

УДК 621.793:621.891

ОЦЕНКА ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ПОЛИМЕРНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ УСКОРЕННЫХ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ

Вавилов А.В.

магистрант кафедры теории механизмов и машин УГАТУ

e-mail: vavilov.a@yandex.ru

Аннотация

Рассмотрена методика оценки остаточного ресурса напорных полимерных трубопроводов с учетом результатов ускоренного климатического старения. Показана необходимость раздельного учета теплового окисления, ультрафиолетового воздействия, химической активности транспортируемой среды и механических напряжений. Предложена последовательность экспериментального контроля: от отбора образцов и измерения исходных характеристик до построения кинетической модели деградации и интервального прогноза времени достижения предельного состояния. Обсуждаются температурная экстраполяция по уравнению Аррениуса, критерии сохраняемой прочности и испытания внутренним давлением. Установлено, что результат ускоренной выдержки не равен непосредственно календарному ресурсу трубы без проверки механизма старения и условий эксплуатации. Приведен иллюстративный алгоритм вычисления с четким разграничением расчетных допущений и фактических измерений. Статья является обзорно-методической: собственные экспериментальные данные не заявляются.

Ключевые слова: полимерный трубопровод, остаточный ресурс, ускоренные климатические испытания, старение полиэтилена, долговечность, уравнение Аррениуса, гидростатическая прочность, неопределенность прогноза.

ASSESSMENT OF THE REMAINING SERVICE LIFE OF POLYMER PIPELINES BASED ON ACCELERATED CLIMATIC TESTS

Vavilov A.V.

Master's student at the Department of Theory of Mechanisms and Machines, Ufa State Aviation Technical University

e-mail: vavilov.a@yandex.ru

Abstract

A methodological framework is proposed for estimating the remaining service life of polymer pressure pipelines using accelerated environmental ageing tests. Thermal oxidation, ultraviolet exposure, chemical action of the conveyed medium and mechanical stresses are considered as distinct, potentially interacting degradation factors. The approach combines specimen sampling, baseline characterization, accelerated exposure, residual-property measurements and time-to-limit extrapolation with uncertainty bounds. Arrhenius temperature dependence, retained mechanical strength and hydrostatic pressure testing are discussed. Acceleration factors are shown to be valid only when the relevant degradation mechanism remains comparable to service conditions. A calculation workflow is described without presenting assumed figures as original experimental measurements. The paper is a methodological review rather than a report of completed laboratory tests.

Keywords: polymer pipeline, remaining useful life, accelerated ageing, polyethylene pipe, Arrhenius model, pressure resistance, durability, prediction uncertainty.

Введение

Полимерные трубы используются в системах водоснабжения, транспортирования технологических жидкостей, газораспределения и наружных инженерных сетях. Их долговечность определяется не только номинальным сроком службы, указанным изготовителем, но и сочетанием реальных условий: температуры, рабочего давления,

химического состава среды, качества сварных соединений и воздействия солнечного излучения во время хранения либо эксплуатации. Для трубопровода, уже отработавшего часть расчетного периода, инженерный интерес представляет остаточный ресурс – ожидаемое время до достижения заранее установленного предельного состояния при заданном сценарии дальнейшей работы.

В традиционном подходе в основу оценки положена долговременная гидростатическая прочность термопластов. Статистическую экстраполяцию данных испытаний труб, нагруженных внутренним давлением, регламентирует стандарт ISO 9080 [1]; общую процедуру таких испытаний при фиксированных температуре и давлении задает ISO 1167-1 [2]. Но указанными методами анализ не исчерпывается: они не подменяют исследование того, как изменяются структура и свойства материала после климатического старения. При ультрафиолетовом облучении прежде всего затрагивается наружный поверхностный слой, тогда как в горячей хлорированной воде окисление развивается со стороны внутренней поверхности – поэтому внешне сходное уменьшение относительного удлинения при разрыве не указывает на один и тот же механизм повреждения.

Цель статьи – разработать научно обоснованную методику получения прогноза остаточного ресурса труб из термопластов по ускоренным климатическим испытаниям и обозначить границы применимости расчетной модели. В круг задач входят выбор критериев предельного состояния, планирование серии испытаний, сопоставление кинетических зависимостей, расчет неопределенности и формирование процедуры верификации по эксплуатационным данным. Для конкретизации далее преимущественно рассматриваются полиэтиленовые трубы; вместе с тем отдельные положения распространяются и на полипропилен, и на сшитый полиэтилен – при обязательной проверке особенностей материала.

Методы и методики

При длительном нагружении полимерный материал способен изменять свои свойства под действием физических и химических процессов. Физическое старение связано с перестройкой надмолекулярной структуры, релаксацией внутренних напряжений и изменением кристалличности; химическое – обусловлено термоокислительными реакциями, фотоокислением, расходом стабилизаторов, разрывом макромолекулярных цепей и, в отдельных условиях, сшиванием. Температурное воздействие может одновременно ускорять несколько процессов, причем для каждого из них характерна собственная зависимость скорости от температуры, и по этой причине представление всех видов деградации одной универсальной константой ускорения обычно не обосновано.

Для полиэтилена принципиальны стойкость к медленному росту трещины, долговременная прочность при кольцевом напряжении и состояние системы антиоксидантов. При старении может изменяться время индукции окисления, измеряемое методом дифференциальной сканирующей калориметрии. Этот показатель отражает запас термоокислительной стабилизации в условиях принятого метода, но сам по себе не равен оставшемуся сроку эксплуатации. Даже существенное снижение времени индукции окисления нельзя без дополнительных испытаний непосредственно переводить в годы службы.

Для практической диагностики целесообразно определять предел текучести при растяжении, относительное удлинение при разрыве, сопротивление медленному росту трещины, состояние внутренней и наружной поверхности, характеристики кристалличности и показатели окисления. В зависимости от назначения трубы в программу добавляют испытания гидростатическим давлением. Испытание образца на растяжение характеризует локальное свойство материала, тогда как давление нагружает целую трубу с учетом толщины стенки, овальности и дефектов изготовления; по этой причине данные процедуры дополняют друг друга, но не могут выступать как взаимная замена.

Климатический фактор следует описывать количественно – без такого условия сопоставление результатов теряет корректность. Формулировка «испытывалось в климатической камере» недостаточна: необходимо указывать температуру, относительную

влажность, спектральный состав и интенсивность излучения, длительность цикла, продолжительность конденсации, положение образцов и реальную температуру их поверхности. Для труб, постоянно находящихся под землей, воздействие ультрафиолета после монтажа обычно ограничено, поэтому искусственное УФ-старение может сохранять актуальность лишь применительно к периоду хранения или к открытым участкам. И здесь важно разграничивать условия жизненного цикла изделия, а не механически суммировать максимальные климатические нагрузки.

На участках с горячей дезинфицированной водой дополнительно существенным становится химическое воздействие окислителей. Стандарт ASTM F2023 [3] устанавливает специальную методику ускоренных испытаний систем из сшитого полиэтилена в горячей хлорированной воде и прямо предупреждает об ограничениях переноса экстраполированного времени отказа на реальные условия монтажа. Привлекать такой стандарт для обычных полиэтиленовых труб допустимо лишь как методический ориентир; использовать его как прямую нормативную процедуру для всех полимеров – некорректно.

Результаты

Первый этап предполагает формирование однородных групп труб по материалу, типоразмеру, изготовителю и истории эксплуатации. В паспорте каждого образца следует фиксировать марку полимера, номинальную толщину стенки, дату изготовления, условия складирования, наличие соединений и места отбора. Если требуется определить остаточный ресурс действующего трубопровода, необходимо различать возраст изделия и накопленную поврежденность: два участка одного года выпуска могут находиться в неодинаковом состоянии из-за различий температурных и гидравлических режимов. Это разграничение принципиально – оно не позволяет смешивать календарный срок службы с фактической степенью деградации.

Второй этап – контроль исходных характеристик и фиксация состояния до ускоренной выдержки. Для лабораторных новых труб сравнение выполняют относительно контрольной партии, не подвергавшейся старению. У образцов, извлеченных из эксплуатации, точное первоначальное состояние часто остается неизвестным; в таком случае свойство, измеренное в момент обследования, принимают за текущий уровень, а сведения о новой партии привлекают лишь при доказанной сопоставимости рецептуры и истории изготовления. Подмена неизвестной исходной прочности справочным значением может создавать систематическую ошибку.

На третьем этапе разрабатывают несколько уровней температуры старения и серию времен отбора. Для температурной экстраполяции целесообразно использовать по меньшей мере три разнесенных уровня температуры, которые обеспечивают различимую скорость деградации без изменения механизма процесса. Условия выдержки должны исключать термодеструкцию, нехарактерную для работы трубы; это ограничение задает границы режима и, по нашему мнению, предохраняет эксперимент от некорректного ускорения. Размер группы выбирают на основании ожидаемой вариабельности и требуемой точности – в предварительном плане разумно предусмотреть не менее пяти независимых образцов на точку, но окончательную численность устанавливают расчетом статистической мощности и возможностями стенда.

Матрица представляет собой программу будущего исследования, а не перечень уже выполненных экспериментов (табл. 1). После каждой выдержки образцы помещают в стандартизованные условия кондиционирования, затем измеряют геометрию и проводят испытания по единому протоколу. При разрушительных испытаниях в разных точках времени используют разные образцы, поэтому случайную изменчивость между деталями нельзя трактовать как повторное измерение одной и той же трубы – здесь фиксируются независимые наблюдения, а не последовательные значения для одного объекта.

При сопоставлении климатических режимов важно отдельно планировать контрольный вариант без механической нагрузки. Полимер, выдержанный в камере свободно, может

стареть иначе, чем тот же материал при длительном кольцевом напряжении; следовательно, условия нагружения должны задаваться отдельно уже на стадии схемы испытаний.

Таблица 1 – Предлагаемая матрица ускоренных испытаний (параметры назначаются при разработке программы)

Группа	Воздействие	Контрольные свойства	Назначение
Контрольная	Без ускоренной выдержки	Прочность, удлинение, ОИТ, геометрия	Базовое состояние
Термическая	Несколько температур и времен	Прочность, удлинение, ОИТ	Оценка кинетики окисления
УФ-климатическая	УФ, влажность, циклы	Свойства наружного слоя, микротрещины	Оценка поверхностной деградации
Гидростатическая	Давление при заданной температуре	Время отказа, характер разрушения	Связь с функцией трубы
Эксплуатационная	Реальная среда и режим	Те же признаки в динамике	Независимая верификация

Температура, давление, окислитель и УФ-излучение способны взаимодействовать, вследствие чего простое перемножение коэффициентов ускорения допустимо только после экспериментальной проверки. Если такая проверка отсутствует, оценка остаточного ресурса ограничивается отдельным доминирующим механизмом и соответствующим эксплуатационным сценарием – иной перенос результатов не получает достаточного обоснования.

Обсуждение

Для сравнительного анализа выбирают измеряемое свойство $P(t, T)$, чувствительное к старению и функционально связанное с безопасностью изделия. Нормированную сохраняемую характеристику можно представить, как отношение текущего значения к исходному – такая запись задает основу последующего сопоставления. Если значение оказывается меньше единицы, это указывает на снижение свойства, но не обязательно означает ухудшение всех критериев надежности: некоторые показатели, претерпевая физические перестройки структуры, временно возрастают.

$$R(t, T) = \frac{P(t, T)}{P(0, T)}, \quad (1)$$

При предварительном анализе иногда принимают экспоненциальную кинетику

$$R(t, T) = \exp[-k(T)t], \quad (2)$$

где $k(T)$ – эффективная константа изменения выбранного показателя.

Эта модель носит эмпирический характер, а не рассматривается как универсальный закон деградации полиэтилена. Ее применимость проверяют по форме экспериментальных кривых и остаткам регрессии; альтернативой может служить степенная либо двухстадийная зависимость с индукционным периодом. Если наблюдается заметный индукционный этап, использование одной экспоненты во всем диапазоне времени приводит к завышению или занижению календарного ресурса.

Предельное состояние задают инженерным критерием R_{crit} для конкретного свойства либо нормативно значимым условием разрушения трубы под рабочим давлением. Критерий сохраняемой прочности, например, 0,8, допустим только как заранее обоснованное проектное допущение: его нельзя объявлять общим нормативным порогом отказа трубопровода. Для экспоненциальной модели расчетное время достижения порога выражается через логарифм отношения свойств – именно эта запись связывает выбранный критерий с прогнозной длительностью работы.

$$t_{crit}(T) = -\frac{\ln R_{crit}}{k(T)}, \quad (3)$$

Температурную зависимость k в ограниченном диапазоне температур можно аппроксимировать уравнением Аррениуса. В координатах $\ln k$ и $1/T$ определяют эффективную энергию активации E_a и коэффициент A ; тем самым получают параметры температурной чувствительности. Температуру подставляют в кельвинах – использование градусов Цельсия в знаменателе недопустимо. Коэффициент ускорения между температурой испытания T_{test} и эксплуатации T_{use} затем задают отношением соответствующих констант, а для термического старения общие принципы оценки температурно-временных характеристик представлены в ISO 2578 [4].

$$k(T) = A \exp[-E_a / (R_g T)], \quad (4)$$

$$AF = \frac{k(T_{test})}{k(T_{use})} = \exp \left[\left(\frac{E_a}{R_g} \right) \left(\frac{1}{T_{use}} - \frac{1}{T_{test}} \right) \right], \quad (5)$$

где R_g – универсальная газовая постоянная;

E_a – эффективная энергия активации конкретного наблюдаемого процесса.

Полученное AF действительно переводит время только при сохранении одной и той же контролирующей кинетики. При высоких температурах возможны исчерпание антиоксидантов, изменение кристалличности и диффузионное ограничение доступа кислорода, приводящие к другой энергии активации. По этой причине прямолинейность графика на ограниченном наборе точек является необходимой, но недостаточной проверкой физической состоятельности модели.

Для уже эксплуатируемой трубы прогноз остаточного ресурса удобно определять от даты обследования t_0 . Если на момент обследования измерено R_0 и дальнейшая деградация подчиняется локальной экспоненциальной модели с параметром k_{use} , прогнозируемая продолжительность до достижения критерия вычисляется как разность времен. Необходимо учитывать, что время до текущего состояния могло проходить при другом температурном режиме, поэтому подстановка полного календарного возраста вместо текущего измеренного состояния без дополнительных данных нежелательна.

$$trem = \frac{\ln \frac{R_0}{R_{crit}}}{k_{use}}, \quad R_0 > R_{crit}, \quad (6)$$

Для переменной температуры в эксплуатации принцип накопленного повреждения может быть записан как интеграл от скорости деградации. Его использование допустимо лишь при принятой гипотезе о едином механизме и отсутствии восстановительных процессов. Суточные и сезонные колебания температуры рассчитывают по журналам, а не заменяют одним максимальным значением; при таком подходе, как представляется, неопределенность температурного сценария способна оказаться больше статистической ошибки лабораторного подбора коэффициентов - именно она нередко определяет предел достоверности прогноза.

Последовательность вычисления включает пять логических шагов. Сначала измеренные свойства группируют по температуре и времени воздействия, проверяя единицы и повторяемость. Затем для каждого уровня определяют эмпирическую кривую деградации, отдельно сопоставляя одностадийную экспоненциальную модель и зависимость с возможным индукционным периодом. Далее рассчитывают $k(T)$ с доверительными интервалами, строят график $\ln k$ от $1/T$ и исследуют систематические отклонения; после этого выполняют пересчет на ожидаемый режим эксплуатации и прогнозируют момент достижения обоснованного критерия – в завершение прогноз проверяют независимыми гидростатическими и, по возможности, натурными наблюдениями.

В качестве иллюстрации вычислительного алгоритма можно задать условный коэффициент скорости деградации $k=0,002 \text{ год}^{-1}$, текущую относительную характеристику $R_0=0,92$ и условный порог $R_{crit}=0,80$. Тогда формула (6) дает приблизительно 69,9 года. Эта цифра служит только математическим примером, не относится к конкретному материалу и не должна интерпретироваться как прогноз службы трубы; показательно, что столь большой результат при слабой модели демонстрирует опасность дальнего экстраполирования – особенно в тех случаях, когда параметры получены из короткой ускоренной серии.

В действительной задаче оценку нельзя ограничивать одной точкой. Параметры E_a , A , R_0 и выбранный предел обладают погрешностями, причем оценки A и E_a часто статистически связаны. По этой причине предпочтительны совместная нелинейная регрессия с последующим параметрическим бутстрэпом либо оценивание неопределенности методом Монте-Карло, если заданы обоснованные распределения входных величин. В отчете следует приводить медианный прогноз и интервал, а при принятии решения о безопасности ориентироваться на консервативную границу с учетом стоимости последствий отказа – такой выбор соотносит расчетную неопределенность с инженерным риском (табл. 2).

Таблица 2 – Источники неопределенности прогноза остаточного ресурса

Источник	Проявление в результатах	Способ контроля
Разброс материала	Разная скорость деградации партий	Независимые образцы и учет партии
Температура выдержки	Смещение оценки скорости	Калибровка датчиков и журнал температуры
Выбор модели	Различие дальних экстраполяций	Сопоставление альтернативных кинетик
Условия эксплуатации	Неизвестная температурная и химическая история	Полевой мониторинг среды и давления
Критерий отказа	Разные времена достижения порога	Функциональные испытания, анализ риска

Перечисленные факторы имеют различную природу: одни устраняются повышением лабораторной точности, другие отражают реальную неоднородность труб, третьи обусловлены неопределенностью будущих условий эксплуатации. Последнюю составляющую нельзя снять простым увеличением числа параллельных образцов. Достоверность модели следует подтверждать не только узостью доверительного интервала, но и ее устойчивостью при исключении отдельной температуры или отдельной партии из калибровочного набора - именно такая проверка показывает, насколько результат зависит от структуры исходных данных.

Нормативная оценка способности термопластической трубы воспринимать длительное внутреннее давление строится на испытаниях с фиксированным кольцевым напряжением и зарегистрированным временем до разрушения. ISO 9080 [1] использует статистическую экстраполяцию таких результатов для оценки долговременной гидростатической прочности. Важно отличать эту процедуру от аппроксимации изменения одного показателя растяжения после старения: они имеют разные зависимые переменные и разные критерии предельного состояния. Прогноз по прочности материала должен быть согласован с результатами испытаний трубы как изделия.

Для тонкостенной трубы приближенное кольцевое напряжение можно выразить через внутреннее давление, наружный диаметр и толщину стенки. В трубопроводной практике обычно используют выражение для среднего диаметра с учетом геометрии; точную расчетную формулу необходимо брать из применимого нормативного документа и учитывать область пригодности модели. При этом неоднородное истончение стенки, локальная царапина либо сварной шов способны вызывать концентрацию напряжений – среднее номинальное значение ее не отражает, и отсюда - риск недооценки локального напряженного состояния.

Особого внимания требуют случаи, когда исследуемый критерий старения ухудшается сравнительно медленно, а вероятность хрупкого отказа при локальном дефекте резко растет. Тогда критической оказывается не средняя остаточная прочность, а сопротивление медленному росту трещин. По этой причине прогноз на основе климатических испытаний должен включать проверку механизма разрушения и, при необходимости, специализированные испытания трещиностойкости; простая модель потери относительного удлинения – даже при аккуратной калибровке – не позволяет предсказать все возможные формы разрушения напорного трубопровода.

Сопоставление данных ускоренных и эксплуатационных испытаний выполняют по общим индикаторам. Если после лабораторной выдержки и нескольких лет реальной службы наблюдаются разные химические признаки деградации, экстраполяция по одной энергии активации должна быть пересмотрена. Положительным признаком состоятельности служит совпадение направлений изменения характеристик, морфологии повреждений и механизма разрушения при функциональном испытании; при несовпадении, как представляется, целесообразнее давать сценарную оценку – вместо одного числа лет.

В инженерном обследовании остаточный ресурс следует интерпретировать как условный прогноз при сохраняющихся режимах и конкретном предельном критерии. Он не представляет собой сертификат безопасности и не заменяет оценку фактического состояния соединений, арматуры, опор, мест врезки и участков с повышенным давлением. Даже достаточный запас свойств материала не исключает утечки на сварном стыке или разрушения вследствие ошибочного монтажа; поэтому программа обследования должна сочетать свойства извлеченных образцов, как одну группу данных – с инструментальными сведениями о целостности системы.

При доступности только одного короткого ряда климатических измерений допустим предварительный сравнительный вывод, например, о большей или меньшей устойчивости рецептур к определенному виду старения. Количественный прогноз ресурса на десятилетия в такой ситуации методически незащищен. Для утверждения о сроке до предельного состояния требуются несколько температур, информация о вариации между образцами, обоснованный режим эксплуатации и независимая проверка экстраполяционной модели; чем дальше прогноз выходит за диапазон наблюдений – тем более явно должны показываться его ограничения.

Предлагаемая схема особенно полезна при выборе интервала последующих обследований. Если модель дает широкий интервал остаточного ресурса и его нижняя граница близка к планируемому межремонтному периоду, рационально сократить интервал диагностики либо провести расширенные испытания. В противоположность этому узкий прогноз, подтвержденный гидростатическими испытаниями, может служить одним из аргументов для риск-ориентированного планирования ремонта; итоговое решение должно учитывать не только механические свойства полимера - но и категорию последствий отказа трубопровода.

Заключение

Разработанная обзорно-методическая схема оценки остаточного ресурса полимерных трубопроводов предусматривает отбор репрезентативных образцов, отдельное моделирование механизмов старения, определение сохраняемых свойств и функциональную проверку гидростатической прочности. Для тепловой деградации возможна температурно-временная экстраполяция по Аррениусу, но только при подтвержденном постоянстве контролирующего механизма и отсутствии необоснованного перехода к существенно более высоким температурам.

Выбор критерия предельного состояния необходимо связывать с условиями службы и вероятным видом отказа. Снижение относительного удлинения или времени индукции окисления является диагностическим признаком, но не равнозначно автоматическому достижению предела долговечности трубы. Наиболее надежная постановка объединяет показатели структуры и механических свойств с испытаниями под внутренним давлением и наблюдениями в эксплуатации.

Литература

1. ISO 9080:2012. Plastics piping and ducting systems – Determination of the long-term hydrostatic strength of thermoplastics materials in pipe form by extrapolation. Geneva: ISO, 2012. URL: <https://www.iso.org/standard/43860.html> (дата обращения: 21.10.2026).
2. ISO 1167-1:2006. Thermoplastics pipes, fittings and assemblies for the conveyance of fluids – Determination of the resistance to internal pressure – Part 1: General method. Geneva: ISO, 2006. URL: <https://www.iso.org/standard/33981.html> (дата обращения: 21.10.2026).

3. ASTM F2023-21. Standard Test Method for Evaluating the Oxidative Resistance of Crosslinked Polyethylene (PEX) Pipe, Tubing and Systems to Hot Chlorinated Water. West Conshohocken: ASTM International, 2021. URL: <https://store.astm.org/f2023-21.html> (дата обращения: 21.10.2026).

4. ISO 2578:1993. Plastics – Determination of time-temperature limits after prolonged exposure to heat. Geneva: ISO, 1993. URL: <https://www.iso.org/standard/7547.html> (дата обращения: 21.10.2026).

5. ISO 11357-6:2018. Plastics – Differential scanning calorimetry (DSC) – Part 6: Determination of oxidation induction time (isothermal OIT) and oxidation induction temperature (dynamic OIT). Geneva: ISO, 2018.

6. ISO 6259-1:2015. Thermoplastics pipes – Determination of tensile properties – Part 1: General test method. Geneva: ISO, 2015.

7. ASTM D638-22. Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics. – West Conshohocken: ASTM International, 2022.

8. ISO 4892-3:2024. Plastics – Methods of exposure to laboratory light sources – Part 3: Fluorescent UV lamps. Geneva: ISO, 2024.