УДК 691.175
2.1.1. Строительные конструкции, здания и сооружения



В.А. Шапкина
Вологодский государственный университет

УЧЕТ МНОГОЛЕТНЕГО СТАРЕНИЯ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ РАСЧЕТЕ РЕСУРСА ПРОТИВОФИЛЬТРАЦИОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

В статье обобщены экспериментальные данные по изменению механических характеристик полиэтилена низкой плотности (ПЭНП) при многолетнем естественном старении и старении под длительной нагрузкой. Анализ выполнен с использованием методов сопоставления результатов одноосных растягивающих испытаний образцов, исследованных в различные периоды эксплуатации и при различных условиях нагружения. Показано, что изменение модуля упругости, предела пропорциональности, прочности и предельных деформаций влияет на расчет ресурса пленочных противофильтрационных конструкций. Предложены обобщающие таблицы для инженерной оценки влияния факторов старения.

Полиэтилен низкой плотности, многолетнее старение, длительная нагрузка, механические характеристики, модуль упругости, расчет ресурса, инженерные расчеты, противофильтрационные конструкции.

Пленочные полимерные материалы широко применяются в противофильтрационных конструкциях дорожных, гидротехнических и промышленных объектов. При проектировании часто используются характеристики материала в состоянии поставки, тогда как в процессе эксплуатации полимеры изменяют свойства под воздействием времени, нагрузки и факторов среды. Существующие подходы к оценке ресурса противофильтрационных конструкций, выполненных с применением пленочных полимерных материалов, в основном базируются на результатах кратковременных механических испытаний. Расчетный ресурс, как правило, определяется с использованием нормативных коэффициентов запаса, тогда как изменение механических характеристик материала во времени учитывается упрощенно либо не учитывается вовсе. При этом в реальных условиях эксплуатации пленочные элементы работают в условиях длительных механических нагрузок, что приводит к развитию ползучести и накоплению деформаций. Изменение значений модуля упругости материала и снижение предела пропорциональности при старении материала могут существенно повлиять на напряженно-деформированное состояние конструкции, особенно при длительной эксплуатации. Применение механических характеристик, принятых по данным кратковременных испытаний, может приводить к искажению расчетных оценок ресурса и надежности противофильтрационных элементов.

На сегодняшний день выполнен ряд исследований, посвященных долговечности полиэтиленовых пленочных материалов и геомембран, применяемых в строительстве и природоохранных сооружениях. В этих работах рассматриваются процессы старения полимеров под воздействием времени, температуры, агрессивных сред, длительных механических нагрузок и ряда других факторов [1–5].

В указанных исследованиях отмечается, что в процессе длительной эксплуатации свойства полимерных материалов изменяются, что свидетельствует о развитии процессов старения и деградации структуры. Изменение механических характеристик полиэтилена при старении связано со структурными преобразованиями в материале и релаксационными процессами в полимерной матрице [2]. Однако большинство таких работ ориентировано преимущественно на материаловедческий анализ состояния полимеров, тогда как вопросы применения полученных данных при инженерных расчетах ресурса противофильтрационных конструкций освещены ограниченно [3].

В связи с вышеизложенным актуальной является задача обобщения экспериментальных данных по изменению механических характеристик полимерных материалов при многолетнем старении и разработки инженерно-ориентированных представлений, учитывающих чувствительность свойств материала к условиям эксплуатации при расчетах ресурса противофильтрационных конструкций. В статье представлено обобщение и сопоставление экспериментальных данных механических характеристик образцов полиэтилена низкой плотности (ПЭНП) при одноосном растяжении, испытанных в состоянии поставки, после естественного старения (включая длительность до 47 лет), а также после старения под длительной нагрузкой [6, 7]. Результаты интерпретированы в виде сравнительных таблиц и таблицы чувствительности.

Исследования механических характеристик ПЭНП с различными условиями старения позволили установить обобщенные тенденции их изменения в таблице 1. Показаны в динамике значения σ_{pr} (напряжение, соответствующее пределу пропорциональности), σ_p

(напряжение при растяжении, соответствующее пределу прочности), $\varepsilon_р$ (предельная относительная деформация при растяжении), E (модуль упругости при растяжении). Примечание: $\sigma_{рг0}$, $\sigma_{р0}$, $\varepsilon_{р0}$, E_0 – значения в состоянии поставки; ↑ / ↓ – увеличение / снижение; двойная стрелка ↓↓ – резкое снижение, ↑↑ – резкое увеличение.

Влияние изменения характеристик на расчет ресурса конструкций показано в таблице 2. Для инженерной интерпретации результатов выполнено обобщение чувствительности свойств ПЭНП к основным факторам старения в таблице 3. Уточнение факторов позволяет корректно выбирать расчетные предпосылки и учитывать анизотропию, связанную с направлением экструзии пленки.

Для предельной деформации $\varepsilon_р$ выявлен пороговый характер изменения при старении под длительной нагрузкой: при $\sigma < 3$ МПа наблюдается увеличение $\varepsilon_р$, тогда как при $\sigma \geq 3$ МПа – ее выраженное снижение (до ~3 раз) вдоль направления экструзии.

В таблицах 1–3 представлены обобщенные экспериментальные данные по изменению механических характеристик ПЭНП при различных условиях многолетнего старения. Особое внимание следует обратить на различие характера изменений при естественном старении и старении под длительной нагрузкой, а также на пороговый характер изменения предельной деформации при уровне напряжений порядка 3 МПа. Представленные данные показывают, что механические характеристики материала изменяются неравномерно и в ряде случаев разнонаправленно, что делает некорректным использование их постоянных значений при расчетах ресурса противофильтрационных конструкций.

Таблица 1

Изменение механических характеристик ПЭНП в различные периоды старения

Условия старения	**Направление экструзии**	**$\sigma_{рг}$**	**$\sigma_р$**	**$\varepsilon_р$**	**E**
Состояние поставки	вдоль	$\sigma_{рг0}$	$\sigma_{р0}$	$\varepsilon_{р0}$	E_0
Естественное старение 16–18 лет	вдоль	$\approx\sigma_{рг0}$	$\approx\sigma_{р0}$	↑ (незнач.)	$\approx E_0$
Старение под длительной нагрузкой 16–18 лет $\sigma < 3$ МПа	вдоль	↓ (до 40 %)	↓(до 17 %)	↑(до 35 %)	↓ (до 20–30 %)
Старение под длительной нагрузкой 16–18 лет $\sigma \geq 3$ МПа	вдоль	↓ (до 40 %)	↓	↓ (≈×3)	↓ (до 20–30 %)
Старение под длительной нагрузкой 16–18 лет	поперёк	↓↓ (до 50 %)	≈	↑	↑ (до 20 %)
Естественное старение 47 лет	вдоль	↓	↓	↑↑ (до 50 %)	↑

Таблица 2

Учет изменения механических характеристик ПЭНП при расчете ресурса

Параметр	**Принято в расчетах**	**Фактическое изменение**	**Последствие**
Модуль упругости E	const	*E = f(t)*	Изменение НДС
Предел пропорциональности $\sigma_{рг}$	const	↓	Ранний выход из зоны упругой деформации
Предельное напряжение $\sigma_р$	const	↓	Снижение запаса прочности
Предельная деформация $\varepsilon_р$	const	разнонаправленные изменения	Требуется учет в расчетах
Расчетный ресурс	нормативный	< нормативного	Необходим учет старения

Таблица 3

Чувствительность механических характеристик ПЭНП к факторам старения

Фактор	**Чувствительный параметр**	**Характер изменения**	**Инженерная интерпретация**
Срок старения	E	тенденция к увеличению	Рост жесткости материала
Длительная нагрузка	$\sigma_{рг}$, $\varepsilon_р$	существенное снижение $\sigma_{рг}$ и пороговое изменение $\varepsilon_р$	Раннее нелинейное деформирование
Ориентация материала	$\sigma_{рг}$, E	сохраняется	Учет анизотропии
Условия старения	$\sigma_р$, $\varepsilon_р$, E	разнонаправленные	Учет при проектировании

Выводом данной работы можно считать то, что многолетнее старение ПЭНП приводит к изменению его механических характеристик, причем характер изменения зависит от условий старения. Приведенные данные позволяют использовать обобщенные тенденции изменения свойств ПЭНП в инженерных расчетах ресурса противофильтрационных конструкций.

Литература

1. Мельник, Е. К. Влияние продолжительности УФ-облучения и температуры на механические свойства полиэтилена низкой плотности / Е. К. Мельник, С. В. Бронников // Вестник Тверского государственного университета. Серия: Химия. – 2024. – № 1 (55). – С. 7–12.

2. Шатохина, С. А. Релаксационные явления в полиэтилене низкой и высокой плотности / С. А. Шатохина, В. А. Ломовской // Физикохимия-2025. Сборник тезисов докладов XIX Конференции молодых ученых, аспирантов и студентов ИФХЭ РАН. – Москва, 2025. – С. 21–22.

3. Zhang, L., Wang, Z. Mechanical Behavior of Polyethylene under Long-term Loading / L. Zhang, Z. Wang // Materials. – 2022. – Vol. 15.

4. Huang, Y. Durability of Polyethylene Geomembranes under Environmental Aging / Y. Huang, Y. Chen, // Polymer Testing. 2021. – Vol. 93.

5. Abdelouahab, N. Aging Behavior of Polyethylene Geomembranes / N. Abdelouahab // Applied Sciences. 2023. – Vol. 13.

6. Огородов, Л. И. Механические характеристики полиэтилена низкой плотности при растяжении после многолетнего естественного старения / Л. И. Огородов, В. А. Шапкина // Вестник Вологодского государственного университета. – 2021. – № 3 (13). – С. 44–46.

7. Огородов, Л. И. Упругие свойства полиэтилена низкой плотности после многолетнего естественного старения / Л. И. Огородов, В. А. Шапкина // Вестник Вологодского государственного университета. – 2024. – № 1 (23). – С. 27–28.

V.A. Shapkina

CONSIDERING LONG-TERM AGING OF POLYMER MATERIALS IN SERVICE LIFE CALCULATION OF IMPERVIOUS STRUCTURES

The paper summarizes experimental data on changes in the mechanical properties of low-density polyethylene (LDPE) under long-term natural aging and aging under sustained loading. The analysis was carried out using methods of comparative assessment of the results of uniaxial tensile tests of specimens examined at different periods of service life and under various loading conditions. It is shown that changes in the elastic modulus, strength characteristics, proportional limit, and ultimate strain significantly affect the service life calculation of film-type impervious structures. The presented results make it possible to take into account the time-dependent variation of material properties in engineering design practice.

Low-density polyethylene, long-term aging, sustained load, mechanical properties, elastic modulus, service life calculation, engineering analysis, impervious structures.