

УДК:624.042.12

А.П. Куляшов, И.А. Тютнев

**НАГРУЗКИ, ДЕЙСТВУЮЩИЕ НА ТРУБОУКЛАДЧИКИ
ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Рассматриваются вопросы работы трубоукладчиков в группе при выполнении подъема и укладки трубопроводов различных диаметров.

Ключевые слова: трубоукладчик, нагрузка, грузоподъемность.

К числу основных задач, которые возникают при оценке применимости того или иного трубоукладчика, относится определение его необходимой грузоподъемности. При этом следует отметить, что подавляющее большинство исследований [1, 2, 4, 12] посвящено изучению напряженно-деформированного состояния трубопровода в процессе его укладки. Как показывает анализ, именно при выполнении этого вида работ чаще всего возникают повреждения трубных плетей с образованием местных вмятин, гофр, складок [12]. Указанные явления с точки зрения строительной механики классифицируются как форма проявления локальной потери устойчивости стенки трубы.

Весь комплекс исследований, касающихся строительной прочности трубопроводов, условно может быть разделен на два направления. Одно из них включает в себя решение задач, связанных с поиском путей снижения изгибных напряжений в укладываемом трубопроводе как в балке, а другое – с оценкой величины критических значений таких напряжений, при которых труба может потерять местную устойчивость, т.е. получить повреждение.

При решении задач по первому направлению в основном акцент делается:

- на выбор оптимальных расстояний между трубоукладчиками в колонне;
- определение их рационального количества в технологической схеме;
- ограничение высот подъема плети и т.д.

Из рассмотрения результатов этих расчетов можно прийти к выводу, что для традиционных схем укладки возможность снижения уровня монтажных напряжений не безгранична (правда, если предположить, что весь укладываемый участок одновременно поднять и опустить в траншею множеством трубоукладчиков, то изгибные напряжения в нем могут стать близкими к нулю; но это представляется как сугубо теоретический вариант).

Относительно самих методов расчета трубопроводов при строительстве: изначально было принято рассматривать упруго изогнутый участок укладываемого трубопровода как линию, описываемую уравнением косинусоиды. Такая аппроксимация обеспечивала вполне удовлетворительную сходимость результатов (по отношению к данным, полученным более сложными методами, в частности, путем интегрирования общего дифференциального уравнения упругой линии [2, 4]), при вычислении прогибов трубопровода. Но при определении изгибающих моментов получаемая погрешность достигала при этом 41%.

Указанное обстоятельство побудило исследователей использовать более точные методы, но опять-таки основанные на тригонометрических функциях. Эти функции в отличие от многих других аналитических выражений легко интегрируются и неслучайно. Именно на этом «удобном» свойстве базируется известный в строительной механике вариационный метод Рейлея-Ритца, предусматривающий предварительное разложение исследуемой функции в ряд Фурье.

Используя классический принцип механики о том, что при равновесии упругой системы вариация разности между потенциальной энергией (упругой энергией внутренних сил)

и работой внешних активных сил равна нулю, можно записать общее уравнение этого баланса в виде:

$$EJ \int_0^l \left(\frac{d^2 y}{dx^2} \right)^2 dx - \sum_{k=1}^K P_k \delta y_k + \sum_{j=1}^N G_j \delta y_j + 2q \delta \int_0^l y dx, \quad (1)$$

где P_k G_k - сосредоточенные силы, направленные соответственно вверх (усилия со стороны трубоукладчиков) и вниз (нагрузки от веса технологических машин); EJ - изгибная жесткость трубопровода (как балки); l - длина рассматриваемого участка трубопровода; δ - символ вариации.

Исходя из теории рядов Фурье, прогиб трубопровода на участке длиной l представляется в виде функции:

$$y = \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos \frac{(2n-1)\pi x}{2l}. \quad (2)$$

Соответствующий подбор коэффициентов $a_1, a_2 \dots a_n$ и последующие преобразования уравнений (1) и (2) позволяют определить прогибы трубопровода в любых произвольных сечениях, а также найти изгибающие моменты, возникающие в местах опирания плети на грузозахватные приспособления. Кроме того, по этой методике можно найти величины реакций, действующих со стороны захватов (троллейных подвесок) на трубопровод, т.е. определить нагрузки на трубоукладчики или, что главное в нашем исследовании – определить нагрузки, действующие со стороны трубопровода на трубоукладчик.

Степень точности расчета зависит только от того, сколько членов тригонометрического ряда было выбрано для рассмотрения. Однако увеличение числа членов этого ряда приводит к дополнительным сложностям расчета, и процедура вычислений становится сопоставимой по трудности с той, которая имеет место при интегрировании дифференциального уравнения упругой линии.

Указанное ранее обстоятельство представлялось крайне актуальным в тот период, а именно в 1960–1970 гг., когда основной объем вычислений производился вручную (без использования высокопроизводительной вычислительной техники). В настоящее же время, когда компьютерные технологии широко вошли во все области исследований, указанные сложности перестали считаться критичными. И тем не менее при поставке и формализации многих новых задач вопрос о выборе методов расчета (с учетом требований к точности окончательных результатов) по-прежнему актуален. Кроме того, при решении ряда исследовательских задач предпочтительным является изначальное изучение составленных функций методами математического анализа, или, как это принято называть, методами «ручного счета». В этом случае нередко удается установить совершенно неожиданные закономерности исследуемого процесса, что далеко не всегда достигается путем машинного счета.

Продолжая анализ литературных данных, касающихся методов расчета трубопроводов при строительстве, необходимо отметить успешно используемую в недалеком прошлом методику определения изгибных напряжений в стенках труб, основанную на применении теоремы о трех моментах [8].

Общий вид уравнений, которые должны быть составлены для построения системы счета, может быть представлен как

$$M_{n-1}l_n + 2M_n(l_n + l_{n+1}) + M_{n+1}l_{n+1} = \frac{q}{4}(l_n + l_{n+1}) - 6EJ \left(\frac{\Delta_n}{l_n} + \frac{\Delta_{n+1}}{l_{n+1}} \right), \quad (3)$$

где M_{n-1}, M_n, M_{n+1} - изгибающие моменты над левой, средней и правой опорами на рассматриваемом участке укладываемого трубопровода (в пределах двух смежных пролетов l_n и l_{n+1}); Δ_n и Δ_{n+1} - смещение средней опоры относительно левой и правой.

Недостатком этого метода является необходимость аппроксимации при выборе численных значений длин крайних пролетов. При некорректном выполнении этой процедуры

могут возникнуть неточности при получении окончательных результатов. Данная методика в основном предназначена для анализа существующих схем укладки, а также для обработки данных, полученных в ходе экспериментальных наблюдений за работой изоляционно-укладочной колонны. Более универсальной методикой, которая позволяет расчетным путем производить оптимизацию параметров схем укладки трубопроводов, является та, что предусматривает использование уравнения упругой линии. В общем виде запись этого уравнения может быть представлена как

$$EJy(x) = EJ_0 + EJ\varphi_0x + M_0 \frac{x^2}{2} + R_0 \frac{x^3}{6} + \sum_{i=1}^n P_i \frac{(x-l_i)^3}{6} - \sum_{k=1}^m Q_k \frac{(x-l_k)^3}{6} - \frac{qx^4}{24}, \quad (4)$$

где EJ - изгибная жесткость трубопровода (как балки); $y(x)$ - прогиб трубопровода в текущей точке, удаленной от начала координат на расстоянии x ; y_0 - прогиб трубопровода в точке, где $x=0$; φ_0 и M_0 - соответственно угол поворота и изгибающий момент при $x=0$; R_0 ~ реакция грунта на трубопровод при $x=0$; P , и Q - сосредоточенные нагрузки от действия трубоукладчиков и технологических машин; l_i и l_k - расстояние от начала координат до точек приложения соответствующих нагрузок; q - вес единицы длины трубопровода (интенсивность вертикальной нагрузки).

В качестве исходных данных для расчета принимаются: технологические высоты подъема трубопровода, глубина траншеи, вес машин, а также физические характеристики самого трубопровода. Кроме того, в расчет могут быть введены дополнительные условия: минимизация изгибающих моментов в опасных сечениях трубопровода, равенство нагрузок на отдельные трубоукладчики и т.п.

В практическом приложении представляют интерес исследовательские работы, посвященные решению ряда конкретных производственных задач [8, 10, 12]. Применительно к укладке трубопроводов больших диаметров (1020–1420 мм) разработан специальный алгоритм расчета основных параметров данного процесса [8]. При его составлении использованы основные дифференциальные уравнения, представляющие собой соответствующие производные уравнения упругой линии (4).

Если бы рассматривалась схема укладки трубопроводов диаметром от 530 до 720 мм, то каждая точка подвеса могла бы быть реализована одним трубоукладчиком.

Принятое ранее допущение о приведении суммарной нагрузки в составе группы к одной точке вносит некоторую погрешность в результаты расчетов (до 5–8 %), но следует при этом иметь в виду, что эта погрешность идет в запас. И в том случае, когда один из трубоукладчиков этой группы случайно выходит из-под нагрузки, никаких отрицательных последствий возникать не должно.

Заметим, что вопрос о формировании в колонне трех групп трубоукладчиков в свое время был детально обоснован [10]; такой подход позволяет обеспечить (при равенстве всех опорных моментов) условие предельного снижения напряжений изгиба в укладываемом трубопроводе.

Значение опорных моментов для рассматриваемой задачи определяется из соотношения:

$$M_1 = M_2 = M_3 = 0,52\sqrt{EJhq}, \quad (5)$$

где h - технологическая высота подъема трубопровода относительно дна траншеи.

Расчетная длина пролета l вычисляется по формуле:

$$l = 2,46\sqrt{\frac{EJh}{q}}. \quad (6)$$

Нагрузка на комплекс трубоукладчиков может быть получена из уравнения:

$$M_1 = M_2 = M_3 = Pl \rightarrow P = \frac{M}{l} = \frac{0,52\sqrt{EJhq}}{2,46\sqrt{\frac{EJh}{q}}} = 0,211q. \quad (7)$$

Решение данного выражения дано в безразмерных величинах. Чтобы получить реально действующие значения сил, необходимо безразмерную величину умножить на расстояние между трубоукладчиками на трассе:

$$P_T = PL = 0,211qL. \quad (8)$$

Следует отметить, что расстояние между трубоукладчиками (или их группами) не может быть произвольным, так как оно влияет на создание напряжений в трубопроводе. Согласно [10], расстояние между группами трубоукладчиков следует определять по выражению:

$$L = 1,2 \div 1,94 \sqrt{\frac{EJh_T}{q}}. \quad (9)$$

Тогда уравнение (8) примет вид:

$$P_T = PL = 0,34 \sqrt{EJh_T q^3}. \quad (10)$$

Решения данного уравнения для существующих типов трубопроводов [1, 5] показаны на рис. 1

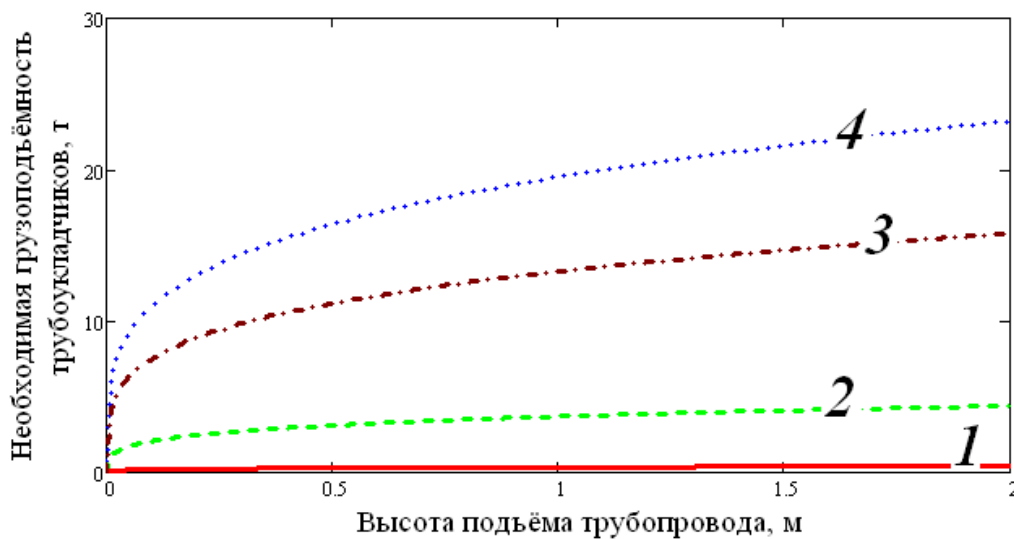


Рис. 1. Зависимость необходимой грузоподъемности трубоукладчиков от высоты подъема трубопровода:

1 – для диаметра 560 мм; 2 – для диаметра 720 мм;
3 – для диаметра 1200 мм; 4 – для диаметра 1400 мм

Полученное уравнение позволяет сделать правильный выбор трубоукладчиков на этапе подготовки комплекса машин для ремонта трубопровода на этапе выбора технологии его ремонта, от которой зависит необходимая величина подъема трубопровода.

Библиографический список

1. **Айнбиндер, А.Б.** Расчет магистральных трубопроводов на прочность и устойчивость / А.Б. Айнбиндер, А.Г. Камерштейн. – М.: Недра, 1984.
2. **Аникин, Е.А.** Технология укладки подземных трубопроводов // Сер. Транспорт и хранение газа. ВНИИЭгазпром. 1983. Вып. 5. С. 41–50.
3. **Баловнев, В.И.** Моделирование процессов взаимодействия со средой рабочих органов дорожно-строительных машин / В.И. Баловнев. – М.: Высш. шк., 1973.
4. Организация строительства магистральных трубопроводов / Ю.П. Баталини [др.]. – М.: Недра, 1980.
5. **Бородавкин, П.П.** Механика грунтов в трубопроводном строительстве / П.П. Бородавкин. – М.: Недра, 1976.
6. **Бородавкин, П.П.** Прочность магистральных трубопроводов / П.П. Бородавкин, А.М. Синезов. – М.: Недра, 1984.

7. **Ващук, И.М.** Трубоукладчики / И.М. Ващук, В.И. Уткин, Б.И. Харкун. – М.: Машиностроение, 1989.
8. **Габеляя, Р.Д.** Исследование повышения групповой устойчивости трубоукладчиков при укладке магистральных стальных трубопроводов больших диаметров: дисс. ... канд. техн. наук / Габеляя Р.Д. – М., МИНХ и ГП им. И.М. Губкина, 1975.
9. **Гальперин, А.И.** Краны-трубоукладчики / А.И. Гальперин. – М.: Машиностроение, 1961.
10. **Гортинский, И.Е.** Определение оптимального числа трубоукладчиков в колонне с учетом маневренности // Строительство трубопроводов. 1980. №11. С. 23–25.
11. Строительство трубопроводов на слабых грунтах / Р.М. Султанов [и др.]. – Н. Новгород: НПК, 2002.
12. Совершенствование технологии и технических средств при капитальном ремонте линейной части магистральных газопроводов: дисс. канд. техн. наук по спец. 25.00.19 / Тютнев А.М. – М., 2006.

A.P. Kulyashov, I.A. Tutnev

WORKLOADS, INFLUENCED ON PIPELAYER, ON MANUFACTURING OPERATE

This article has devoted of determinated workload, influenced on pipelayer, on manufacturing operate.

Key words: pipelayer, workload, vehicle capacity.