УДК 622.692.4

К РАСЧЕТУ ШАГА РАССТАНОВКИ ОПОР ИЗ КОНТЕЙНЕРОВ С ГРУНТОВ ПРИ ПРОКЛАДКЕ ПОДЗЕМНОГО ГАЗОНЕФТЕПРОВОДА В УСЛОВИЯХ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ОСТРОВНОЙ МЕРЗЛОТЫ

Ахметов А.Х., Коробков Г.Е., Янчушка А.П.

ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет», Уфа, e-mail: albertahmetov303@gmail.com

В данной статье рассмотрены методологические основы расчета шага расстановки опор из контейнеров с грунтом при прокладке подземного газонефтепровода в условиях островного распространения просадочных многолетнемерзлых грунтов с использованием программного комплекса СТАРТ и методики расчета балочных переходов. Проведен сравнительный анализ полученных результатов расчета шага расстановки опор из контейнеров с грунтом с использованием рассматриваемых методик. Несмотря на то, что в методике расчета балочных переходов не учитывается ряд воздействий окружающих грунтовых условий на трубопровод, методика применима на стадии предпроектной оценки ресурсов и материалов, необходимых для осуществления строительства. Результаты оценки шага расстановки опор по методике расчета балочных переходов меньше аналогичных величин, полученных с использованием программного комплекса СТАРТ, на 24–38 % для нефтепровода и на 37–45 % для газопровода.

Ключевые слова: магистральный трубопровод, модель «трубопровод – грунт», многолетнемерзлый грунт, длина пролета, просадка трубопровода

TO CALCULATION OF THE STEP OF ARRANGEMENT OF SUPPORT FROM CONTAINERS WITH SOIL WHEN LAYING THE UNDERGROUND GAS AND OIL PIPELINE IN DISTRIBUTION TERMS OF ISLAND PERMAFROST

Akhmetov A.Kh., Korobkov G.E., Yanchushka A.P.

Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, e-mail: albertahmetov303@gmail.com

In this article methodological the basics calculations of a step of arrangement of support from containers with soil are covered when laying an underground gas and oil pipeline in the conditions of island distribution collapsible the permafrost with use of the program START and method of calculation of beam transitions. The comparative analysis of the received results of calculation of a step of arrangement of support from containers with soil with use considered techniques is carried out. In spite of the fact that in a method of calculation of beam transitions a number of impacts of surrounding soil conditions on the pipeline isn't considered, the technique is applicable at a stage of predesign assessment of the resources and materials necessary for construction implementation. Results of assessment of a step of arrangement of support on a method of calculation of beam transitions there are less similar sizes received with use of the program START for 24–38 % for the oil pipeline and for 37–45 % for the gas pipeline.

Keywords: pipeline, model «pipe-soil», permafrost, span length, pipeline settling

Распространение островной мерзлоты в местах прокладки трубопроводов встречается довольно часто, яркими примерами трубопроводов, проложенных в талых грунтах с островной мерзлотой, являются нефтепровод «Восточная Сибирь – Тихий Океан» и нефтепровод «Куюмба – Тайшет». С ростом потребления углеводородного сырья все больше трубопроводов прокладываются по таким территориям [8–10], что делает рассматриваемую тему актуальной.

Пересечение участков островного распространения многолетнемерзлых просадочных грунтов необходимо выполнять с принятием специальных мер по закреплению трубопроводов на проектных отметках [5–6], так как при эксплуатации трубопроводов тепловое воздействие перекачиваемой среды приводит к таянию многолетнемерзлого грунта (ММГ) с последующей его осадкой. Это может привести к возникновению разрушающих напряжений в стенке труб, особенно в месте перехода из талого грунта в мерзлый просадочный.

Для обеспечения проектного положения трубопровода, прокладываемого в рассматриваемых условиях, в [4] предлагается использование контейнеров с талым грунтом, устанавливаемых на участках распространения островной мерзлоты с определенным шагом. Шаг установки опор характеризуется максимально допустимой с точки зрения прочности величиной пролета, то есть в этом случае задачей является определение такой максимальной длины пролета (расстояния между опорами), при которой будет исключена просадка трубной плети или она будет находиться в допустимых пределах прочности.

Определение шага расстановки опор на основе нелинейного взаимодействия трубопровода с грунтом является достаточно сложной и трудоемкой задачей с необходимостью учета большого количества параметров трубопровода и окружающих грунтовых условий. Поэтому для расчета максимально допустимой длины пролета воспользуемся программным комплексом СТАРТ. Модель «трубопровод – грунт», заложенная в данной программе, позволяет учитывать пространственное положение трубной плети, взаимодействие трубопровода с грунтом основания и грунтом засыпки.

Расчет напряженно-деформированного состояния трубопроводов в программном комплексе СТАРТ осуществляется с применением смешанного метода для консольной основной системы. При этом если в рассматриваемой стержневой системе присутствует ряд подвижных сочленений, то на нее накладывается такое же количество внутренних связей, которые подвижные узлы системы превращают в жесткие.

За неизвестные усилия принимаются реакции отброшенных связей в консольной основной системе, а за неизвестные перемещения – перемещения по направлению отсутствующих в узлах связей, которые были предварительно ожесточены. В результате формируется линейная система алгебраических уравнений, решение которой дает нам неизвестные усилия в отброшенных связях и перемещения по направлению дополнительно наложенных связей в местах подвижных сочленений. Наличие нелинейностей, обусловленных работой односторонних связей, а также опор с трением, учитывается с помощью итерационной процедуры, в которой на каждом шаге решается линейная система уравнений. В случае односторонних связей итерации продолжаются до момента достижения критерия рабочей системы: все не работающие односторонние связи разомкнуты, а работающие – замкнуты [7].

При расчете максимально допустимой длины пролета нами был рассмотрен пространственный подземный трубопровод бесконечной длины, для моделирования взаимодействия растаявшего мерзлого грунта основания с трубопроводом на участке распространения ММГ принят грунт со слабой несущей способностью. При этом модель грунта представляет собой нелинейную зависимость сопротивления грунта от перемещения, причем эта зависимость различна и определяется направлением перемещения трубопровода относительно поверхности земли.

Грунт является непрерывным основанием, которое моделируется равномерно распределенными по длине упругими опорами, жесткость которых зависит от величины и направления перемещений. На каждом шаге итераций опоры рассматриваются как упруго-подвижные с тремя линейно-упругими связями: вертикальной, горизонтальной (поперек оси трубы) и продольной (вдоль оси трубы). Итерационная процедура заканчивается, когда на очередном шаге перемещения по направлению связей перестают меняться. Расстояния между опорами определяются автоматически [7].

При моделировании взаимодействия трубопровода с окружающими грунтовыми условиями используются следующие параметры грунта:

– модуль деформации грунта основания, МПа;
– коэффициент Пуассона грунта;
– модуль деформации грунта засыпки, Н/м;
– высота засыпки над трубой, м;
– нормативное значение консистенции грунта;
– коэффициент пористости грунта;
– вид грунта;
– угол внутреннего трения грунта;
– объемный вес грунта, кг/м^3;
– сцепление грунта, Па;
– несущая способность грунта, Па.

Расчетная схема при этом будет выглядеть, как показано на рис. 1.

Проектное положение оси трубопровода на рис. 1 показано горизонтально неслучайно: подразумевается, что на момент строительства, пока отсутствует тепловое воздействие перекачиваемой среды на ММГ, грунт основания обладает достаточной несущей способностью, и просадка трубопровода отсутствует.

Для обеспечения прочности трубопровода на участке распространения мерзлоты необходимо установить скользящие опоры. Такого вида опоры препятствуют перемещению трубопровода вниз, смещению трубы вверх и вбок препятствует грунт, такая модель опор полностью соответствует предлагаемым опорам из контейнеров с грунтом.

На стадии предпроектной оценки ресурсов и материалов, необходимых для осуществления строительства, зачастую отсутствуют исходные данные для проведе-

ния расчета шага расстановки опор с применением программных комплексов. В этом случае нами предлагается использование методики расчета балочных переходов [1–3]. Для создания более реальной модели при использовании методики расчета балочных переходов в расчет было добавлено воздействие грунта засыпки на рассматриваемый участок трубопровода, проходящего в островной мерзлоте. Расчетная схема в данном случае будет характеризоваться следующим:

– наличие зазора между нижней образующей трубопровода и основанием траншеи, возникшего вследствие просадки и подвижек грунта;

– на границе раздела мерзлого и талого грунта (в грунтах с островной мерзлотой) трубопровод жестко защемлен;

– рассматриваемый участок прямолинейный (то есть на рассматриваемом участке отсутствуют кривые, выполненные упругим изгибом, и кривые искусственного гнутья);

– компенсация продольных деформаций от изменения температуры, внутреннего давления, просадки опор происходит за счет упругих прогибов трубопровода в вертикальной плоскости.

Нами были проведены расчеты по определению максимально допустимой длины пролета с использованием двух вышеуказанных методик. Для примера рассмотрим изменение максимально допустимой длины пролета при увеличении диаметра рассматриваемого участка нефтепровода. При проведении расчетов эксплуатационные параметры трубопровода и характеристики грунтовых условий прокладки для обеих методик приняты одинаковыми.

Результаты проведенных нами расчетов изменения допустимой величины пролета в зависимости от диаметра трубопровода по обеим вышеизложенным методикам представлены в таблице. По полученным данным на рис. 2 построены графики изменения допустимой величины пролета от диаметра трубы для нефтепровода (линии 2 и 4) и газопровода (линии 1 и 3). Линии 1 и 2 построены с использованием результатов, полученных в программном комплексе СТАРТ, линии 3 и 4 составлены на основе результатов, полученных по методике расчета балочных переходов.

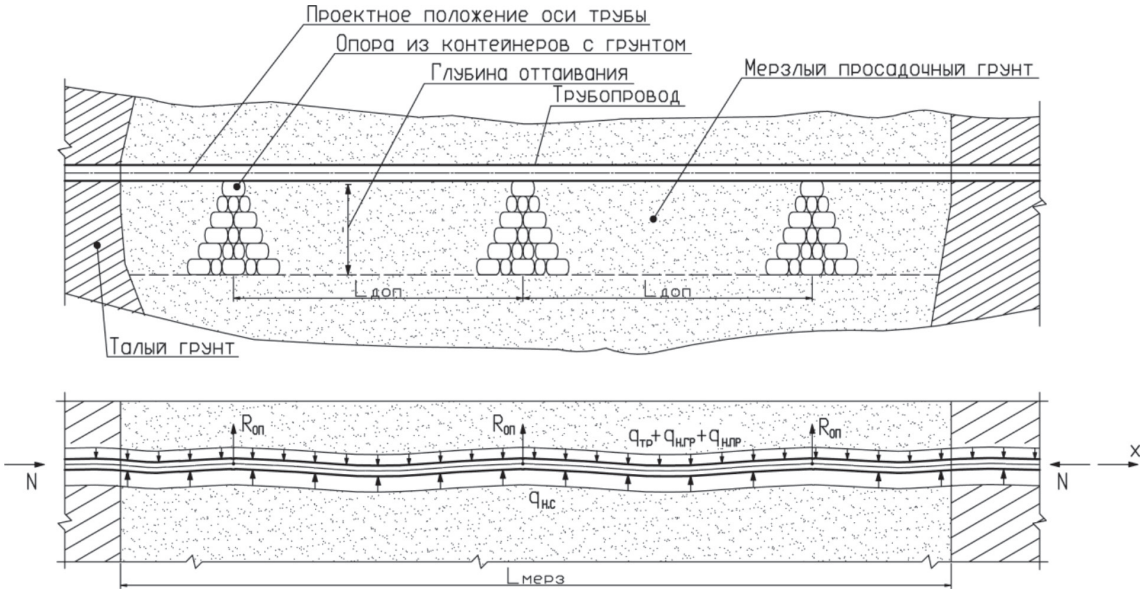

Рис. 1. Расчетная схема при определении максимально допустимой длины пролета. Определение максимально допустимой длины пролета (расстояние между соседними опорами) осуществляется путем подбора такого значения, при котором будет выполнено условие прочности.
$q_{тр}$ – распределенная по длине нагрузка от собственного веса снаряженного трубопровода;
$q_{н.пр}$ – распределенная по длине нагрузка от веса транспортируемого продукта;
$q_{н.гр}$ – распределенная нагрузка от веса грунта засыпки на единицу длины трубопровода;
$q_{н.с}$ – несущая способность грунта; $L_{доп}$ – максимально допустимая длина пролета между двумя соседними опорами из контейнеров с грунтом; $R_{оп}$ – реакция опоры из контейнеров с грунтом;
N – продольное усилие, действующее в трубопроводе; $L_{мерз}$ – протяженность островной мерзлоты

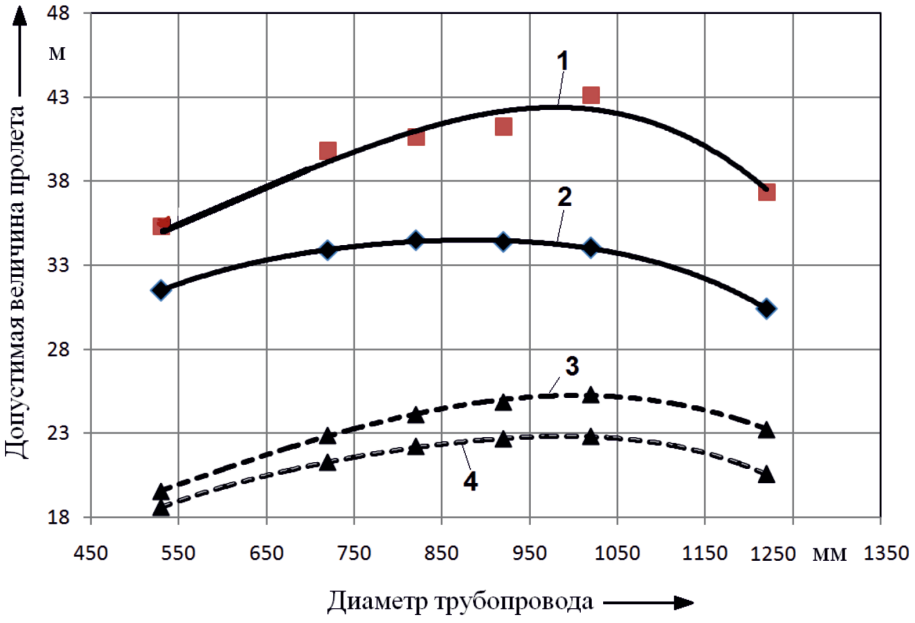

Рис. 2. Зависимость допускаемой величины пролета от диаметра трубопровода. 1 – результаты, полученные в программе СТАРТ для газопровода; 2 – результаты, полученные в программе СТАРТ для нефтепровода; 3 – результаты, полученные по методике расчета балочных переходов для газопровода; 4 – результаты, полученные по методике расчета балочных переходов для нефтепровода

Зависимость допускаемой величины пролета от диаметра трубопровода

Диаметр трубы, мм			530	720	820	1020	1220
Газопровод	Допускаемая длина пролета, м	по методике расчета балочных переходов	19,56	22,86	24,13	25,31	23,23
		по программе СТАРТ	35,34	39,8	40,69	43,16	37,41
	Распределенная нагрузка от веса газа, Н/м		127,01	240,82	315,22	494,02	712,82
Нефтепровод	Допускаемая длина пролета, м	по методике расчета балочных переходов	18,6	21,28	22,21	22,83	20,56
		по программе СТАРТ	31,52	33,92	34,52	34,05	30,42
	Распределенная нагрузка от веса нефти, Н/м		1448,3	2746	3594,5	5633,3	8128,3

Как видно из рисунка, увеличение диаметра от 530 мм до 1020 мм приводит к увеличению длины пролета, несмотря на то, что с увеличением диаметра растет и давление грунта на трубопровод. Это объясняется тем, что вместе с диаметром увеличивается площадь поперечного сечения, осевой момент инерции и момент сопротивления трубопровода. Рост всех этих параметров приводит к снижению продольных напряжений от суммарного изгибающего момента и продольного усилия.

Из рис. 2 характерно видно падение длины пролета для трубопровода с диаметром 1220 мм по сравнению с трубопроводом диаметром 1020 мм. Такое изменение длины пролета объясняется изменением коэффициента надежности по назначению $k_н$. Согласно требованиям СП 36.13330.2012 значение коэффициента $k_н$ для трубопровода диаметром 1020 мм равно 1,1, для трубопровода с диаметром 1220 мм – 1,155, что приводит к уменьшению расчетного сопротивления материала

трубы сжатию. Линии 1 и 3 изменения допустимой величины пролета от диаметра трубы соответствуют тому случаю, когда производится перекачка природного газа по рассматриваемому участку, линии 2 и 4 соответствуют транспортировке нефти.

Сравнение результатов, полученных при расчете максимально допустимой длины пролета между соседними опорами подземного трубопровода с использованием методики расчета балочных переходов и программного комплекса СТАРТ, показало, что результаты оценки максимально допустимой длины пролета по методике расчета балочных переходов меньше аналогичных величин, полученных с использованием программного комплекса, на 24–38 % для нефтепровода и на 37–45 % для газопровода. Причем разница между результатами расчета по данным методикам уменьшается с увеличением диаметра трубопровода.

Уменьшение длины пролета при использовании методики расчета балочных переходов по сравнению с программой объясняется тем, что при создании расчетной модели в методике расчета балочных переходов не учитывается несущая способность грунта основания, и трубопровод жестко защемлен на границе перехода из талого грунта в ММГ, данные допущения уменьшают прочность конструкции.

Список литературы

1. Ахметов А.Х. Исследование напряженно-деформируемого состояния трубопровода с опорами из контейнеров с песком при пересечении талых с островной мерзлотой просадочных многолетнемерзлых грунтов / А.Х. Ахметов, Г.Е. Коробков, А.П. Янчушка // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. – 2014. – № 4. – С. 3–6.

2. Ахметов А.Х. Влияния внутреннего рабочего давления и температурного перепада на максимально допустимую величину пролета при подземной прокладке трубопровода на опорах из контейнеров с грунтом / А.Х. Ахметов, Г.Е. Коробков // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2015. – № 4. – С. 114–122.

3. Ахметов А.Х. Исследование влияния давления грунта засыпки на максимально допустимую величину пролета при подземной прокладке трубопровода на опорах из контейнеров с грунтом / А.Х. Ахметов, Г.Е. Коробков // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2015. – № 4. – С. 123–130.

4. Ахметов А.Х. Применение грунтовых модулей и контейнеров с грунтом для уменьшения осадки трубопровода, проходящего в просадочных многолетнемерзлых грунтах / А.Х. Ахметов, Г.Е. Коробков // Межотраслевой институт «Наука и образование». – Екатеринбург, 2015. – № 2. – С. 5.

5. Васильев Г.Г. Прокладка трубопровода на многолетнемерзлых грунтах с использованием грунтовых модулей / Г.Г. Васильев, М.А. Лежнев, Э.Н. Гайнулин // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2011. – № 3. – С. 12–17.

6. Гаррис Н.А. О выборе способа прокладки трубопроводов в районах вечной мерзлоты / Н.А. Гаррис, Н.А. Колоколова // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. – 2013. – № 1. – С. 13–17.

7. Программная система СТАРТ. Расчет прочности и жесткости трубопроводов. Руководство пользователя. Версия 4.77. – М.: Научно-техническое предприятие «Трубопровод», 2015. – 180 с.

8. Ямалетдинова К.Ш. Методы оптической компьютерной микроскопии в исследовании процессов массопереноса в теории подземной гидрогазодинамики / Монография. – Уфа: РИО БашГУ, 2006. – 212 с.

9. Ямалетдинова К.Ш. Исследование рельефа поверхности кернового материала в приближении теории случайных полей / К.Ш. Ямалетдинова, Р.М. Хакимов, С.С Гоц, З.А. Янгуразова, А.А. Ямалетдинова, А.Р. Гимаев, А.А. Нурутдинов, М.Ф. Тухватуллин, Р.Р. Хуснутдинова, А.Р. Хафизов., Д.В. Емельянов, М.Ш. Шайхутдинова // Успехи современного естествознания. – 2016. – № 12. – С. 228–231.

10. Янгуразова З.А. Освоение месторождений природных битумов / З.А. Янгуразова, К.Ш. Ямалетдинова, Э.Н. Гайнуллина. – Уфа: РИО БашГУ, 2012. – 298 с.