

УДК 621.643.3.01-036.6

**ЯВЛЕНИЕ ПОЛЗУЧЕСТИ И РЕЛАКСАЦИИ АРМИРОВАННЫХ
ПОЛИЭТИЛЕНОВЫХ ТРУБОПРОВОДОВ****Якубовская С.В., Сильницкая Н.Ю., Иванова Е.Ю.***ФГБОУ ВПО «Тюменский государственный нефтегазовый университет» Минобрнауки России,
Тюмень, e-mail: sv5508@mail.ru*

Проведен анализ экспериментальных исследований вязкоупругих свойств армированного полиэтилена, используемого для изготовления труб, применяемых при добыче и транспортировке нефти и газа. Разработана и апробирована на испытательном стенде методика оценки деформирования во времени под нагрузкой армированных полиэтиленовых труб, свойства которых зависят от температуры перекачиваемой жидкости и окружающей среды. Учитывались следующие факторы: величина внутреннего давления, уровень напряжений и деформаций, геометрические параметры труб, температура, время и скорость нагружения. С учетом вышеперечисленных факторов были построены графики деформирования во времени армированных полиэтиленовых труб, характеризующие такие свойства, как их ползучесть и релаксация. Для описания процессов ползучести использовалось слабосингулярное ядро с параметрами A , β , α . Разработана компьютерная программа обработки данных эксперимента и теоретической функции ползучести. На основе проведенного эксперимента по исследованию вязкоупругих свойств армированного полиэтилена были определены параметры ядра, которые используются для аналитического расчета на прочность при деформировании во времени рассматриваемых труб.

Ключевые слова: полиэтиленовые трубопроводы, ползучесть, релаксация**THE PHENOMENON OF CREEP FLOW AND CREEP RECOVERY
OF THE REINFORCED POLYETHYLENE PIPELINES****Yakubovskaya S.V., Silnitskaya N.Y., Ivanova E.Y.***FSFEI of HVE «Tyumen state oil and gas university of Ministry of Education and Science»,
Tyumen, e-mail: sv5508@mail.ru*

The analysis of pilot studies of visco-elastic properties of the reinforced polyethylene used for production of the pipes applied in oil and gas production and transportation is carried out. The creeping assessment technique under loading of the reinforced polyethylene pipes which properties depend on temperature of the pumping fluid and environment is developed and approved at the test bed. The following factors were considered: size of internal pressure, level of tension and creeping, geometrical parameters of pipes, temperature, time and speed of loading. Taking into account the above-mentioned factors schedules of reinforced polyethylene pipes creeping, characterizing such properties as their creep flow and creep recovery were constructed. The weakly singular kernel with parameters A , β , α was used for the description of creep flow processes. The computer program of experiment data processing and theoretical function of creep flow was developed. On the basis of the made experimental research of visco-elastic properties of the reinforced polyethylene, the kernel parameters which are used for analytical calculation of durability of the considered pipes under creeping were determined.

Keywords: polyethylene pipelines, creep flow, creep recovery

Проблема обеспечения высокопрочными трубами для строительства и эксплуатации мощностей по добыче и транспортировке нефти и газа является одной из первоочередных государственных задач. Решение ее начинается с формулировки требований к качеству труб, связанных с повышением надежности и долговечности трубопроводного транспорта.

Одним из путей решения этой проблемы является использование в нефтегазовой отрасли труб из различных материалов, в том числе полимерсодержащих. Основным недостатком полиэтиленовых труб является относительно невысокая прочность, но они являются устойчивыми к воздействию агрессивных сред и имеют продолжительный срок службы (до 50 лет). Для повышения прочности труб из полимеров применяется армирование [3, 4].

Многослойные армированные материалы и их конструкции обладают рядом особенностей: слоистое строение, конструктивная ортотропия, деформирование во времени под нагрузкой и т.д. Поэтому экспериментальные исследования этих особенностей с позиции прочности труб являются актуальными.

Целью проведения исследований является изучение свойств ползучести и релаксации армированных полиэтиленовых труб под воздействием внутреннего давления.

В представленной статье объектом исследования является армированный полиэтилен, который можно отнести к упруговязким материалам. Характерными для таких материалов являются их релаксационные свойства: изменение напряжений при неизменных деформациях (релаксация) и изменение деформаций при постоянных напряжениях

(ползучесть). Режимы (скорости) нагружения существенно влияют на характер диаграмм напряжения-деформации с учетом процессов ползучести и релаксации. Чем больше скорость нагружения, тем выше располагаются кривые $\sigma - \varepsilon$; $\sigma - t$; $\varepsilon - t$, где σ – величина напряжений; ε – относительная деформация; t – время.

Опыты проведены по специально разработанной методике, которая отражает характер нагружения при эксплуатации трубы.

На рис. 1 приведена схема стенда по испытанию армированной полиэтиленовой трубы при деформировании. Размеры образцов: длина образца – 1050 мм; наружный диаметр – 138 мм; внутренний диаметр – 107 мм; площадь поперечного сечения трубы – 6023 мм².

Условия проведения эксперимента.

– образцы труб помещались в емкости, заполненные водой при $t = +20^\circ\text{C}$. Внутри образцы заполнены водой при такой же температуре;

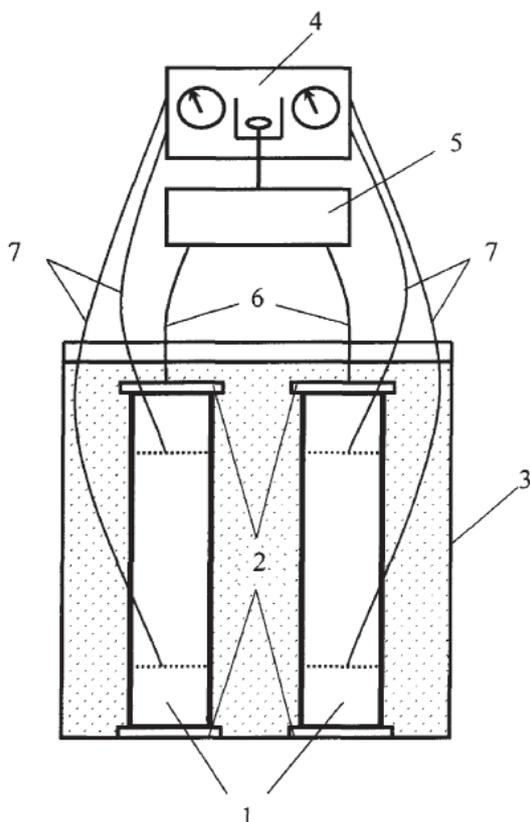


Рис. 1. Схема стенда по исследованию процессов ползучести и релаксации армированной полиэтиленовой трубы:

- 1 – образцы испытываемых труб;
- 2 – заглушки; 3 – ёмкость (бак), наполненный жидкостью;
- 4 – система измерения деформаций; 5 – система подачи давления;
- 6 – рукава высокого давления; 7 – тросы (для измерения деформаций)

– при заданной скорости нагружения (0,2825 МПа/с) создавалось давление внутри образцов;

– замеры на изменение наружного диаметра (D), длины образцов (L) от первоначального положения армированных труб производились при постоянном давлении (7 МПа), (10 МПа) по четырем фиксированным положениям;

– время продолжительности испытаний устанавливалось в пределах 48 часов и более до предела установившейся ползучести.

Испытания проводились при температуре $t_1 = +20^\circ\text{C}$ при величине внутреннего давления 7 и 10 МПа.

Этапы проведения эксперимента:

I. Образец устанавливался в емкость и производились замеры геометрические параметров образцов и температуры.

II. При заданной скорости нагружения создавалось давление и производились замеры деформаций (ΔD , ΔL) и напряжений во времени в осевом и радиальном направлениях.

III. При изменении давления из-за процессов релаксации необходимо поддерживать его на уровне заданного. При этом деформации замерялись до нагружения давлением и после поднятия давления до заданной величины.

На рис. 2 представлены результаты экспериментальных исследований армированного полиэтилена. Результаты исследований показывают, что время релаксации напряжений для рассматриваемого материала составляет десять минут.

Далее (через 50 часов) процесс релаксации напряжений практически не проявляется. При снижении внутреннего давления жидкости до нуля величина остаточных деформаций составляет 1,3% (рис. 3).

Для описания процессов ползучести использовалось соотношение [1]

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma(t)}{E} + \frac{1}{E_0} \int_0^t K(t-\tau) \sigma(\tau) d\tau, \quad (1)$$

где $K(t-\tau)$ – ядро ползучести; E – модуль упругости (характеристика жесткости мгновенного деформирования); $\varepsilon(t)$ – деформация; $\sigma(t)$ – напряжение; t – время наблюдения; τ – время, предшествующее моменту наблюдения.

Первое слагаемое отражает величину мгновенных деформаций для времени t при изменении напряжений $\sigma(t)$, второе – величину деформаций ползучести вязкоупругого материала. Требования к функции влияния ползучести $K(t-\tau)$ сформулированы в работе М.А. Колтунова [1].

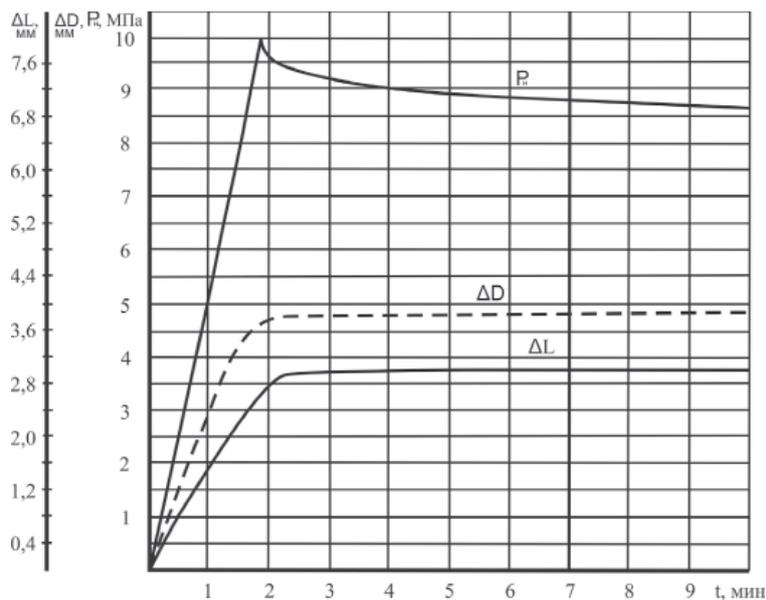


Рис. 2. Деформирование во времени армированной полиэтиленовой трубы

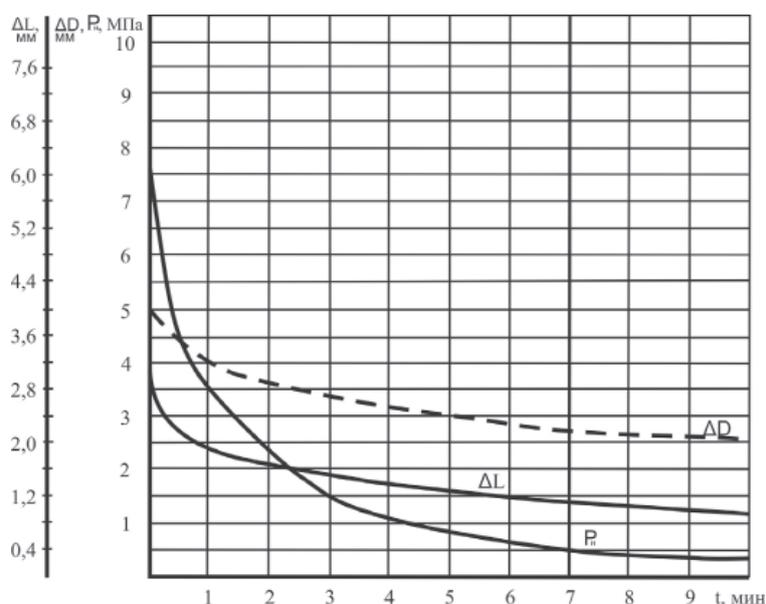


Рис. 3. Деформирование во времени армированной полиэтиленовой трубы

Достаточно общим и удовлетворяющим всем требованиям является слабосингулярное ядро [2]

$$K(t - \tau) = Ae^{-\beta(t-\tau)}(t - \tau)^{\alpha-1}, \quad (2)$$

где A , β , α – параметры ядра.

На основе проведенного эксперимента по исследованию вязкоупругих свойств армированного полиэтилена были определены параметры ядра ползучести. Это выполнено в соответствии с методикой [5].

Для определения напряженно-деформированного состояния изучаемого объекта

находим осевое напряжение σ_x и окружное – σ_y :

$$\sigma_x = \frac{pD_{cp}}{4h}; \quad \sigma_y = \frac{pD_{cp}}{2h},$$

где h – толщина стенки трубы; p – внутреннее давление; $D_{cp} = \frac{D_n + D_{вн}}{2}$.

Осевую относительную деформацию ε_x и окружную ε_y определяем по соотношениям

$$\varepsilon_x = \frac{\Delta l}{l}; \quad \varepsilon_y = \frac{\Delta D}{\pi D_{cp}}$$

Далее величины интенсивности напряжений и интенсивности деформаций находятся по известным соотношениям теории упругости:

$$\sigma_{in} = \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{(\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + (\sigma_x - \sigma_y)^2 + 6(\tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2 + \tau_{xy}^2)};$$

$$\varepsilon_{in} = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\varepsilon_y - \varepsilon_z)^2 + (\varepsilon_z - \varepsilon_x)^2 + (\varepsilon_x - \varepsilon_y)^2 + \frac{2}{3}(\gamma_{yz}^2 + \gamma_{zx}^2 + \gamma_{xy}^2)}.$$

Для рассматриваемого случая составляющие $\sigma_z = 0$, $\tau_{yz} = \tau_{zx} = \tau_{xy} = 0$, $\varepsilon_z = 0$, $\gamma_{yz} = \gamma_{zx} = \gamma_{xy} = 0$.

Расчетные значения σ_{in} и ε_{in} приведены в табл. 1.

Таблица 1

Расчетные значения интенсивности напряжений и деформаций

Номер точки	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
σ_{in} , МПа	0	6,5	9,7	14,5	22,6	29,1	32,1	31,3	30,4	29,7	29,4	29,1
ε_{in} , 10^{-4}	0	12	20	35	43	57	60	60	60	60	60	60

Наличие конечных значений $\varepsilon(t)$ характеризует ограниченную ползучесть.

Выполнив разложение в ряд Маклорена величину $e^{-\beta(t-\tau)}$ и удержав три первые члена ряда, получим теоретическую функцию ползучести в виде [5]

$$\varepsilon^{теор}(t) = \frac{\sigma_0(t-\tau)}{E} + \frac{\sigma_0 A}{E} \left[\frac{(t-\tau)^{\alpha+1}}{\alpha+1} - \frac{\beta(t-\tau)^{\alpha+2}}{\alpha+2} + \frac{\beta^2(t-\tau)^{\alpha+3}}{2(\alpha+3)} \right], \quad (3)$$

где A , α , β – искомые параметры, определяемые из условия совпадения (метод коллокаций) при фиксированных временах теоретического значения функции $\varepsilon^{теор}(t_k)$ с экспериментальным значением $\varepsilon^{эксп}(t_k)$ в k -й точке. После преобразований получим следующие соотношения для определения параметров α и A :

$$\frac{\varepsilon(t_2)E / \sigma_0 - t_2}{\varepsilon(t_1)E / \sigma_0 - t_1} = \frac{(t_2 - t_0)^{\alpha+1}}{(t_1 - t_0)^{\alpha+1}}; \quad (4)$$

$$A = \frac{(\varepsilon(t_1) \cdot E / \sigma_0 - t_1)(\alpha + 1)}{(t_1 - t_0)^{\alpha+1}}. \quad (5)$$

Для определения параметра β в точке коллокации $t_3 \gg t_2 > t_1$ используем выражение (3). Задаваясь интервалом $\beta_{min} = 0$

и $\beta_{max} = 0,006$ и используя метод случайного поиска, получим значение β .

Разработана компьютерная программа обработки данных эксперимента и теоретической функции ползучести по формуле (3). Методом случайного поиска находятся все три параметра α , A и β и строятся графики функций ползучести теоретической и экспериментальной. Окончательный вариант параметров α , A и β принимается путем визуального наблюдения за наилучшей схожимостью кривых ползучести – экспериментальной и теоретической.

В ходе численной реализации вышеизложенного алгоритма определения параметров функции ползучести для образцов под давлением $p_{max} = 7$ МПа и $p_{max} = 10$ МПа получены соответственно следующие значения: $\alpha = 0,552 \text{ c}^{-1}$, $A = 0,1255 \text{ c}^{-1}$, $\beta = 0,0034$ и $\alpha = 0,1794 \text{ c}^{-1}$, $A = 0,2348 \text{ c}^{-1}$, $\beta = 0,00457$.

Таблица 2

Обоснование достоверности параметров функции ползучести

Номер точки коллокации	1	2	3	4	5	6	7
t , с	0	20	40	60	80	100	120
$\varepsilon^{эксп}(t_k) \cdot 10^{-3}$	0	12	20	35	43	57	60
$\varepsilon^{теор}(t_k) \cdot 10^{-3}$	0	11	22	34	45	56	67

Для обоснования достоверности полученных параметров функции ползучести по данным эксперимента проведено сравнение экспериментальной и теоретической функций ползучести по точкам коллокации (табл. 2).

Погрешность результатов полученной теоретической кривой по сравнению с экспериментальной составила 0,6%.

Выводы

Время релаксации напряжений для рассматриваемого материала составляет десять минут, через 50 часов процесс релаксации напряжений практически не проявляется.

Получены параметры функции ползучести под давлением $p_{\max} = 7$ МПа и $p_{\max} = 10$ МПа соответственно: $\alpha = 0,552 \text{ с}^{-1}$, $A = 0,1255 \text{ с}^{-1}$, $\beta = 0,0034$ и $\alpha = 0,1794 \text{ с}^{-1}$, $A = 0,2348 \text{ с}^{-1}$, $\beta = 0,00457$.

Представленные выражения ядра ползучести применены для аналитического расчета при деформировании во времени труб из армированного полиэтилена.

Список литературы

1. Колтунов М.А. Ползучесть и релаксация. – М.: Высшая школа, 1978. – 277 с.
2. Ржаницын Н.Р. Строительная механика. – М.: Высшая школа, 1982. – 400 с.
3. Якубовская С.В. Оценка конструктивной надежности газонефтегазопредельных и сборных сетей из полимерных материалов // Нефтегазсервис. – 2005. – № 4. – С. 36.

4. Якубовская С.В., Савченко Н.Ю. Оценка конструктивной надежности муфтовых соединений полиэтиленовых трубопроводов // Oil & Gas Journal Russia. – 2011. – № 4. – С. 86.

5. Якубовский Ю.Е. Об определении параметров ядер ползучести для стареющих материалов // Прикладная механика. – 1991. – № 6. – С. 37.

References

1. Koltunov M.A. Polzuchest i relaksacija. M.: Vysshaja shkola, 1978. 277 p.
2. Rzhanicyn N.R. Stroitel'naja mehanika. M.: Vysshaja shkola, 1982. 400 p.
3. Jakubovskaja S.V. Ocenka konstruktivnoj nadezhnosti gazoneftegaspredelitelnyh i sbornyh setej iz polimernyh materialov // Nefteservis. 2005. no. 4. pp. 36.
4. Jakubovskaja S.V., Savchenko N.Ju. Ocenka konstruktivnoj nadezhnosti muftovyh soedinenij polijetilenovyh truboprovodov // Oil & Gas Journal Russia. 2011. no. 4. pp. 86.
5. Jakubovskij Ju.E. Ob opredelenii parametrov jader polzuchesti dlja starejushhих materialov // Prikladnaja mehanika. 1991. no. 6. pp. 37.

Рецензенты:

Двойников М.В., д.т.н., зав. кафедрой «Бурение нефтяных и газовых скважин», ФГБОУ ВПО «Тюменский государственный нефтегазовый университет», г. Тюмень;
Мерданов Ш.М., д.т.н., профессор, зав. кафедрой «Транспортные и технологические системы», ФГБОУ ВПО «Тюменский государственный нефтегазовый университет», г. Тюмень.

Работа поступила в редакцию 10.03.2015.