**УДК 621.643**

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**

**ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ КОМБИНИРОВАННЫХ ТРУБ**

**В НЕФТЕГАЗОВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ**

 **Сурнин Дмитрий Аркадьевич1, Овчинников Игорь Георгиевич2**

***ФГБОУ ВО «Саратовский государственный технический***

***университет имени Гагарина Ю.А», Россия, Саратов,***

***аспирант1***

***ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет», Россия, Тюмень,***

***д.т.н., профессор Базовой кафедры АО «Мостострой-11»2***

**Аннотация.** Использование комбинированных (композитных) труб вместо стальных приводит к увеличению срока службы, снижению затрат на эксплуатацию и обслуживание трубопроводов из таких труб. Но сложные конструкции труб затрудняют применение аналитических методов для их расчета. Поэтому при исследовании трубопроводов из таких комбинированных труб большое значение приобретает использование компьютерного моделирования.

**Ключевые слова**: трубопровод, композитные трубы.

Применение комбинированных (композитных) трубопроводов в России осложняется большим количеством факторов. Во-первых, на протяжении длительного времени отсутствовала нормативная документация на композитные трубы для нефтегазовой отрасли и их проектирование. Это было связано с тем, что прочностные расчеты таких конструкций были не унифицированы. Перед тем, как предложить унифицированные модели и алгоритмы расчета композитных труб исследователи экспериментально и с помощью компьютерного моделирования изучали трубы с разными геометрическими параметрами, выпускаемые разными производителями, и составляли рекомендации по проведению прочностных расчетов, как правило, только для исследованных типов труб. Во-вторых, многослойность конструкции, наличие не сплошных армирующих элементов сложной геометрии не позволяло применять для расчета таких труб методики, принятые для трубопроводов из однородных материалов (в том числе, и методики, применяемые для стальных труб). Например, для определения напряженно-деформированного состояния (НДС) толстостенной трубы из линейно упругого материала, находящейся под действием внутреннего давления, обычно используется аналитический метод (решение задачи Ламе). Но при расчете многослойной трубы он не может применяться [1]. В этом случае приходится использовать численные методы.

Из-за того, что размеры армирующих элементов сопоставимы с размерами труб, использовать структурно-феноменологический подход механики композитов также некор-ректно, за исключением стеклопластиковых труб [1]. Поэтому для исследования поведения многослойных труб необходимо было разработать новые расчетные схемы и математические модели, которые учитывали бы их основные особенности (схемы армирования, закономерно-сти деформирования используемых материалов, конструктивные особенности элементов тру-бопроводов и т.п.).

Сложность при исследовании НДС многослойных труб заключалась также в том, что слои трубы непрозрачны, и поэтому экспериментально изучить поведение под нагрузкой каждого слоя трубы было невозможно без нарушения сплошности конструкции. А нарушение целостности трубы для проведения измерений деформации отдельных слоев искажало нужные данные. Поэтому при исследовании трубопроводов из таких многослойных труб большое значение приобретает использование компьютерного моделирования, при помощи которого можно отдельно исследовать поведение каждого слоя.

Компьютерное моделирование на этапе проектирования новой трубы используется для проведения предварительных прочностных расчетов при определении основных конструктивных параметров трубы, а на этапе эксплуатации трубопровода используется для оценки остаточного ресурса участков трубопровода, для планирования сроков ремонтных работ и замены наиболее опасных участков, а также сроков проведения очередных обследований.

При компьютерном моделировании на любой стадии важно правильно выбрать критерий наступления критического (предельного) состояния трубы.Для разработки таких обоснованных критериев необходимы данные анализа НДС трубопроводов из исследуемых материалов.

Исследованием поведения полимерно-армированных труб (ПАТ) со стальным арматурным каркасом занимаются в Уфимском государственном нефтяном техническом университете (Агапчев В.И., Виноградов Д.А., Фаттахов М.М., Сергеев С.М., Салагаева Е.В. и др.) [2-4]; в Пермском национальном исследовательском политехническом университете (Сальников А.Ф., Аношкин А.Н., Зуйко В.Ю. и др.) [5, 6, 11], в ВННИИгазе (Антонов В.Г., Рябец Ю.С. и др.) [7] и в ряде других научных центров.

Как было ранее отмечено, из-за многослойности конструкции труб исследования поведения ПАТ проводят в основном численными методами, используя метод конечных элементов и программные пакеты SolidWorks, COSMOS/M или ANSYS. При этом большинство авторов свои расчеты проверяют путем проведения лабораторных испытаний исследуемых труб, а также анализируют случаи разрушения трубопроводов из таких труб при их эксплуатации на реальных нефтепромыслах [1-7].

При проектировании ПАТ изменение диаметра проволоки и размера ячейки каркаса позволяет варьировать прочность труб в широких пределах, а использование полимеров с различными свойствами позволяет варьировать температурный режим эксплуатации, коррозионную устойчивость к различным агрессивным средам, стойкость к абразивному износу. Исследователи, меняя указанные характеристики, определяли эквивалентные напряжения по Мизесу, контактные напряжения в полимерной матрице, напряжения в стальной арматуре. В результате анализа напряженно-деформированного состояния ПАТ в работах [2, 4, 8] был сделан вывод: основным несущим элементом таких труб является окружная каркасная арматура, остальные слои - функциональные и не оказывают значительного влияния на общую прочность конструкции. Процесс разрушения ПАТ начинается с того, что сначала окружная арматура полностью исчерпывает свою несущую способность. Затем между арматурой и полиэтиленовой матрицей трубы перераспределяются внутренние усилия. Разрушение конструкции происходит после того, как напряжения в полиэтиленовых оболочках трубы достигнут значений разрушающего напряжения по Мизесу. Поэтому в настоящее время при расчете прочности ПАТ со стальным арматурным каркасом производят расчет только армирующего каркаса.

На рис. 1 показан фрагмент сетки конечно-элементной модели, с использованием которой в работе [4] исследован процесс разрушения ПАТ. Данная модель содержит в общем 2129 конечных элементов и 720 узлов. Армирующая стальная сетка моделируется трехмерными стержневыми КЭ, а полиэтиленовая заливка – толстостенными оболочечными КЭ. На рисунке показаны номера конечных элементов (1033-1097), расположенных в одном ряду сетки и моделирующих арматуру в окружном направлении.



Рис. 1. Сетка конечных элементов для моделирования конструкции ПАТ [4]

Под руководством профессора В.И. Агапчева в Уфимском государственном нефтяном техническом университете (УГНТУ) была разработана обобщенная методика расчета на прочность трубопроводов из ПАТ, основанная на использовании упругой модели поведения материалов [3]. С помощью этой методики расчет трубопроводов производится по предельным состояниям - несущей способности труб (прочности и устойчивости).

Исследователи из ВНИИгаз и ВНИИСТ [7] разработали три основные модели расчета ПАТ, также основанных на упругой модели поведения материалов:

1. Модель бандажа. Бандаж представляет собой кольцевую арматуру из стальной проволоки и подкрепляет снаружи полиэтиленовую трубу, прочность которой необходимо рассчитать.

2. Модель двухслойного цилиндра. В этой модели реальная конструкция трубы заменяется двухслойной моделью, в которой внутренний слой представлен полиэтиленовой трубой, а внешний слой - металлический, объем которого равен объему арматуры.

3. Модель погранслоя. В этой модели арматура рассчитывается по внутренней прослойке, обеспечивающей подкрепление внутреннего слоя и передачу нагрузки во внешний полиэтиленовый слой.

В Пермском национальном исследовательском политехническом университете под руководством проф. Сальникова А.Ф. проводятся экспериментальные и теоретические исследования работоспособности ПАТ [5, 6]. Пермские ученые классифицировали нагрузки, возникающие в трубопроводах из ПАТ при их эксплуатации, определили основные типы разрушений, характерные для данных труб, исследовали их несущую способность. Для оценки несущей способности труб ими была разработана математическая модель, описывающая НДС сварного армирующего каркаса и полимерной матрицы при условии их идеального контакта. В этой модели полиэтилен рассматривается как линейно упругий материал, а сталь - как упруго-пластический, поведение которого моделируется с помощью соотношений деформационной теории пластичности и использовании гипотезы единой кривой.

Во время исследования ПАТ с использованием такой модели было обнаружено опасное явление: в результате большого давления на внутреннюю камеру происходило «вдавливание» полиэтилена внутренней камеры через ячейки проволочного каркаса [6]. Когда проникание становится относительно большим, пятно контакта «полиэтилен-сталь» увеличивается настолько, что изменяется модель нагружения проволочного каркаса и образуются зоны пластической деформации полиэтилена внутренней камеры.

Позже другие пермские исследователи (Аношкин А.Н., Зуйко В.Ю.) [8, 9] разработали трехмерную нелинейную модель механического поведения полимерных армированных труб, которая учитывает упруго-пластические свойства и полиэтилена, и стали, а также отсутствие адгезии между стальной арматурой и полиэтиленовой матрицей. В конструкции линейной части трубы они выделяют повторяющийся элемент – ячейку периодичности и в качестве расчетной схемы рассматривают четверть ячейки периодичности, которая включает в себя участок полиэтиленовой матрицы и элементы продольной и кольцевой арматуры (рис. 2). Авторы считают, что, моделируя механическое поведение такого объема, можно сделать заключение о работоспособности всей трубы в целом.



Рис. 2. Расчетная схема – четверть ячейки периодичности трубы (а)

и сетка конечных элементов (б):

1. полиэтиленовая матрица; 2- окружная проволока; 3 осевая проволока [1]

В работе [1] получено численное решение задачи о деформировании линейной части ПАТ, нагруженной внутренним давлением и осевым усилием; а также исследовано влияние условий контакта между полимерной матрицей и армирующими элементами на напряженно-деформированное состояние трубы. При исследовании авторы учитывали возможность нарушения контакта - проскальзывание стальной арматуры относительно полиэтиленовой матрицы, что соответствует реальным условиям работы арматуры в составе трубы.

 Проанализировав особенности деформирования армирующего каркаса, обусловленные взаимодействием продольной и кольцевой арматуры, авторы предложили критерий предельного состояния по несущей способности ПАТ: труба теряет несущую способность, когда эквивалентные напряжения по Мизесу достигают предела временного сопротивления по всему сечению кольцевой или осевой арматуры.

В работах [8,9] авторы определяют основные закономерности деформирования и механизмы разрушения стыковых соединений полимерных армированных труб, выпускаемых ООО «Полимак»**.** Сварные стыковые соединения труб этого производителя выполняются путем нагрева труб по торцам до температуры плавления, а затем сжатия с заданным осевым усилием с образованием сварного шва и грата. Для обеспечения стыкового соединения трубы снабжаются полиэтиленовыми законцовками, не имеющими армирующих элементов.

Авторами [8,9] разработана методика прогнозирования прочности стыковых соединений ПАТ с использованием трехмерной нелинейной модели стыкового соединения (рис.3). С использованием этой модели проанализировано НДС стыковых узлов трубы при различных условиях нагружения (внутренним давлением и осевой нагрузкой). При проведении исследования учитывались особенности совместного деформирования всех элементов конструкции трубы.



Рис.3. Трехмерная модель стыкового соединения трубы [9]

В результате проведенных компьютерных исследований было установлено, что при нагружении ПАТ внутренним давлением в армирующем каркасе трубы в окрестности стыковых соединений происходит перераспределение напряжений. В результате такого перераспределения напряжений витки окружной арматуры в основном теле трубы, менее нагруженные вначале, по мере увеличения давления начинают воспринимать нагрузку в большей мере по сравнению с проволокой в законцовке. Это позволяет частично разгрузить неармированную часть стыка по мере роста внутреннего давления и в ряде случаев исключить возможность его разрушения.

Полученные с помощью компьютерного моделирования результаты были подтверждены лабораторными испытаниями образцов труб со сварным соединением и опытом их эксплуатации.

Со временем вопрос с нормативной базой для использования комбинированных труб был частично решен, хотя работы в этом направлении продолжаются. Но с начала ввода в эксплуатацию первых трубопроводов из композитных материалов прошло более 25 лет, именно этот гарантийный срок указан их производителями при соблюдении условий нормальной эксплуатации. Кроме того на нефтяных месторождениях фиксируются преждевременные отказы неметаллических трубопроводов из-за производственного брака, нарушения технологии строительно-монтажных работ или режима эксплуатации.

Поэтому остро встал другой важный̆ вопрос: проведение диагностики композитных трубопроводов для оценки состояния и определение остаточного ресурса их службы.

Для оценки остаточного ресурса участков трубопровода, для планирования сроков проведения ремонтных работ и замены наиболее опасных участков, а также сроков проведения очередных обследований в настоящее время также используется компьютерное моделирование.

При разработке моделей, используемых для прогнозирования поведения трубопроводов необходимо учитывать все факторы, влияющие на трубопровод в условиях эксплуатации (силовые нагрузки, сложные грунтово-геологические условия, сейсмические нагрузки, температурные воздействия, воздействие агрессивной эксплуатационной среды и т.д.).

Остаточный ресурс неметаллических трубопроводов предлагается определять по двум факторам:

- степени снижения физико-механических свойств полимера (старение) трубы;

- наличии, и характере локальных повреждений на трубопроводе.

На сегодняшний день нет унифицированной методики диагностики трубопроводов из композитных материалов, которая обеспечивала бы корректный анализ.

Разработкой методик определения остаточного ресурса композитных трубопроводов занимаются в Пермском национальном исследовательском политехническом университете (ПНИПУ), в ПАО «НК «Роснефть», в компании «ИНТРОН ПЛЮС».

В ПНИПУ разработана «Методика оценки технического состояния и остаточного ресурса трубопроводов из неметаллических материалов» [10], которая может использоваться для оценки полиэтиленовых труб, полимерных труб, армированных стальным каркасом и синтетическими нитями, стеклопластиковых комбинированных труб. Разработанная методика может использоваться для всех режимов технологического процесса перекачки сред, в том числе учитывающая рабочее давление внутри исследуемого участка трубопровода, особенности пролегания в различных типах грунтов, времени использования трубопровода и количество циклов нагружения. Значения интегральных коэффициентов затухания при исследовании трубопроводов с различными повреждениями (наличии несплошности материала, микротрещин, отслоения материала от стенки и т.д), полученные лабораторным путем с использованием волнового метода неразрушающего контроля, внесены в специальную программу, которая позволяет автоматически рассчитывать и оценивать работоспособность трубопроводов.

Методика определения остаточного ресурса под названием «Оценка технического состояния и расчет остаточного срока службы полимерно-армированных трубопроводов» разработана ПАО «НК «Роснефть» в 2022 году. Данную методику можно использовать для оценки труб, армированных металлическими лентами, спиральной и продольной металлической проволокой, а также соединительных деталей к ним.

Специалисты «РН-БашНИПИнефть» разработали программное обеспечение, которое определяет техническое состояние и срок службы ПАТ. В основу данной разработки легли результаты исследований образцов труб различных производителей. Специалисты института определили, какие напряжения возникают в полимерно-армированных трубопроводах при внутреннем давлении, перепадах температуры, изгибах. Полученные данные использовали в численных моделях, с помощью которых можно рассчитать срок службы трубопровода, зная условия эксплуатации и характеристики труб. Разработанные модели можно использовать и на этапе проектирования для определения необходимых начальных характеристик под конкретные запросы предприятий.

На основании информации, полученной при проведении неразрушающего контроля трубопроводов, компанией «ИНТРОН ПЛЮС» предложена модель для оценки прочности и оценки остаточного ресурса участков трубопровода из ПАТ [11]. Эта модель преобразует диагностическую информацию в механические показатели несущей способности трубы. В качестве обобщенного показателя технического состояния трубы для прогноза ресурса металло-полимерного трубопровода предложено использовать коэффициент запаса прочности, который теоретически может быть определен на базе диагностических параметров, зарегистрированных тем или иным методом неразрушающего контроля. Как известно, с течением времени коэффициент запаса прочности уменьшается. Поэтому очень важно оценить его предельное состояние либо теоретически (по расчетам влияния дефектов на остаточную несущую способность), либо в сочетании с практическими методами (экспериментами на разрушение), которые позволят скорректировать теоретические оценки.

 Безопасное применение композитных труб в нефтегазовой промышленности требует рационального выбора материалов, учета условий эксплуатации трубопроводов, исследования влияния различных дефектов, статических и динамических нагрузок, действующих во время эксплуатации трубопровода. Для исследования таких труб большое значение приобретает использование компьютерного моделирования как на стадии их проектирования, так и на стадии их эксплуатации.

**БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Зуйко В.Ю. Прогнозирование несущей способности полимерных армированных труб для нефтегазопроводов: автореф. дис. … канд. тех. наук. - Пермь, 2012. – 17 с.

2. Виноградов Д.А. Моделирование процесса разрушения металлопластовых труб/ Д.А. Виноградов, М.М. Фаттахов, С.М. Сергеев, Е.В. Салагаева, А.И. Юнусова // Нефтегазовое дело. - 2006. - Режим доступа: <http://www.ogbus.ru>

3. Агапчев В.И. Методика расчета на прочность и устойчивость трубопроводов из металлопластовых труб. - Уфа: УГНТУ, 2000.

4. Виноградов Д. А. Совершенствование конструкции металлопластовых труб и технологии их монтажа при сооружении трубопроводов : автореф. дис. … канд. тех. наук. – Уфа, 2000. – 21 с.

5. Сальников А.Ф., Сыпачева Е.С. Моделирование напряженно-деформированного состояния полиэтиленовых армированных труб. // Динамика машин и рабочих процессов: Сб. докл. Всероссийской научно-технической конференции. - Челябинск: 2002. - С. 143-146.

6. Сальников А.Ф., Сыпачева Е.С. Оценка несущей способности полимерно-армированных труб различных типоразмеров // Вестник ИжГТУ / ИжГТУ. - Ижевск, 2003. - №4. - С.20-23.

7. Зайцев К.И. Применение полиэтиленовых труб, армированных металлическими каркасами/ К.И. Зайцев, В.Г. Антонов, Ю.С. Рябец, Н.В. Сорокина // Полимергаз. - 2000, №1. - С. 17-19.

8. Иванов С.Г., Аношкин А.Н., Зуйко В.Ю. Вязкоупругое поведение и долговечность при высоком уровне нагрузки полиэтиленовых труб, армированных стальной проволокой // Механика композитных материалов, 2011, Т. 47, № 2, С. 277-288.

9. Аношкин А.Н. Компьютерное моделирование и прогнозирование прочности сварных соединений полимерных армированных труб нефтегазового назначения / А.Н. Аношкин, В.Ю. Зуйко, С.Г. Иванов // Нефтяное хозяйство. – 2011. - №11. - С.95-97.

10. Сальников А.Ф. Методика диагностики и оценки остаточного ресурса трубопроводов из неметаллических материалов // Инженерная практика. -2016. - № 9.

11. Волоховский В.Ю. Возможности оценки и прогнозирования состояния металлополимерных трубопроводов в процессе эксплуатации на основе данных неразрушающего контроля. / В. Ю. Волоховский, Ю. М. Петров, В. В. Сухоруков, А. Н. Воронцов, К. В. Мякушев // Инженерная практика. - 2017. - № 10. - С. 78–85.