нагрузки и воздействия	Перемещение V [мм]	Изгибающий момент M_y [кНм]	Изгибающий момент M_z [кНм]	Перерезывающая сила V_y [кН]	Перерезывающая сила V_z [кН]
РСН 1	-47,3	0,955	18,9	0,406	10,2
РСН 2	30,6	0,909	18,9	0,404	9,9
Температурное воздействие	-47,6	0,04	0,119	1,64	0,0017

В табл. 1 приведены максимальные значения перемещений и внутренних усилий трубопровода для расчетных сочетаний нагрузок. Третья строка таблицы соответствует решению задачи только о температурном воздействии на систему в зимний период. Вид эпюры изгибающих моментов M_z для первого расчетного сочетания нагрузок приведен на рис. 6.

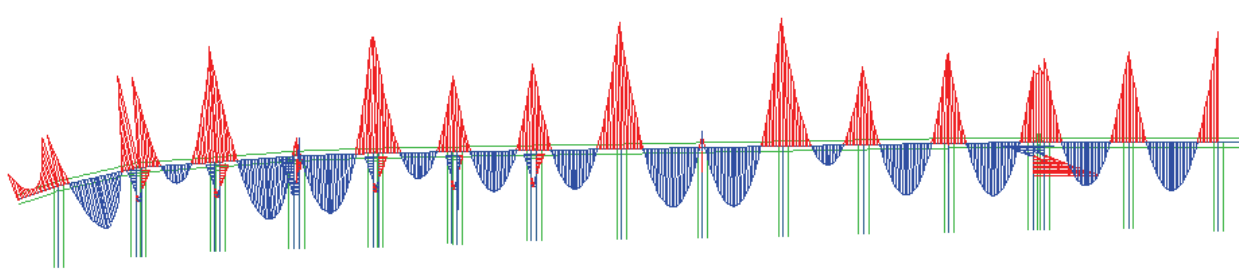


Рисунок 6. Проекция на плоскость YZ эпюры изгибающих моментов M_z для РСН 1

Проведенные расчеты показывают, что при переходе от зимнего к летнему периоду времени трубопровод начинает работать на растяжение, о чем свидетельствует смена знака у вектора перемещений. Изгибающие моменты M_y и M_z практически не меняются. Результаты, приведенные в третьей строке таблицы, подтверждают, что температурное воздействие дает решающий вклад в продольные перемещения трубопровода и практически не влияет на изгибающие моменты.

Незначительные значения изгибающих моментов свидетельствуют о том, что наибольший вклад в напряженное состояние стенок трубопровода вносит рабочее давление продукта. При выполнении расчетов на рабочее давление в соответствии со СНиП 2.05.06-85* «Магистральные трубопроводы» получаются напряжения, соответствующие изгибаемым моментам 500-600 кНм.

Балочный переход магистрального газопровода через реку

Второй объект исследования представляет собой балочный переход трассы магистрального газопровода Мессояха-Норильск через реку (рис. 7). Сложные геокриологические условия площадки строительства вызваны расположением перехода на талике и распространением сильно пучинистых грунтов озерно-речного происхождения.

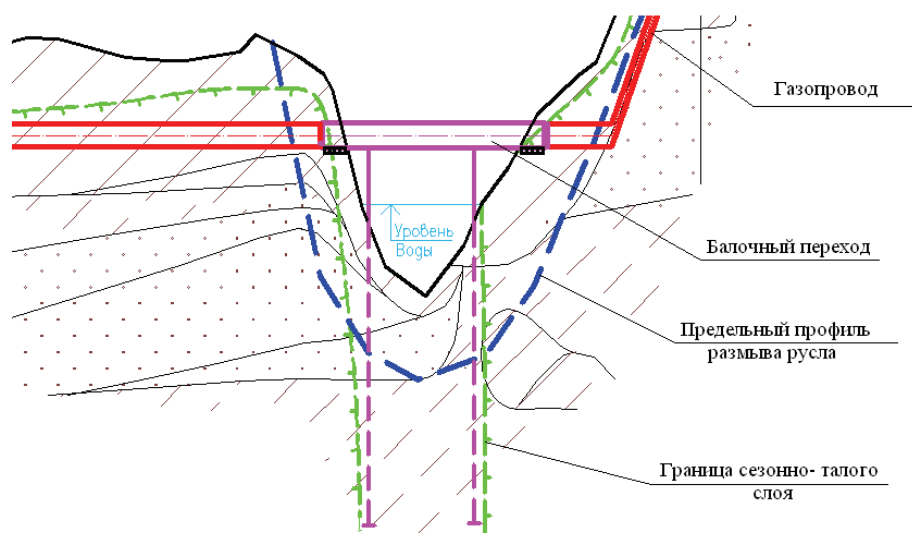


Рисунок 7. Схема балочного перехода через реку

Фундаменты на винтовых сваях из труб $\varnothing 325 \times 8$, установленные в русловой части реки, сложенной тальми несмерзающимися грунтами, работают по принципу висячих свай. Глубина сезонного протаивания грунтов для данного талика составляет 3,2 м. С учетом опыта эксплуатации ранее построенных газопроводов глубина погружения свай была принята равной 8 м.

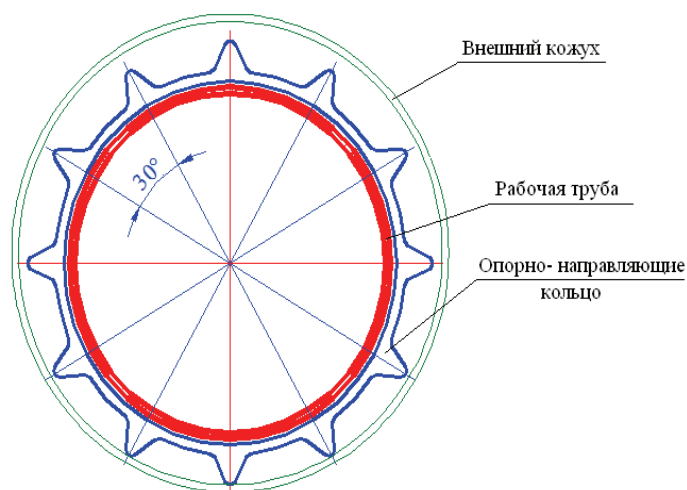


Рисунок 8. Конструкция перехода «труба в трубе»

Построение пространственной расчетной схемы основывалось на тех же принципах, что были использованы для участка надземной прокладки магистрального трубопровода.

Грунтовой массив, сложенный песчано-глинистыми грунтами талика, моделировался с помощью специальных инструментов препроцессора SOFiPLUS-X в рамках упругопластической модели Кулона- Мора. В частности, были заданы две инженерно-геологические колонки, в которых были указаны границы инженерно-геологических элементов и физико-механические свойства грунтов. Скважины были привязаны к глобальной системе координат расчетной схемы. После чего программа интерполировала свойства массива к ближайшим сечениям. В соответствии с требованиями СП 50-102-2003 «Проектирование и устройство свайных фундаментов» для каждого инженерно-геологического элемента были установлены: расчетное сопротивление под нижним концом свай и расчетные сопротивления на боковой поверхности свай. Нелинейные свойства грунтов были заданы в соответствии с моделью Кулона- Мора. Углы внутреннего трения и коэффициенты сцепления задавались на основании проведенных инженерно-геологических изысканий.

В местах контакта трубопровода с мерзлой толщей задавалось жесткое защемление. В точках контакта трубопровода с продольно-подвижными опорами учтена возможность его проскальзывания относительно опорного ригеля. При задании системы «труба в трубе» была учтена несоосность оси трубопроводов и установлены специальные упругие связи, имеющиеся в комплексе SOFiSTiK, для учета совместного деформирования внешней и внутренней труб.

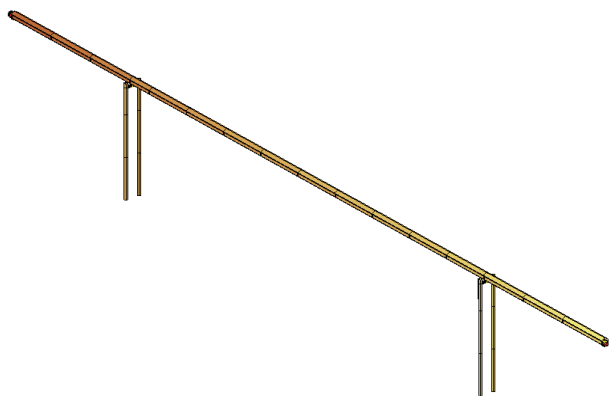


Рисунок 9. Расчетная схема балочного перехода



Рисунок 10. Схема деформирования балочного перехода

Были заданы два расчетных сочетания нагрузок. Первое сочетание соответствует максимальному воздействию на трубопровод в зимний период времени без учета сил морозного пучения и включает в себя: собственный вес материала труб, вес природного газа, вес от вспомогательных технических устройств, ветровую, ледовую, снеговую нагрузки, температурный перепад.

Второе расчетное сочетание нагрузки включает все вышеперечисленные позиции, а также учитывает действие сил морозного пучения на систему «газопровод–свайные опоры–основание». Расчет сил морозного пучения производился в соответствии с требованиями СНиП 2.02.04-88 «Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах».

Результаты численного моделирования представлены в таблице 2, где приведены максимальные значения перемещений, изгибающих моментов и перерезывающих сил для наружной трубы (рис. 10), являющейся главным несущим элементом всей системы.

Таблица 2. Результаты расчетов

Нагрузки и воздействия	Перемещение V [мм]	Изгибающий момент M_y [кНм]	Изгибающий момент M_z [кНм]	Перерезывающая сила V_y [кН]	Перерезывающая сила V_z [кН]
РСН 1 без учета сил морозного пучения	231.9	381.4	194.1	23.8	57.2
РСН 2 с учетом сил морозного пучения	258.8	533.4	303.7	104.7	61.1

Учет сил морозного пучения при задании расчетной схемы приводит к увеличению значения главного вектора перемещений на 10%, изгибающих моментов на 40%, перерезывающие силы увеличиваются до 80 %.

Таким образом, можно отметить следующие итоги работы.

1. Произведено моделирование и расчет совместной системы «Магистральный трубопровод–свайные опоры–талое песчано-глинистое основание» балочного перехода с учетом нелинейных свойств грунтов основания.

2. Существенно упрощен процесс создания расчетных схем участка надземной прокладки и балочного перехода магистрального трубопровода благодаря интеграции популярной САПР AutoCAD и ПК SOFiSTiK.

3. Рассчитан балочный переход магистрального газопровода, смонтированный с применением технологии «труба в трубе», которая моделировалась специальными упругими связями из библиотеки специальных элементов ПК SOFiSTiK.

Результаты, полученные в ходе конечно-элементного анализа, позволили на этапе расчетно-теоретических исследований дать оценку основных принятых конструктивных решений с точки зрения соответствия требованиям нормативных документов.

Литература

1. Харионовский В.В. Надежность и ресурс конструкций газопроводов. М.: Недра, 2000. 272 с.
2. Селезнев В.Е. Основы численного моделирования магистральных трубопроводов / Селезнев В.Е., Алешин В.В., Прялов С.Н. М.: Издательская группа URSS (Editorial URSS), 2000. 178 с.

* Александр Валерьевич Яваров, Санкт-Петербург
Тел. моб.: +7(911)024-10-12; эл. почта: 86_javrik@mail.ru