

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ
ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ
ТРУБОПРОВОДОВ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ АРМИРОВАННЫХ
ТРУБ ПРИ ДИНАМИЧЕСКИХ НАГРУЗКАХ**

С.А. Сальников, А.Ф. Сальников, С.В. Словиков

Пермский государственный технический университет

Представлены экспериментально-теоретическое исследование работоспособности трубопроводов из полимерных армированных труб при динамических нагрузках

В настоящее время полимерные армированные трубы (ПАТ) находят широкое применение при транспортировке газа. Конструкция ПАТ представляет собой полиэтилен низкого давления (ПНД), армированный стальной проволокой небольшого диаметра в осевом и кольцевом направлениях. Анализ работоспособности ПАТ[1,2] показывает, что при статических нагрузках работоспособность конструкции на 85 % зависит от физико-механических свойств стального каркаса и на 15 % от полиэтилена. Однако при динамических (ударных) нагрузках характер поведения конструктивных элементов трубы существенно отличается от характера поведения при статических нагрузках. Динамические нагрузки, в том числе ее колебание скорости на конструкцию ПАТ, приводят к нерасчетным режимам и в конечном итоге к разрушению. Изучение свойств ПНД как материала, в котором находится стальной каркас, является актуальной задачей, поскольку при появлении трещины (расслоении и других дефектах) существенно влияние механических свойств полиэтилена. ПНД при высоких скоростях нагружения является хрупким материалом, что сказывается, в свою очередь, на эксплуатационных характеристиках трубы, а в результате и на работоспособности трубопровода в целом. Различный характер разрушения при статических и динамических видах нагружения представлен на рис. 1.

Структура и химические свойства ПНД в настоящее время достаточно хорошо изучены и описаны в различной современной литературе [3, 4], в то же время механические характеристики требуют дополнительного изучения в режимах динамического нагружения.



Рис. 1. Разрушение газовой трубы. Слева под воздействием статического нагружения, справа под воздействием динамического нагружения.

На базе Центра экспериментальной механики Пермского государственного технического университета было проведено исследование влияния скорости нагружения на деформационные и прочностные характеристики полиэтилена низкого давления. Для реализации широкого диапазона скоростей деформирования (от 10^{-3} с^{-1} до 1 с^{-1}) испытания проводились на двух типах электромеханических универсальных системах Instron 5882 и Instron E3000. Датчики, установленные на универсальных испытательных системах, обеспечивают точность измерения нагрузки 0,5 % от измеряемой величины в диапазоне от 0,2 % до 1 % и 0,4 % в диапазоне от 1 до 100 % номинальной мощности датчика нагрузки.

Исследуемые образцы из ПНД были изготовлены из труб производства ОАО «Казаньоргсинтез». Проведена серия испытаний для 29 образцов при четырех скоростях деформирования: 10^{-3} , 10^{-2} , 0,22, $1,0 \text{ с}^{-1}$. Во всех сериях испытаний реализовывался режим жесткого (кинематического) нагружения.

На рисунке 2 представлено испытание образца из ПНД марки ПЭ80Б-275 при одноосном растяжении на испытательной системе Instron 5882 с использованием видеоэкстензометра AVE 2663-821, погрешность измерения удлинений с помощью которого составляла $\pm 2,5 \text{ мкм}$.

Серия испытаний со скоростью деформации 10^{-3} с^{-1} и 10^{-2} с^{-1} производилась на испытательной системе Instron 5882, с датчиком нагрузки Sandwich Instron с диапазоном измерений до 1 кН. Серия испытаний при значительно больших скоростях деформации ($0,22 \text{ с}^{-1}$ и $1,0 \text{ с}^{-1}$) про-

изводилась на универсальной электродинамической испытательной системе Instron ElectroPuls E3000, представленной на рис. 3, с датчиком динамической нагрузки Dynacell с диапазоном измерений до 5 кН.

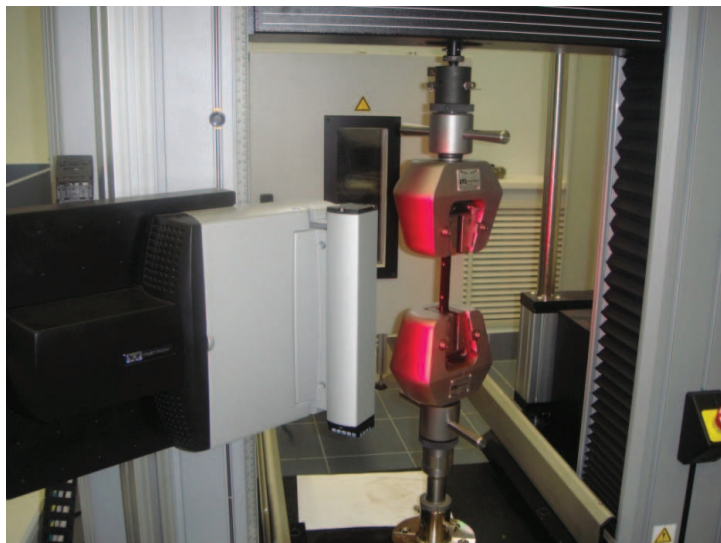


Рис. 2. Испытание образца из ПНД марки ПЭ80Б-275 при одноосном растяжении на испытательной системе Instron 5882 с использованием видеоэкстензометра AVE 2663-821

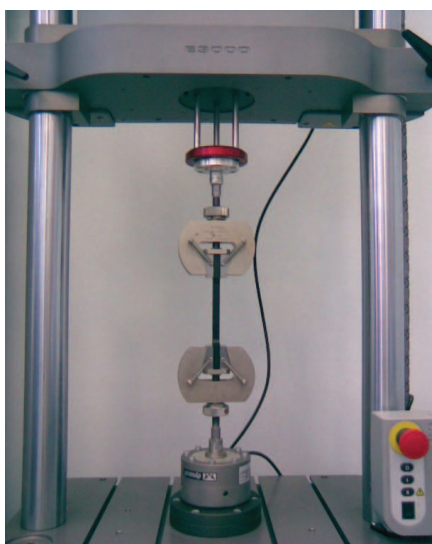


Рис. 3. Испытание образца из ПНД марки ПЭ80Б-275 при одноосном растяжении на универсальной электромеханической испытательной системе ElectroPuls E3000

Внешний вид образцов из полиэтилена низкого давления после проведения испытаний на одноосное растяжение с различными скоростями деформирования представлен на рис. 4.



Рис. 4. Образцы из ПНД после проведения испытаний на одноосное растяжение с различными скоростями деформирования

Проведена статистическая обработка результатов испытаний с доверительной вероятностью 0,95. Значения предела прочности и модуля упругости для различных скоростей деформирования представлены в табл. 1.

Таблица 1

Предел прочности и модуль упругости для различных скоростей деформирования ПНД марки ПЭ80Б-275

Скорость деформации, с ⁻¹	10 ⁻³	10 ⁻²	0,22	1,0
Предел прочности, МПа	16,80±0,61	19,35±0,32	22,50±0,17	22,57±0,20
Модуль упругости, МПа	707,67±36,17	741,33±22,45	798,50±9,20	990±11,80

По результатам испытаний построены зависимости предела прочности и модуля упругости от скорости деформирования, представленные соответственно на рис. 5–7 и в табл. 2.

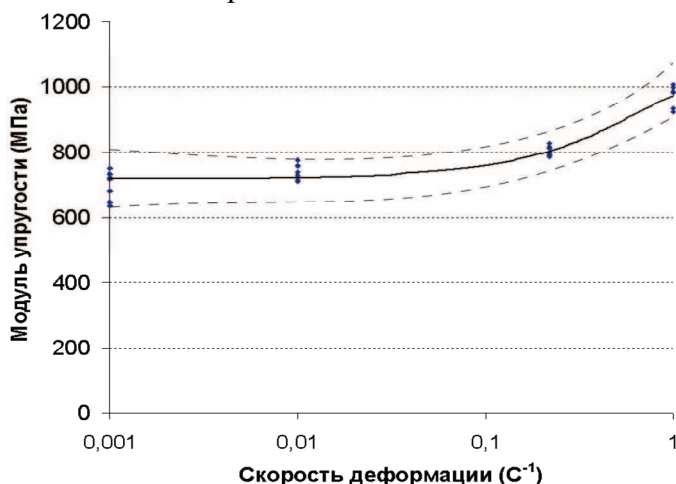


Рис. 5. Зависимость предела прочности для ПНД марки ПЭ80Б-275 от скорости деформирования

Зависимость, представленная на рис. 5, может быть аппроксимирована выражением $y = -169,45x^2 + 422,64x + 719,24$, где y соответствует значению предела прочности (МПа), x – скорости деформации (c^{-1}). Достоверность аппроксимации определяется коэффициентом $R^2 = 0,90$.

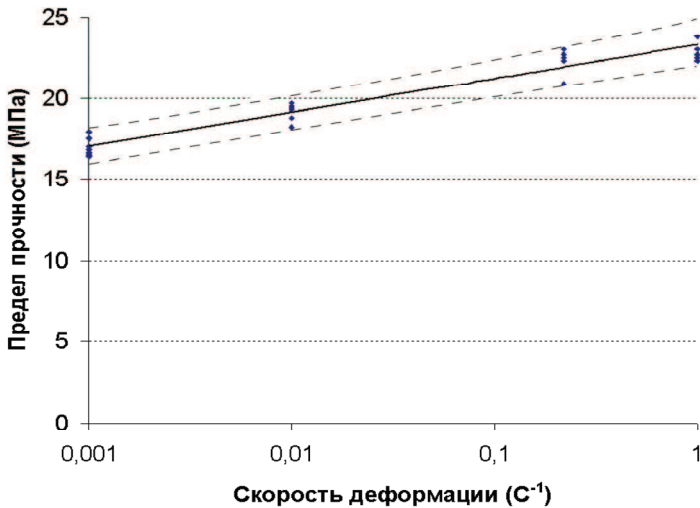


Рис. 6. Зависимость модуля упругости для ПНД марки ПЭ80Б-275 от скорости деформирования

Зависимость, представленная на рис. 6, может быть аппроксимирована выражением $y = 0,8987\ln(x) + 23,285$, где y соответствует значению модуля упругости (МПа), x – скорости деформации (c^{-1}). Достоверность аппроксимации определяется коэффициентом $R^2 = 0,94$.

Обработка результатов натурных испытаний ПАТ на разрушение и анализ причин отказов трубопроводов в процессе эксплуатации позволил выделить наиболее вероятные области разрушения конструкции трубы в зависимости от параметров действия нагрузки. На схеме (см. рис. 7) приведены зоны разрушения полимерных армированных труб в зависимости от условий приложения нагрузки:

1) область работоспособности – зона нормальной работоспособности трубы в пространстве параметров нагружения (частота, амплитуда колебаний давления); в процессе дальнейших исследований необходимо учитывать *температуру* как существенный фактор, влияющий на несущую способность трубы в условиях эксплуатации;

2) полиэтилен (область стыкового соединения конструктивных элементов трубопроводов из ПАТ) – если точка в пространстве параметров нагружения попадает в данную область, то наиболее вероятной зоной разрушения является область законцовки;



Рис. 7. Зоны разрушения полимерных армированных труб в зависимости от условий приложения нагрузки

3) тело трубы – если точка в пространстве параметров нагружения попадает в данную область, то наиболее вероятной зоной разрушения будет являться армирующий каркас, а следовательно, имеем разрушение по телу трубы;

4) переходная зона – в данной области в пространстве параметров нельзя априори прогнозировать, где произойдет разрушение: в области законцовки или по телу трубы.

На схеме используются следующие обозначения:

ν_{self}^* – собственная частота конструкции (трубы, трубопровода) из полимерных армированных труб;

ν^* – критическая частота разрушения – величина, обратная скорости звука в конструкции.

Таблица 2

Результаты испытаний

Марка трубы	ν_{self}^* , Гц	ν^* , Гц	A_{limit}^* , МПа
ПАТ-95	550-600	~10	20
ПАТ-140	480-500	~10	12,9–14,6
ПАТ-200	420-450	~10	10,2

A_{limit}^* – предельное внутреннее давление для трубы соответствующего типоразмера в условиях квазистатического приложения нагрузки.

Таким образом, по результатам проведенных испытаний получены новые данные, характеризующие зависимости деформационных и прочностных свойств полиэтилена низкого давления (модуль упругости, предел прочности) от скорости деформирования в диапазоне от 10^{-3} до 1 с^{-1} , что позволило уточнить работоспособность полиэтилена (область стыкового соединения конструктивных элементов трубопроводов из ПАТ) – в области законцовки сварных соединений трубопровода.

Список литературы

1. Сальников А.Ф., Нечаева Е.С., Аношкин А.Н. Экспериментально-теоретическое исследование работоспособности полимерных армированных труб // Газовая промышленность. – 2008. – № 3. – С. 88–91

2. Сальников С.А., Е.С. Нечаева, Сальников А.Ф. Управление технологическим процессом транспортировки рабочей среды с учетом остаточного ресурса трубопровода// Газовая промышленность. – 2009. – № 9.

3. Дж. Уайт, Д. Чойд. Полиэтилен, полипропилен и другие полиолефины. – М.: Профессия, 2006. – 262 с.

4. Технические свойства полимерных материалов / В.К. Крыжановский, В.В. Бурлов, А.Д. Паниматченко, Ю.В. Крыжановская. – 2-е изд. – М.: Профессия, 2005. – 280 с.

Получено 27.07.2010