

РАСЧЕТ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПРОЧНОСТИ ПОЛИМЕРНЫХ АРМИРОВАННЫХ ТРУБ ГАЗОВОГО НАЗНАЧЕНИЯ¹

© 2007 А.Н. Аношкин, В.Ю. Зуйко, С.Г. Иванов.²

С применением разработанной авторами нелинейной численной модели исследовано напряженно-деформированное состояние и проведена оценка прочности полимерных армированных труб при кратковременном нагружении. Предложена методика прогнозирования прочности полимерных армированных труб, которая может использоваться при проектировании труб новых типоразмеров.

Введение

В настоящее время нефтегазовая промышленность страны сталкивается с проблемой ремонта, реконструкции и восстановления трубопроводов: более половины трубопроводных систем России требует применения экстренных мер по их замене [1]. Один из путей решения данной проблемы — применение современных, ресурсосберегающих, экологически безопасных технологий, к которым можно отнести использование неметаллических, в частности, полимерных армированных труб (ПАТ).

Полимерные армированные трубы представляют собой конструкцию, содержащую двухмерный стальной проволоочный каркас и полимерную матрицу (рис.1, а). Каркас является основным несущим элементом трубы, он включает спиральную проволоку и семейство продольной проволоочной арматуры, сваренной во всех точках пересечения со спиральными витками (рис.1, б)

В качестве матрицы используется полимерный расплав полиэтилена низкого давления или полипропилена. Трубы соединяются друг с другом утолщенными полимерными муфтами, не имеющими армирующих элементов. Такие трубы выпускаются несколькими российскими предприятиями и успешно эксплуатируются в горнодобывающей и перерабатывающей промышленности, на нефтепромыслах и объектах коммунального хозяйства. Расширение области применения данных труб обуславливает необходимость изменения их типоразмеров и конструктивных параметров. Трубы новой номенклатуры должны обеспечивать высокий запас проч-

¹Представлена доктором физико-математических наук, профессором В.И. Астафьевым.

²Аношкин Александр Николаевич (anoshkin@pstu.ru), Зуйко Валерий Юрьевич (zuyko81@mail.ru), Иванов Сергей Геннадьевич (iv@mkmk.pstu.ac.ru), кафедра механики композиционных материалов и конструкций Пермского государственного технического университета, 614000, г. Пермь, Комсомольский пр., 29.

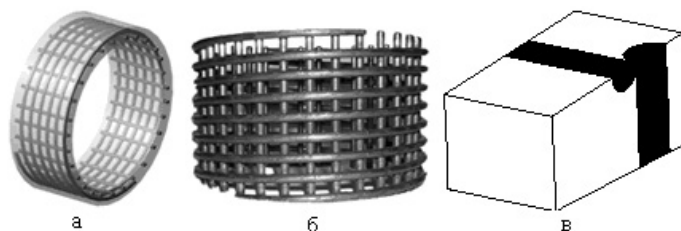


Рис. 1. Конструктивная схема ПАТ (а), армирующий каркас (б), расчетная схема — четверть пространственной ячейки периодичности трубы (в)

Таблица 1

Конструктивные параметры труб ПАТ газового назначения

Параметр	ПАТ-160	ПАТ-195	ПАТ-270
Наружный диаметр, мм	160	195	270
Шаг кольцевых витков, мм	12	10	10
Шаг продольной арматуры, мм	10,3	9,6	10,1
Диаметр проволоки кольцевой, мм	2,5	2,5	3,0
Диаметр проволоки продольной, мм	2,0	2,0	2,5
Число продольных проволок	46	60	80
Толщина стенки, мм	11	11	13

ности, гарантировать длительный срок эксплуатации, при условии экономии материалов и ресурсов, для обеспечения конкурентоспособности продукции.

Для рационального проектирования новых конструкций полимерно-армированных труб представляет интерес проведение расчетно-экспериментальных исследований и комплексного математического моделирования механического поведения всех элементов трубопровода (линейная часть трубы, узлы соединений, отводы и пр.) из рассматриваемых труб. В настоящей работе представлены результаты расчета напряженно-деформированного состояния и прогнозирования прочности линейной части полимерно-армированных труб, предназначенных для транспортировки природных и попутных нефтяных газов с рабочим давлением до 1,2 МПа. Конструктивные параметры исследуемых труб ПАТ, имеющих различный наружный диаметр 160, 195 и 270 мм, показаны в таблице .

Физико-механические свойства стальной арматуры и полиэтиленовой матрицы существенно отличаются, поэтому в расчетной схеме трубу ПАТ необходимо рассматривать как неоднородную конструкцию. В настоящих расчетах используется математическая модель, предложенная авторами в работах [2, 3], построенная для повторяющегося элемента конструкции линейной части трубы — ячейки периодичности. В качестве расчетной схемы рассматривалась четверть ячейки периодичности трубы, включающая элементы продольной и кольцевой арматуры и участок полиэтиленовой матрицы (рис.1, в).

Выбранная четверть ячейки является представительным объемом линейной части конструкции трубы ПАТ. Моделируя механическое поведения такого объема можно сделать заключение о работоспособности всей линейной части трубы в целом. Для выбранного представительного объема трубы ПАТ была сформулирована пространственная физически нелинейная задача механики деформированного твердого тела. Решая поставленную задачу, можно получить неоднородные по-

ля напряжений и деформаций в элементах конструкции трубы: полиэтиленовой матрице, продольной и поперечной арматуре, и на основе анализа полей, рассчитанных при различных значениях внешней нагрузки, оценить прочность трубы. В задаче учитывалась возможность нарушения контакта — проскальзывание стальной арматуры относительно полиэтиленовой матрицы, что соответствует реальным условиям работы арматуры в составе трубы. Поставленная задача решалась с помощью метода конечных элементов.

1. Приближенная аналитическая оценка прочности труб ПАТ

Предварительно для последующего сравнения с результатами численных расчетов была получена приближенная аналитическая оценка несущей способности исследуемых труб ПАТ. Для получения расчетных формул использовалась следующая гипотеза. Критическое давление p_p для полимерной армированной трубы складывается из предельных давлений отдельно для стального кольца p_1 и для толстостенной полиэтиленовой трубы при упруго-пластическом поведении полиэтилена p_2 [4]. Для упрощения можно считать, что полиэтилен не имеет упрочнения. Соответствующие значения давлений можно вычислить по формулам:

$$p_1 = \frac{\sigma_B \pi d_a^2}{4 a r_3}, \quad r_3 = r_2 - d_a - h, \quad (1.1)$$

$$p_2 = \left(2 \ln \left(\frac{r_t}{r_1} \right) + \left(1 - \frac{r_t^2}{r_2^2} \right) \right) \frac{\sigma_t}{\sqrt{3}}, \quad (1.2)$$

$$p_p = p_1 + p_2,$$

где r_1 и r_2 — внутренний и внешний радиус трубы соответственно, a — шаг кольцевых витков, d_a — диаметр кольцевой проволоки, h — толщина слоя ПЭ над кольцевой арматурой, r_t — радиус, разграничивающий упругую и пластическую зоны трубы, σ_B — предел прочности стальной проволоки.

Расчет по вышеуказанным формулам позволил для исследуемых труб ПАТ-160, ПАТ-195, ПАТ-270 получить следующие оценочные значения предельных давлений: 7,3 МПа; 6,5 МПа и 6,2 МПа соответственно.

2. Уточненная оценка прочности труб ПАТ на основе численных расчетов

Уточненная оценка прочности труб ПАТ основывалась на решении нелинейной задачи механики для представительного объема трубы — ячейки периодичности. Задача решалась численно с помощью метода конечных элементов, используя пакет ANSYS WorkBench. В численной модели закладывались упругопластические свойства стальной проволоки и полиэтилена (рис. 2). Диаграмма деформирования проволоки была получена экспериментально. При этом испытывалась проволока, подверженная влиянию контактной сварки, извлеченная из трубы после нагрева ее до температуры 200°C. Результат эксперимента показал, что прочность такой

проволоки не ниже исходных образцов. Диаграмма ПЭ была получена экспериментально на образцах, взятых из полиэтиленовых труб. В расчетах принимались следующие свойства материалов:

ПЭ: $E = 800$ МПа, $\nu = 0,42$, $\sigma_t = 20$ МПа,

Сталь: $E = 200$ ГПа, $\nu = 0,3$, $\sigma_t = 480$ МПа, $\sigma_B = 725$ МПа.

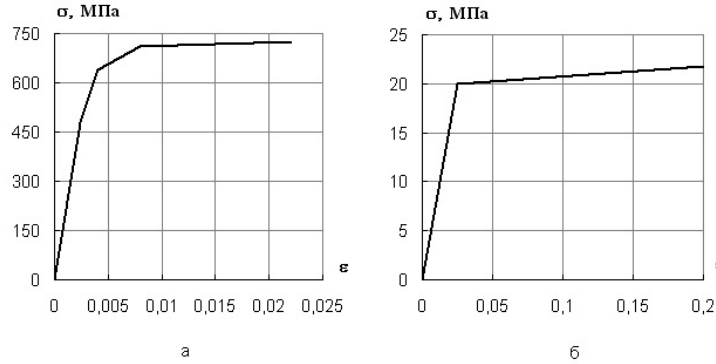


Рис. 2. Условные диаграммы деформирования: *а* — стальной проволоки, *б* — полиэтилена

При задании граничных условий для выбранной расчетной схемы принималось, что труба нагружается внутренним давлением p и осевым усилием N . Осевое усилие возникает в результате действия внутреннего давления на заглушки трубы при испытаниях и может быть рассчитано по формуле

$$N = p \pi \frac{(D - 2h)^2}{4}. \quad (2.1)$$

При этом на рассматриваемую четверть ячейку периодичности приходится интегральная (осредненная) осевая сила

$$N_c = p \pi \frac{(D - 2h)^2}{4n}, \quad (2.2)$$

где p — внутреннее давление, D — наружный диаметр трубы, n — количество ячеек.

Поскольку рассматриваемая ячейка является неоднородной, интегральной осевой силой, рассчитанной по формуле (2.2), соответствует некоторая неоднородная сила, распределенная по сечению рассматриваемой ячейки в полиэтиленовой матрице и стальной арматуре. Это распределение заранее неизвестно, таким образом силовые граничные условия, описывающие осевое нагружение трубы сразу не могут быть определены. Однако, принимая гипотезу о совместной работе матрицы и арматуры, для интегрального усилия можно найти соответствующее осевое перемещение границ ячейки, которое будет одинаковым как для всех точек матрицы, так и арматуры. Поскольку модель учитывает упругопластическое поведение материалов, то зависимость осевых перемещений от внутреннего давления будет нелинейной.

Для приближенного нахождения нелинейной зависимости осевых перемещений от внутреннего давления $p(u_z)$ можно использовать следующий графо-аналитический метод. По диаграммам деформирования $\sigma(\epsilon)$ стали и ПЭ (рис. 2), применив методы механики композиционных материалов, по формулам (2.3) и (2.4) для

одинаковых деформаций ϵ находим соответствующие интегральное усилие $N(\epsilon)$ и осевое перемещение границ ячейки u_z :

$$N(\epsilon) = \frac{1}{2} (\sigma_{st}(\epsilon) F_a + \sigma_p(\epsilon) (F - F_a)), \quad (3.3)$$

$$u_z = \frac{1}{2} \epsilon a, \quad (2.4)$$

где $\sigma_{st}(\epsilon)$, $\sigma_p(\epsilon)$ — напряжения в стальной проволоке и ПЭ при одинаковых деформациях ϵ по диаграммам; F_a — площадь поперечного сечения продольной арматуры; F — площадь поверхности полной ячейки, нормальной к оси трубы.

Данные формулы справедливы именно для рассматриваемой четверти ячейки периодичности трубы. Получая, таким образом, зависимость $N(u_z)$ и учитывая формулу (2.2), переходим к искомой диаграмме $p(u_z)$.

Зависимость осевых перемещений от внутреннего давления $p(u_z)$ для труб ПАТ-160, ПАТ-195, ПАТ-270 показана на рис. 3.

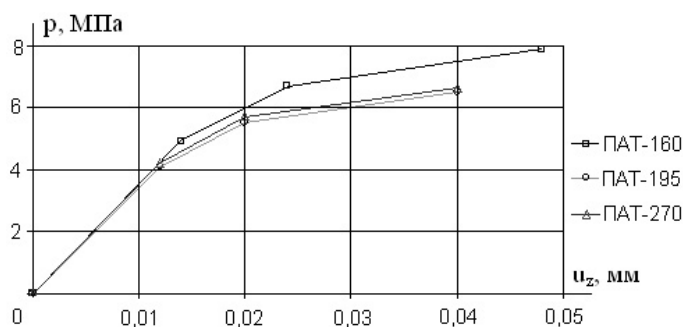


Рис. 3. Зависимость осевых перемещений от внутреннего давления для труб ПАТ-160, ПАТ-195, ПАТ-270

3. Результаты численных расчетов напряженно-деформированного состояния и оценка прочности труб ПАТ при действии внутреннего давления

В результате расчетов были получены картины распределения напряжений и деформаций в элементах конструкции рассматриваемых труб при различных значениях внутреннего давления и соответствующей осевой нагрузке.

На рис. 4, а–в показаны поля интенсивности напряжений (по Мизесу) в полиэтиленовой матрице, кольцевой и продольной арматуре трубы ПАТ-160 при рабочей нагрузке 1,2 МПа. Для труб ПАТ-195, -270 картины распределения напряжений аналогичны. Сравнение полученных полей интенсивностей напряжений с соответствующими диаграммами для стальной проволоки и ПЭ (рис. 2) показывает, что все элементы рассмотренных труб при рабочем давлении находятся в упругом состоянии.

Дальнейший расчет проводился по шагам с постоянным пропорциональным увеличением нагрузки: как внутреннего давления, так и осевой силы. После каждого расчета проводился анализ полей напряженно-деформированного состояния

и решался вопрос о сохранении несущей способности трубы при данной нагрузке. Для оценки предельного давления труб в предлагаемой методике использовался следующий критерий. Считалась, что труба теряет несущую способность, когда эквивалентные напряжения по Мизесу достигают предела временного сопротивления по всему сечению кольцевой или осевой арматуры.

Расчеты показали, что для трубы ПАТ-160 при давлении 6,7 МПа эквивалентные напряжения в некоторых областях кольцевой арматуры достигают предела временного сопротивления 725 МПа (рис. 4, *з*). Интенсивность напряжений в осевой арматуре несколько ниже предела временного сопротивления (рис. 4, *д*), а внутренняя часть полиэтиленовой стенки трубы переходит в пластическое состояние (рис. 4, *е*). На наружной поверхности трубы так же частично возникают пластические деформации. При дальнейшем росте давления до 7 МПа интенсивность напряжений по всему поперечному сечению арматуры достигает предела прочности.

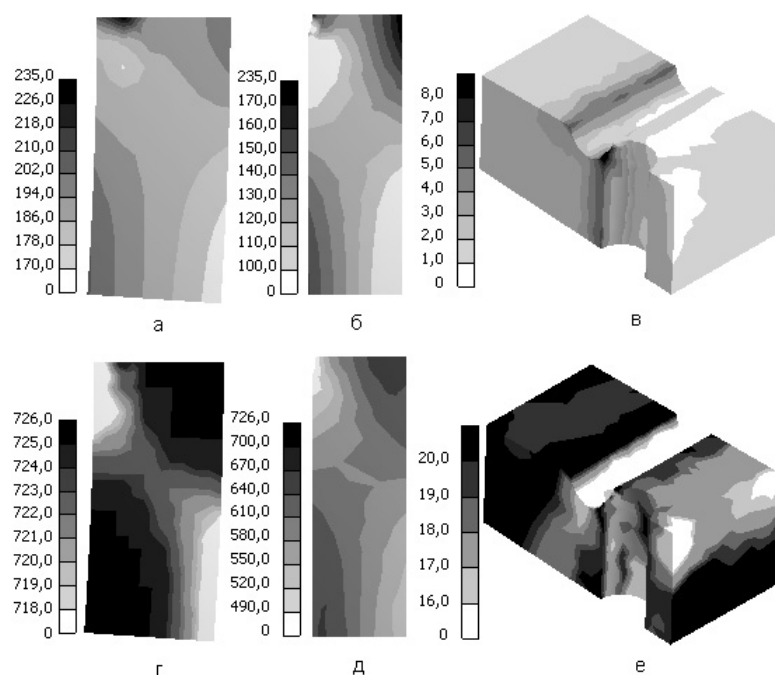


Рис. 4. Интенсивность напряжений (МПа) в кольцевой (*а, з*), продольной (*б, д*) арматуре и полиэтиленовой матрице (*в, е*) трубы ПАТ-160 при внутреннем давлении 1,2 МПа (*а-в*) и 6,7 МПа (*з-е*)

Для труб ПАТ-195, -270 получены аналогичные картины распределения интенсивности напряжений и определены соответствующие величины разрушающего давления.

Сравнение значений предельного давления для рассмотренных труб, полученные по результатам численного анализа, по приближенной аналитической оценке по формулам (1.1, 1.2), а также экспериментальные данные представлены в табл. 3. Видно, что результаты расчетов удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными.

На фотографии трубы, разрушенной в ходе испытаний (рис. 5), видно, что

Таблица 2

Предельные давления для труб ПАТ, МПа

	ПАТ-160	ПАТ-195	ПАТ-270
Численный анализ	6,7–7	6	5,7
Аналитическая оценка	7,3	6,5	6,2
Эксперимент	-	-	5,8–6,4

продольная трещина образовалась в результате разрушения витков кольцевой арматуры.



Рис. 5. Разрушение трубы ПАТ под внутренним давлением

4. Выводы

Таким образом, разработанная математическая модель позволяет с достаточной точностью прогнозировать прочность полимерных армированных труб при кратковременном нагружении. Потеря несущей способности данных труб связана с достижением в витках кольцевой арматуры предельных напряжений. Полиэтиленовая стенка сохраняет свою работоспособность до достижения предельного значения внутреннего давления. Переход в пластическое состояние полиэтилена отмечается лишь при прогнозируемом моменте разрушения проволоки. Разработанная модель может использоваться при проектировании новых типоразмеров полимерных армированных труб.

Работа выполняется при поддержке гранта РФФИ-урал 07-01-96075.

Литература

- [1] Ягубов, Э.З. Использование высокопрочных стеклопластиковых труб в нефтяной промышленности / Э.З. Ягубов // Нефтяное хозяйство. – 2001. – №6. – С. 68–70.
- [2] Моделирование механического поведения металлопластовых труб под действием внутреннего давления / С.Г.Иванов [и др.] // Механика композитных материалов. – 2005. – Т. 41. – №1. – С. 57–70.

- [3] Зуйко, В.Ю. Исследование нелинейного деформирования металлопластовых труб / В.Ю. Зуйко, А.Н. Аношкин, С.Г. Иванов // Мавлютовские чтения: Российская научно-техн. конференция: сб. трудов. Т. 3. – Уфа: УГАТУ, 2006. – С. 287–292.
- [4] Малинин, Н.Н. Прикладная теория пластичности и ползучести / Н.Н. Малинин. – М.: Машиностроение, 1975. – 400 с.

Поступила в редакцию 2/VII/2007;
в окончательном варианте — 2/VII/2007.

STRESS-STRAIN ANALYSIS AND STRENGTH PREDICTION OF METAL-REINFORCED THERMOPLASTIC GAS PIPES³

© 2007 A.N. Anoshkin, V.Yu. Zuyko, S.G. Ivanov⁴

Stress-strain analysis and strength prediction of metal-reinforced thermoplastic pipes at short-time pressure loading are carried out with the aid of numerical nonlinear model developed by the authors. The procedure of strength prediction is proposed to design new dimension-type pipes.

Paper received 2/VII/2007.
Paper accepted 2/VII/2007.

³Communicated by Dr. Sci. (Phys. & Math.) V.I. Astafiev.

⁴Anoshkin Alexander Nikolaevich (anoshkin@pstu.ru), Zuyko Valeriy Yurjevich (zuyko81@mail.ru), Ivanov Sergey Gennadjevich (iv@mkmk.pstu.ac.ru), Dept. of Mechanics of Composite Materials and Constructions, Perm State Technical University, Perm, 614000, Russia.