

УДК 622.692.4.074

## ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ОПОРНЫХ УСЛОВИЙ НА РАБОТУ БАЛОЧНЫХ ТРУБОПРОВОДНЫХ СИСТЕМ

*Л.И. Быков, З.Ф. Автахов*

*Уфимский государственный нефтяной технический университет*

В практике проектирования и строительства линейной части магистральных трубопроводов при пересечении естественных и искусственных препятствий довольно широко используются различные многопролетные балочные системы. В качестве примера можно привести воздушный переход газопровода Челябинск – Петровск диаметром 1420 мм через реку Юрюзань. Суммарная длина перехода вместе с поймой реки составила 540 м. Переход имеет 12 пролетов по 45 м каждый. В условиях же Крайнего Севера прокладка на опорах – основной способ строительства трубопроводов, так как обеспечивает сохранность многолетнемерзлых грунтов, предотвращает техногенные процессы, нарушение тундрового покрова и удовлетворяет требованиям охраны окружающей среды [1].

### **Влияние высотного положения опор на напряженное состояние трубопроводного перехода**

Как известно, расчетная схема балочных переходов представляется в виде балки кольцевого сечения на шарнирных опорах. Статический расчет переходов, подробно освещен в [1]. Другие исследователи в своих монографиях [2] предлагают дополнительно учитывать передачу изгибающих моментов на компенсаторы от нагрузки в пролетах и влияние компенсаторов на заземленность трубопровода. В работе [3] автор предлагает расчет балочных трубопроводных переходов вести также с учетом прилегающих подземных участков, поскольку они существенно влияют на устойчивость надземной части.

Трубопроводы, проложенные над землей, представляют собою в статическом отношении многопролетные неразрезные балки и как всякие статически неопределимые системы оказываются весьма чувствительными к просадке какой-либо из опор или просто к расположению опор не на одном уровне. На практике же нередки случаи смещения опор от проектного уровня. Эти вертикальные смещения опор приводят к появлению дополнительных изгибающих моментов, зависящих от величины смещения и жесткости трубы. Общая картина изгиба трубопровода становится в этом случае существенно отличной от предполагаемой расчетной схемы. Поэтому принятие в процессе проектирования и сооружения расположения всех опор на одном уровне относительно друг друга указывает на слабую сторону расчетных методик.

В этой связи нами на примере стержневой конечно-элементной модели двухпролетного балочного перехода (рис.1а и б) со следующими принятыми параметрами 1020×10 мм, материал трубы – сталь 17Г1С,  $l=36$  м,  $q=9,2$  кН/м проанализировано влияние одновременного изменения высотного положения нескольких опор на напряженное состояние для всего трубопровода в целом. Так, на рис. 1 а) изображена эпюра действующих напряжений в трубопроводе с указанием величин в характерных сечениях в исходном равновысотном

состоянии. Из рисунка видно, что опорные сечения существенно перегружены, в то время как в пролетных сечениях напряжения практически в 2 раза меньше.

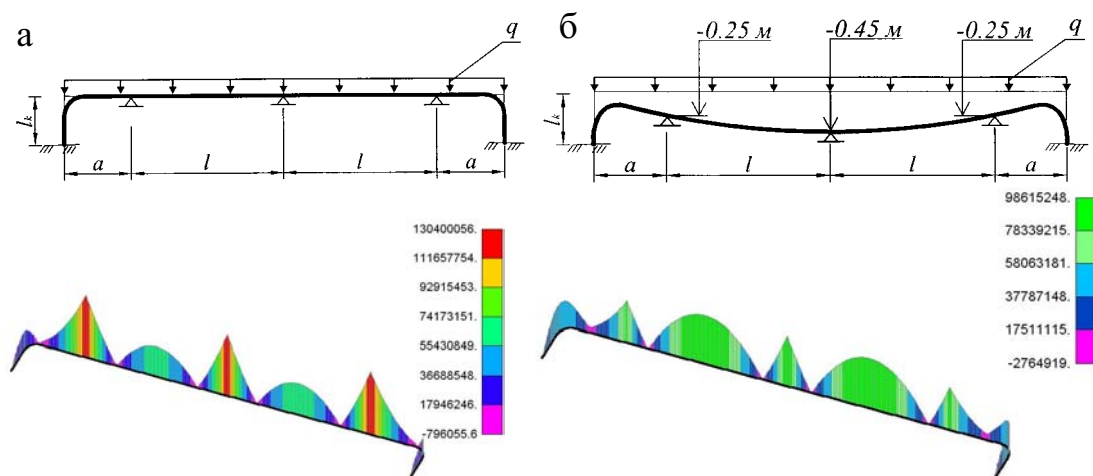


Рис.1 Напряженное состояние двухпролетного балочного перехода

Путем последовательного понижения уровня опор, мы можем добиться существенного уменьшения действующих напряжений. На рис.1 б) показано напряженное состояние трубопроводного перехода после установки опор на оптимальные уровни (отметки – 0.25, -0.45, -0.25) видно, что вследствие изменения их высотного положения напряжения в опорных и пролетных сечениях стремятся выровняться.

Выполнив оценку степени снижения напряжений по формуле

$$\delta_{\sigma} = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{\sigma_{\max}} 100, \quad (1)$$

где  $\sigma_{\max}$  – максимальные напряжения, соответствующие случаю, когда опоры находятся на одном уровне, МПа;

$\sigma_{\min}$  – напряжения после понижения уровня средних опор, МПа;  
находим, что действующие напряжения снизились в результате изменения уровня опор на 24,3%.

В результате использования возможности понижения уровня опорных сечений для регулирования напряжений, балочный трубопроводный переход становится своего рода предварительно-напряженной системой, так как путем опускания средних опор возникают дополнительные изгибающие моменты над соответствующими опорами, величина которых зависит от уровня той или иной опоры. Это, безусловно, потребует внесения изменений в способ монтажа переходов, т.е. после прокладки прямолинейного трубопровода потребуются его предварительный выгиб, что в свою очередь, вызовет необходимость применения других опор.

### Краткая классификация опор балочных трубопроводных систем

В имеющейся литературе [1,3,4,5], конструкции опор для надземных трубопроводов различают по степени свободы линейных перемещений:

- свободноподвижные, допускающие продольные и поперечные линейные перемещения;
- продольно-подвижные, допускающие только продольные перемещения трубы. В зависимости от вида подвижных элементов, обеспечивающих возможность перемещений трубы, опорные части могут быть:
  - скользящими, в том числе со скольжением стали по стали и с применением антифрикционных самосмазывающихся материалов;
  - катковыми, т.е. с круглыми элементами, перекатывающимися между двумя контактирующими поверхностями, при этом катки могут быть цилиндрическими, шаровыми и сложной формы;
  - роликовыми, т.е. с круглыми элементами, которые устанавливаются с возможностью поворота и перекатываются по одной контактирующей поверхности, ролики могут быть цилиндрическими, коническими и сложной формы;
  - на подвесках, один конец которых укреплен на несущей конструкции, а второй перемещается вместе с трубой;
  - комбинированные, конструкции, которых включают два или несколько указанных выше типов подвижных элементов.

К характеристике опор следует также отнести наличие регулирующих и подпружинивающих элементов, которые регулируют высотное положение, но только в небольшом диапазоне.

Конструктивно закрепление на трубе элементов опорной части может быть сварным либо с помощью хомутов, однако оно все же позволяет трубопроводу отрываться от опорной плиты, что делает невозможным использование наиболее распространенных опор для искусственного регулирования напряжений путем изменения высотного положения.

Поэтому нами предлагается следующая конструкция опоры (рис. 2), которая включает в себя обойму 3 состоящую из двух полумуфт 5, которые скрепляются стяжными болтами 6 таким образом, что позволяют трубопроводу свободно перемещаться вдоль его продольной оси. Проложенный трубопровод выводится в проектное положение за счет регулировочного устройства 7. Накладка 2 представляет собой тонколистовую нержавеющей сталь, которой облицовывают трубопровод в пределах возможных смещений, тем самым, образуя наиболее рациональное контртело [4]. В качестве антифрикционного материала предлагается использовать фторопласт-4. Как известно [4], этот материал является диэлектриком, исключительно стоек к химическим воздействиям, не впитывает жидкости и работоспособен в широком диапазоне температур. Коэффициент трения в паре с твердым контртелом изменяется от исчезающе малых значений до 0,3. Многолетний опыт эксплуатации [4] в машинах и в опорных частях мостов (более 10 лет) свидетельствуют о высокой долговечности фторопласта-4 без ухудшения свойств во времени.

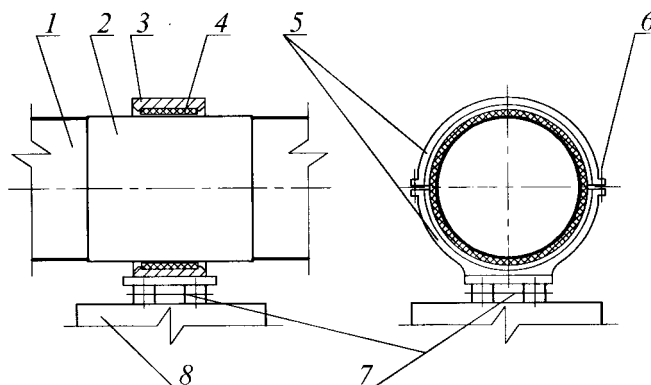


Рис. 2. Возможная конструкция опорной части трубопровода:

1 – трубопровод; 2 – накладка; 3 – обойма; 4 – фторопраст-4; 5 – полумуфты; 6 – стяжные болты; 7 – регулировочное устройство; 8 – опора.

При строительстве балочного перехода после выполнения всех подготовительных работ в створе перехода устанавливаются опоры с регулируемым уровнем (рис. 2). Трубопровод монтируется любым известным «разрезным» либо «неразрезным» способом [6], в зависимости от условий строительства, и закрепляется в полумуфтах 5, причем степень затяжки стяжных болтов 6 задается из условия свободного продольного перемещения трубопровода в обойме и отсутствия люфта в вертикальной плоскости. Первоначально плеть трубопровода должна быть закреплена в опорах на одном уровне, затем в таком состоянии она вваривается в концевые компенсаторы и прилегающие участки. Далее трубопровод выводится в проектное положение за счет регулировки уровня с помощью устройств 7.

Таким образом, предварительно-напряженный трубопровод в профиле перехода окончательно принимает вид, напоминающий провисающую нить.

Вопрос регулирования напряжений в балочных системах трубопроводов путем рационального размещения опор в литературе освещен недостаточно, и поэтому вполне справедливым и своевременным будет вопрос о напряженно-деформированном состоянии (НДС) трубопровода в местах контактного взаимодействия с опорой при реализации оптимального уровня.

### **Контактное взаимодействие трубопровода с опорой**

Мощным научным инструментом в процессе разработки новых промышленных образцов продукции являются методы математического моделирования на ЭВМ. Они позволяют сократить сроки и затраты на разработку новых видов изделий высокой наукоемкости, модернизировать ранее разработанные конструкции. Кроме того, математические методы в условиях адекватности моделей к реальным процессам исследований дают правильное представление о явлениях, определяющих обеспечение высоких технических характеристик изделий, что позволяет целенаправленно проводить мероприятия по повышению их качества и надежности. Деятельность по проведению расчетов, обработке и интерпретации их результатов с применением численных методов и программных комплексов, реализованных на ЭВМ можно рассматривать как аналог реального физического эксперимента в лаборатории [7].

Как известно [7], механическое нагружение деформируемых тел в большинстве случаев является результатом взаимодействия двух и более контактирующих объектов. Именно в зоне контакта чаще всего условия нагружения наиболее жесткие, а процессы повреждения начинаются с поверхности. Так, анализом безотказной работы надземных газопроводов проведенным во ВНИИГАЗа [5] установлено, что свыше 70% отказов вызваны трещинами в местах опирания трубопровода о ригели опор. Трещины ориентированы вдоль трубы, имеются также паукообразные трещины. Основной причиной их образования признана усталость металла трубы вследствие высокого уровня напряжений от неблагоприятного сочетания статических растягивающих нагрузок и динамической составляющей ветровой нагрузки.

В большинстве случаев зона затухания контактных напряжений сопоставима с конечными размерами взаимодействующих тел поэтому, часто следуя принципу Сен-Венана, явлениями в контакте пренебрегают и исследуют НДС при заданных на границе силах и перемещениях. Такое упрощение реальной задачи связано с существенными трудностями ее решения в целом, однако, с развитием современных численных методов моделирования появилась возможность рассматривать НДС с учетом особенностей контактного взаимодействия тел практически любых форм, как при статическом, так и при динамическом нагружении. Можно моделировать сложные процессы деформирования и проскальзывания в различных точках области контакта [7].

Численная реализация метода конечных элементов в различных программах позволяет осуществить моделирование контактирования тел за счет введения специальных контактных элементов [8]. Фактически в зоне контактирования две поверхности никогда не сближаются настолько, чтобы идеально гладкая поверхность одного тела касалась гладкой поверхности другого без зазора. В реальных условиях контактирования на границе двух тел всегда имеется некоторый слой, свойства которого не соответствуют свойствам материала ни одного из тел.

Контактное взаимодействие трубопровода с опорой нами было рассмотрено на примере однопролетного балочного перехода со следующими принятыми параметрами:  $D=530$  мм,  $\delta=10$  мм,  $l=37,5$  м,  $a=13,3$  м,  $l_k=4,1$  м,  $R_2=260$  МПа,  $p=6,4$  МПа,  $q=3,2$  кН/м. Использовалась опора с описанными выше опорными частями (рис.2), толщина фторопластовой прокладки принята согласно рекомендациям [4] равной 7 мм. Обойма принята шириной 200 мм и толщиной 50 мм.

Анализ напряженного состояния выполнялся по эквивалентным напряжениям энергетической теории Мизеса [9]. Согласно данной теории, прочность материала при сложном напряженном состоянии обеспечивается в том случае, если часть удельной потенциальной энергии, идущей на изменение формы тела, не превосходит часть допускаемой удельной потенциальной энергии, идущей на изменение формы, установленной из опытов с одноосным напряженным состоянием [9], при этом расчетная формула имеет вид

$$\sigma_{\text{экв}}^{MS} = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - (\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_3\sigma_1)} \leq [\sigma]. \quad (2)$$

В результате расчета получена картина НДС трубопроводного перехода. Особый интерес представляет опорный узел (рис. 3), поскольку здесь отмечается

пиковое максимальное напряжение  $\sigma_{\text{экв}}^{MS} = 292,9$  МПа, которое развивается по нижней образующей трубы на небольшой площади контакта с кромкой обоймы.

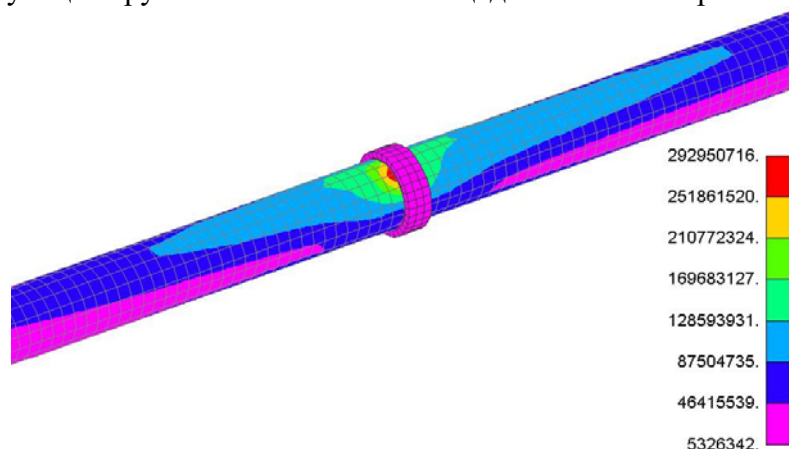


Рис. 3. Опорный узел конечно-элементной модели трубопроводного перехода

В самой же обойме (рис.4) максимальные напряжения составляют уже не столь большую величину  $\sigma_{\text{экв}}^{MS} = 124,6$  МПа. Здесь же наглядно показано распределение напряжений в опоре по глубине, видно, что этот максимум развивается в антифрикционной прокладке и поскольку фторопласт, как известно, выдерживает куда большие давления [4] ясно, что опора в целом недогружена.

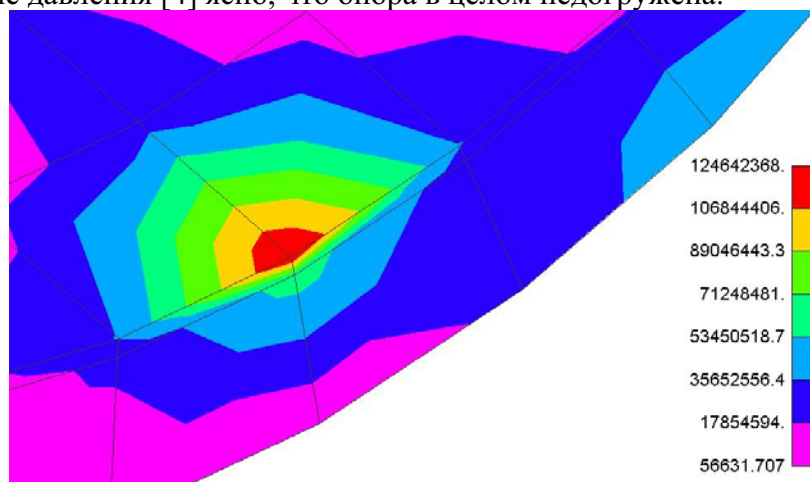


Рис. 4. Пятно максимальных контактных напряжений в обойме

Форма и расположение пятна максимальных напряжений на внутренней нижней образующей обоймы позволили сказать, что трубопровод прогибаясь под действием собственного веса и веса продукта, как бы отрывается от дальней кромки и главным образом, начинает опираться на внешнюю кромку. Тем самым уменьшается площадь контакта и увеличивается удельное давление на стенку трубопровода, что приводит к столь существенным напряжениям. Кроме этого наличие области минимальных напряжений в диаметрально противоположной части опоры по верхней образующей также подтверждает это.

Задавая последовательно величину просадки опор от 0,03 до 0,15 м, нами прослежено за изменением напряжений в опоре и в стенке трубы. На рис.5.

представлены диаграммы изменения максимальных напряжений в опорном сечении в зависимости от его уровня.

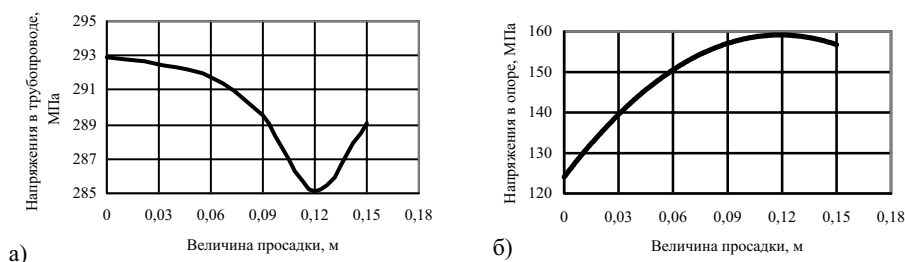


Рис.5. Характер изменения напряжений в опорном узле

Из диаграммы на рис.5 а) видно, что эквивалентные напряжения в трубопроводе снижаются, в то время как в опоре растут (рис.5 б), причем темп роста выше, чем темп снижения. Отметка опоры равная  $-0,12$  м, при которой наблюдается минимум напряжений в стенке трубопровода и максимум в опоре является, таким образом, оптимальным высотным положением.

Сравнивая распределения напряжений при нулевой и оптимальной просадках нами отмечено явное уменьшение области распространения напряжений в трубопроводе вызванных взаимодействием с опорой в продольном направлении, и увеличение ее в кольцевом направлении. Это свидетельствует о том, что в результате изменения уровня опоры растет «полезная» площадь контактирования, что в свою очередь снижает удельное давление на стенку трубы.

Расчет контактного взаимодействия позволяет иметь наиболее полную картину общего напряженного состояния и дает возможность, на наш взгляд, при проектировании опор балочных переходов трубопроводов создавать оптимальные их конструкции, причем критерием оптимальности здесь является равнопрочность.

Таким образом, с нашей точки зрения, при проектировании балочных трубопроводных систем должно учитываться помимо уже известных факторов также влияние предварительных перемещений опор в вертикальной плоскости, причем согласованное с результатами расчета контактного взаимодействия трубы с опорой, поскольку только так мы можем получить наиболее точную картину НДС.

#### Выводы:

1. Предлагается при проектировании балочных трубопроводных систем учитывать помимо уже известных факторов также влияние изменения высотного положения опор, причем согласованное с результатами расчета контактного взаимодействия трубы с опорой, поскольку это позволяет получить более точную картину НДС.

2. На основании анализа конструкций опор для надземных трубопроводов предложена новая конструкция, позволяющая при сооружении балочных переходов устанавливать оптимальные высотные положения сечений трубопровода.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Петров И.П., Спиридонов В.В. Надземная прокладка трубопроводов. – М.: Недра, 1973. – 472 с.
2. Лунев Л.А. Основы проектирования новых конструкций надземных трубопроводных переходов. – Старый Оскол: СТИ МИС и С, 2000. – 124 с.
3. Перун И.В. Магистральные трубопроводы в горных условиях. – М.: Недра, 1987. – 175 с.
4. Подвижные опорные части трубопроводов и других сооружений/ под ред. Д.А. Коршунова. - Киев: Вища школа, 1976. – 142 с.
5. Харионовский В.В. Повышение прочности газопроводов в сложных условиях. – Л.: Недра, 1990. – 180 с.
6. Айнбиндер А.Б. Расчет магистральных и промысловых трубопроводов на прочность и устойчивость. Справочное пособие. - М.: Недра, 1991. – 287 с.
7. Морозов Е.М., Зернин М.В. Контактные задачи механики разрушения. – М.: Машиностроение, 1999. – 544 с.
8. Задачи контактного взаимодействия элементов конструкций/ А.Н. Подгорный, П.П. Гонтаровский, Б.Н. Киркач и др./ Киев: Наукова думка, 1989. – 232 с.
9. Бородавкин П.П., Синюков А.М. Прочность магистральных трубопроводов. – М.: Недра, 1984. – 245 с.