

А.Ю. КАБАТЬЕВА, студент гр. ЭОСм-2-25 (КГЭУ)  
Научный руководитель А.Л. ОСИПОВ, к.т.н., доцент (КГЭУ)  
г. Казань

**ОПТИМИЗАЦИЯ ТРАССИРОВКИ ТЕХНИЧЕСКОГО  
ТРУБОПРОВОДА НА ПРОМЫШЛЕННОМ ПРЕДПРИЯТИИ  
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОГРАМНОГО КОМПЛЕКСА  
«СТАРТ-ПРОФ» И СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПОДБОРА  
КОМПЕНСИРУЮЩИХ УСТРОЙСТВ**

**Аннотация.** Работа посвящена оптимизации трассировки технического трубопровода на промышленном предприятии с использованием программного комплекса «СТАРТ-ПРОФ». Цель исследования заключается в повышении эффективности проектирования трубопроводных систем путем автоматизации выбора оптимальных маршрутов прокладки трубопроводов и подбора компенсирующих устройств. Проведен сравнительный анализ методов расчета и подбора компенсаторов с целью минимизации нагрузок на трубопроводную систему и снижения эксплуатационных затрат предприятия.

Практическое применение результатов позволит сократить сроки проектирования, снизить материальные затраты и повысить надежность эксплуатации промышленных трубопроводов. Исследование представляет интерес для проектировщиков и инженеров-технологов предприятий химической промышленности, энергетики и машиностроения.

**Ключевые слова:** температурные деформации, напряженно-деформированное состояние, линейный коэффициент расширения, компенсатор.

Тепловая нагрузка на трубопровод оказывает значительное влияние на его работоспособность и долговечность. Основная проблема при проектировании теплотрасс связана с изменением длины трубопровода под действием колебаний температуры теплоносителя и окружающей среды. Такое изменение вызывает механические напряжения, способные повредить трубу или вызвать разрыв сварных швов, разрушение опор и прочие дефекты [1].

Температурные деформации происходят потому, что длина металлического элемента изменяется пропорционально изменению температуры и линейному коэффициенту расширения материала. Пространственное положение деформируемого участка определяется направлением продольной оси трубы и наличием поворотов, изгибов и переменной толщине стенки.

Помимо температурных удлинений, на трубопровод действуют силы:

- 
- 1) осевое растяжение/сжатие (продольные нагрузки);
  - 2) поперечные смещения (боковые нагрузки);
  - 3) крутильные напряжения (момент вращения);
  - 4) внутреннее давление транспортируемой среды.

Суммарное действие этих сил формирует картину напряжённо-деформированного состояния (НДС) конструкции.

Наиболее распространёнными способами уменьшения температурных деформаций являются установка компенсирующих устройств (компенсаторов) и конструкции обходных путей (S-образные вставки), позволяющих уменьшить величину температурных напряжений путем естественного прогиба трубопровода.

Компенсаторы изготавливаются в трех исполнениях: осевые – применяются при одном направлении деформации, сильфонные – гибкий элемент, компенсирующий деформации во многих направлениях, поворотные – компенсируют угловые перемещения и сдвиги [2].

Предельно-допустимые значения напряжений и перемещений определяются строительными нормами и правилами (СП), отраслевыми стандартами (ОСТ) и техническими условиями (ТУ). Ограничения касаются:

- 1) допустимых значений напряжений в стенках труб;
- 2) предельных смещений опор и крепёжных элементов;
- 3) величины циклических нагрузок и усталостных явлений.

Расчёт тепловых нагрузок и подбор компенсаторов требует глубокого знания физических основ поведения металлов при нагреве, законов механики твёрдых тел и использования специализированного программного обеспечения для анализа полученных данных.

Методы расчета компенсаторов:

1) метод коэффициентов удлинения основан на расчете изменения длины трубы вследствие нагрева или охлаждения среды внутри нее. В этом методе можно выделить такие преимущества, как простота вычислений и доступность исходных данных. А из недостатков то, что метод не учитывает влияние геометрии трассы и требует внесения поправочных коэффициентов [3];

2) метод конечных элементов (МКЭ) использует численные методы анализа напряжения и деформации элементов конструкции. Из преимуществ можно выделить высокую точность расчетов, учет сложных геометрических форм и условий нагружения. Но для него требуется специализированное программное обеспечение, а также возникают сложности с настройкой модели;

3) экспериментально-аналитический метод подбирает компенсаторы на основании экспериментальных испытаний натурных образцов или моделей. В данном методе возможен учет реальных условий эксплуатации и

присутствует высокая точность. Из недостатков можно выделить высокие временные и финансовые затраты, ограниченность масштабируемости.

Программа СТАРТ-ПРОФ предназначена для автоматизированного проектирования и расчёта трубопроводов различного назначения, включая тепловые сети, водопроводы, нефтепроводы и промышленные трубопроводы. Программа широко применяется в России и странах СНГ и признана одним из наиболее удобных и функциональных инструментов для инженеров-проектировщиков [4].

СТАРТ-ПРОФ обладает широким набором функций, которые делают его незаменимым инструментом для инженера-проектировщика:

1) простота интерфейса и удобство работы (удобный графический интерфейс и возможность визуализации трёхмерной модели трубопровода с возможностью вращения и масштабирования для лучшего представления структуры);

2) широкий диапазон поддерживаемых форматов данных (импорт и экспорт файлов формата DXF/DWG (AutoCAD), IFC и PDF, поддержка библиотек материалов, допусков и прочих параметров, используемых в строительстве и промышленности);

3) комплексный расчёт НДС (программа проводит полные расчёты деформаций, напряжений и усилий в каждом участке трубопровода, позволяя точно оценивать запас прочности конструкции и учитывает различные типовые нагрузки);

4) работа с разнообразием материалов и размеров труб (библиотека стандартных материалов и профилей и гибкая настройка геометрических параметров труб);

5) возможности для интеграции и совместимости;

6) поддержка широкого спектра нормативных документов (соответствие отечественным стандартам (СП, ГОСТ, СНиП) и международным нормам (ASME B31.3, EN 13480 и другие)) [5].

Для расчета были заданы конфигурации трубопровода и исходные данные по рабочим параметрам. Построена расчетная 3D-модель, добавлены существующие в проекте опоры (рисунок 1).

По результатам расчета выведены нагрузки на опоры и оборудование в начале и в конце трубопровода (таблица 1).

В проекте присутствуют особенности рельефа с искусственными насыпными воронками для корпусов оборонно-промышленного комплекса, а также заложены опорные конструкции для существующих систем трубопроводов. Одной из главных задач стало спроектировать трубопровод в комплексе с уже смонтированными сетями по возведенным опорам и эстакадам. Из-за этого исключена возможность использования П-образных компенсаторов и S-образных обходов.

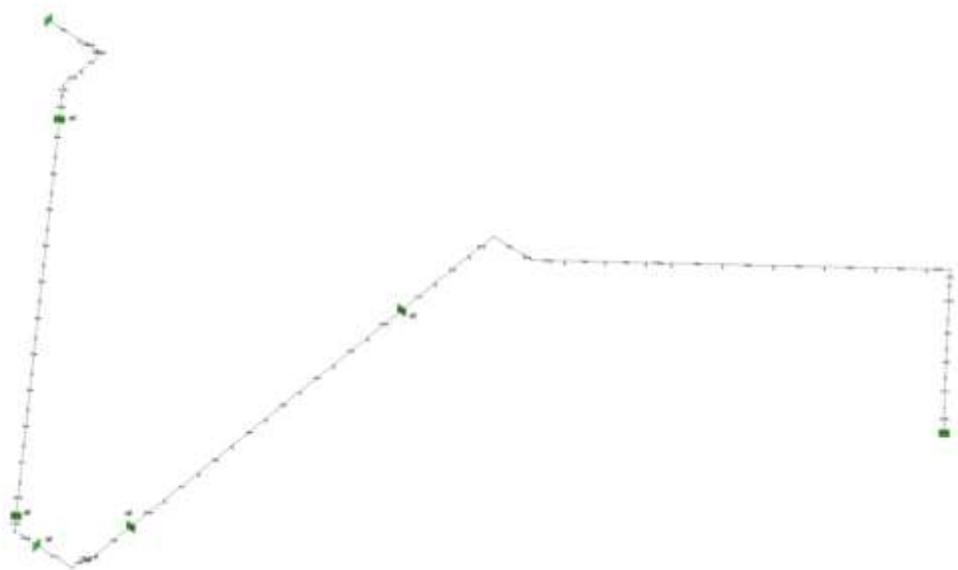


Рис. 1. Расчетная схема

Таблица 1  
Нагрузки по осям на крепления и оборудование

Но- мер узла	Вид изделия	Силы вдоль локальных осей, (кгс)		
		Xmm	Ymm	Zmm
1	Опора мертвая (неподвижная с защемлением)	14	2.40	14.60
2	Опора мертвая (неподвижная с защемлением)	17.80	0.10	44.80
3	Опора скользящая	3.60	4.70	18.60
4	Опора скользящая	7.90	1.20	26.50
5	Опора мертвая (неподвижная с защемлением)	97.30	46.20	45.40
6	Опора скользящая	16.20	13.10	59.50
7	Опора скользящая	4.90	2	16.60
8	Опора мертвая (неподвижная с защемлением)	1464.90	1.40	38.10
9	Опора скользящая	10.10	0	33.80
10	Опора скользящая	10.10	0	33.80
11	Опора скользящая	10.10	0	33.80
12	Опора скользящая	0.10	0	33.80
13	Опора скользящая	10.10	0	33.80
14	Опора скользящая	10.10	0	33.80
00	Опора скользящая	10.10	0	33.80

По полученному расчету нагрузок видна необходимость в дополнительной компенсации температурных удлинений и напряжений с помощью компенсаторов. Из-за особенностей рельефа местности и условий проекта, принято решение использовать сильфонные компенсаторы.

Использование программного обеспечения СТАРТ-ПРОФ обеспечило быстрый расчет модели, что способствовало принятию технологического решения. А также позволило получить точные расчеты по нагрузкам и тепловым расширениям, благодаря которым получилось быстро подобрать сильфонные компенсаторы по техническим параметрам.

**Список литературы:**

1. Кокорин, А.Н., Потапова, О.В. Оптимизация трассировки технологических трубопроводов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Инженерные науки, 2023. – № 2. – С. 89–103.
2. Прохоров, Н.А., Яковлев, Е.С. Современные подходы к выбору компенсирующих устройств в системах промышленного трубопровода // Проблемы современной науки и образования, 2024. – № 1. – С. 45–52.
3. Ильин, Д.И., Киселев, Ю.М. Анализ влияния качества монтажа на эффективность функционирования компенсационных устройств трубопроводов // Труды Томского политехнического университета. Строительство и транспорт, 2021. – № 3. – С. 102–110.
4. Бабенко, Р.Г., Козлов, Г.П. Автоматизированный выбор компенсаторов для нефтепромысловых трубопроводов // Нефтяное хозяйство, 2022. – № 4. – С. 76–81.
5. Смирнова, О.Л., Быковская, А.Ю. Применение программного комплекса «СТАРТ-ПРОФ» для автоматизированного проектирования трубопроводов // Журнал научных публикаций аспирантов и докторантов, 2023. – № 3. – С. 111–119.

**Информация об авторах:**

Кабатьева Алина Юрьевна, студент гр. ЭОСм-2-25, КГЭУ, 420066, г. Казань, ул. Красносельская, д. 51, alinochkakabateva@mail.ru

Осипов Айрат Линарович, к.т.н., доцент, КГЭУ, 420066, г. Казань, ул. Красносельская, д. 51, nord7077@mail.ru