

Термоокислительная деструкция – основной фактор сокращения срока службы полипропиленовых труб

Рецензия эксперта на статью получена
14.05.2026 [The expert review of the article
was received on May 14, 2026]

В технической документации производителей и поставщиков полипропиленовых труб для напорных систем отопления и горячего водоснабжения (ГВС) обычно указывается лишь обобщённая информация о материале: «продукция изготовлена из материала “рандом-сополимер полипропилена” (PP-R)». Сведений о конкретной марке применяемого PP-R-компаунда, его рецептуре, физико-механических характеристиках, а также данных, подтверждающих заявленные эксплуатационные свойства, не предоставляется.

PP-R-компаунды, из которых производятся трубы, существенно различаются по устойчивости к термоокислительной деструкции, протекающей в условиях длительного воздействия повышенных температур и внутреннего давления. Данный процесс является одним из ключевых факторов, ограничивающих срок службы полимерных трубопроводов.

Именно состав и свойства исходного PP-R-компаунда в значительной степени определяют долговечность труб из полипропилена при эксплуатации в системах

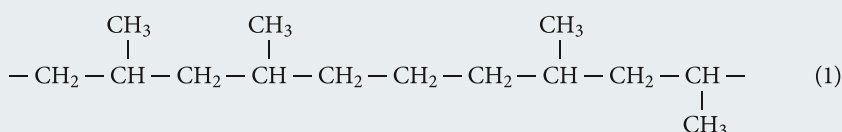
отопления и ГВС. Отсутствие детализированной информации о характеристиках материала затрудняет объективную оценку надёжности и прогнозирование ресурса таких трубопроводов, что обуславливает актуальность исследования процессов термоокислительной деструкции полипропиленовых PP-R-труб.

Термоокислительная деструкция: причины и последствия

Обобщённая структурная формула (1) рандом-сополимера полипропилена имеет вид [1, 2], представленный на рис. 1.

PP-R-материал, представленный формулой (1), обладает рядом уникальных свойств для практического применения, однако он подвержен термоокислительной дегградации при длительном воздействии даже относительно невысоких температур (+70...+80 °C) в присутствии кислорода [3].

Процесс дегградации инициируется гомолитическим разрывом C—H-связей в макромолекуле полипропилена с образованием свободных радикалов.



здесь:

- CH₂ = CH — CH₃ — структурная формула пропилена (мономера);
- CH₂ — CH(CH₃) — структурное (повторяющееся) звено полипропилена;
- CH₂ = CH₂ — структурная формула этилена (мономера) до полимеризации с двойной связью между атомами углерода;
- CH₂ — CH₂ — структурное повторяющееся звено этилена.

Рис. 1. Обобщённая структурная формула рандом-сополимера полипропилена [1, 2]

УДК 678.742.3:620.193. Научная специальность: 2.1.4.

Термоокислительная деструкция — основной фактор сокращения сроков службы полипропиленовых труб

Антон Олегович Сушицкий, студент, Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет (СПбГАСУ)

Проанализированы структурные особенности рандом-сополимера пропилен (PP-R) и механизм его дегградации при длительном воздействии относительно невысоких температур в присутствии кислорода. Показано, что ключевым фактором повышения стойкости материала к термоокислительной реакции являются антиоксидантные стабилизирующие добавки, рецептуры которых у разных производителей PP-R-компаундов индивидуальны, вследствие чего долговечность труб в реальных условиях эксплуатации существенно варьируется. Сделан детальный разбор графика изменения длительной прочности PP-R-компаунда одного из производителей, показаны его отличия от графика длительной прочности ГОСТ. Обоснована необходимость расчёта рабочих параметров полипропиленовых труб на основе фактических графиков длительной прочности компаунда PP-R, из которого они сделаны.

Ключевые слова: полипропиленовые трубы для систем отопления и горячего водоснабжения, термоокислительная деструкция рандом-сополимера пропилен и механизм его дегградации, антиоксидантные стабилизирующие добавки, графики длительной прочности PP-R-компаундов, рабочие параметры полипропиленовых труб.

UDC 678.742.3:620.193. Scientific specialty number: 2.1.4.

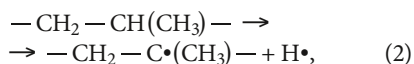
Thermal-oxidative degradation is the main factor in reducing the service life of polypropylene pipes

Anton O. Sushitsky, student, St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (SPbGASU)

This paper analyzes the structural features of a random propylene copolymer (PP-R) and its degradation mechanism under prolonged exposure to relatively low temperatures in the presence of oxygen. It is shown that antioxidant stabilizing additives, whose formulations vary among PP-R compound manufacturers, are a key factor in increasing the material's resistance to thermal-oxidative reactions. Consequently, the durability of pipes under real-world operating conditions varies significantly. A detailed analysis of the long-term strength curve for PP-R compound from one manufacturer is provided, demonstrating its differences from the State Industry Standard of Russia (GOST) long-term strength curve. The need to calculate the operating parameters of polypropylene pipes based on the actual long-term strength curves of the PP-R compound from which they are made is substantiated.

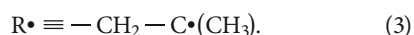
Key words: polypropylene pipes for heating and hot water supply systems, thermal and oxidative degradation of propylene random copolymer and its degradation mechanism, antioxidant stabilizing additives, graphs of long-term strength of PP-R compounds, operating parameters of polypropylene pipes.

Наиболее уязвимыми являются третичные атомы углерода пропиленовых звеньев, что обусловлено пониженной энергией диссоциации соответствующих C—H-связей [3]:



где «•» — неспаренный электрон; H• — атом водорода, который отрывается от углерода; « $-\text{CH}_2-\text{C}\cdot(\text{CH}_3)-$ » — третичный макрорадикал термоокислительной деструкции.

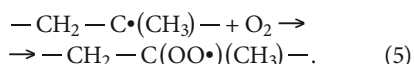
В результате инициирования реакции (2) происходит разрыв макромолекулярных цепей полипропилена с образованием макрорадикалов R•, содержащих локализованный радикальный центр. Наиболее устойчивыми являются третичные макрорадикалы вида [3]:



При взаимодействии макрорадикалов с молекулярным кислородом протекает быстрая диффузионно-контролируемая реакция с образованием пероксильных радикалов:



Пероксильный радикал ROO• содержит термодинамически нестабильную пероксидную связь O—O, которая обуславливает его высокую реакционную способность. Структурная форма реакции образования пероксильного радикала:



Пероксильный радикал ROO• (4) способен вступать в реакцию отрыва атома водорода от соседнего фрагмента полимерной цепи RH, что приводит к образованию гидропероксида ROOH и нового макрорадикала R• — реакция роста цепи автоокисления [5]:



где RH — фрагмент полимерной цепи, содержащий атом водорода, способный к отщеплению; ROOH — гидропероксид (содержащий группу —OOH); R• — новый макрорадикал, способный продолжить окисление.

Образующийся гидропероксид является ключевым промежуточным продуктом термоокислительной деструкции, характеризуется термической неустойчивостью и при повышенных температурах (+70...+80°C) способен к гомолитическому распаду по связи O—O с образованием алкоксильного и гидроксильного радикалов по следующей формуле:

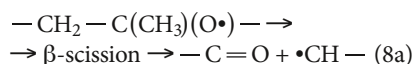


где RO• — алкоксильный радикал, который способствует разрыву цепи, и может образовывать новые радикалы; •OH — гидроксильный радикал, который может атаковать другие участки полимера.

Алкоксильные радикалы RO•, образующиеся при разложении гидропероксидов, характеризуются высокой реакционной способностью и способны инициировать β-расщепление макромолекулярной цепи полипропилена. Это приводит к разрыву цепи, образованию новых макрорадикалов и низкомолекулярных кислородсодержащих соединений (преимущественно карбонильных соединений) [6].

Каждый производитель рандом-сополимера полипропилена создаёт и использует свой уникальный состав антиоксидантных добавок. И термоокислительная стойкость полипропиленовых труб для горячего водоснабжения и отопления, сделанных из PP-R-компаунда от разных производителей, будет разной

Схематически данный процесс может быть представлен следующим образом:



или $\text{RO}\cdot \rightarrow$ разрыв цепи $\rightarrow$ новые радикалы + низкомолекулярные продукты (8б).

Низкомолекулярные продукты температурной деструкции: кетоны (C=O); альдегиды (—CHO), ненасыщенные углеводороды, пропен, этен (этилен, C₂H₄), диоксид углерода (CO₂).

В результате цепной реакции окисления происходит деструкция полимерной матрицы рандом-сополимера полипропилена, снижение молекулярной массы и увеличение показателя текучести расплава (ПТР), также ухудшаются механические характеристики, повышается хрупкость и происходит изменение цвета материала (пожелтение).

Для повышения температурной стойкости рандом-сополимера полипропилена и замедления термоокислительной деструкции в исходный (базовый) PP-R подмешивают специальные добавки, называемые модификаторами (антиоксидантами) [7]. Подавляющее число производителей базового PP-R-материала используют антиоксиданты двух уровней: первичные и вторичные. В качестве антиоксидантов первого уровня (радикальные ингибиторы) наиболее часто

применяют стерически затруднённые фенолы — класс органических соединений, в структуре которых бензольное кольцо помимо гидроксильных групп содержит объёмные алкильные заместители. Их задача — перехватывать свободные радикалы (R•, ROO•) полипропилена, прерывая цепную реакцию окисления. Антиоксиданты второго уровня разлагают образующиеся при температурной деструкции PP-R-материала гидропероксиды (ROOH) и блокируют образование новых радикалов. Основные представители антиоксидантов второго уровня: фосфиты (соли фосфористой кислоты H₃PO₃); фосфониты [фосфорорганические соединения с формулой R—P(OR')₂]; тиоэфиры [сероорганические соединения с молекулярной структурой R—C(=O)—S—R'].

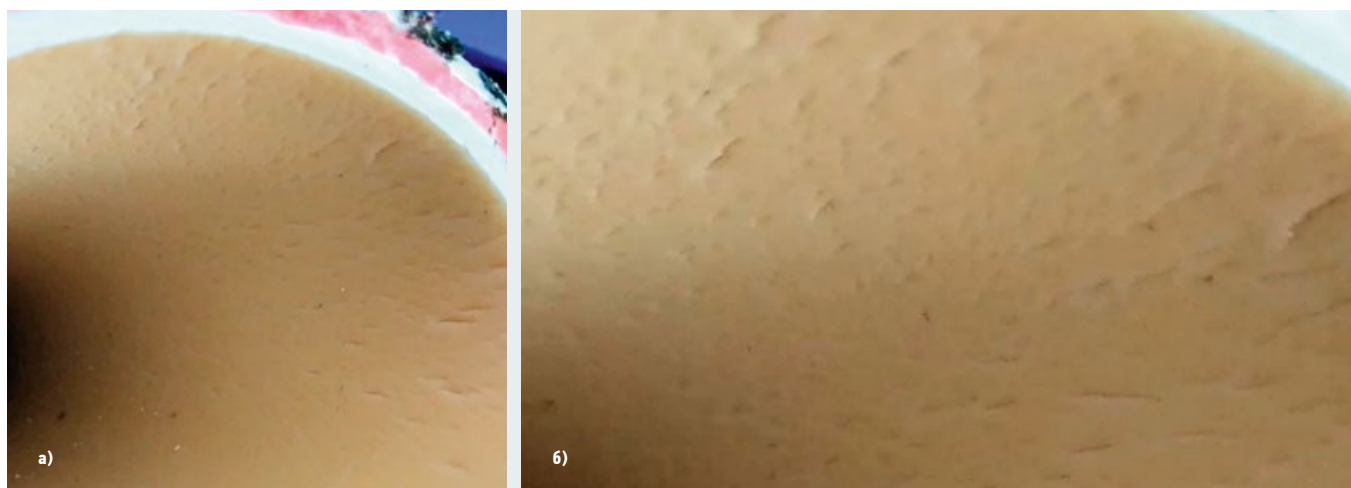
Комбинация антиоксидантов в PP-R-материале даёт синергетический эффект:

- стерически затруднённые фенолы блокируют свободные радикалы (R•, ROO•);
- фосфиты (фосфониты) разлагают пероксиды (ROOH);
- общий результат — существенное увеличение срока службы PP-R-продукции при повышенных температурах (например, PP-R-труб в системах ГВС).

Конкретную рецептуру антиоксидантных добавок нормативные документы (ГОСТ, ISO) не устанавливают. Есть лишь ориентировочные рекомендации по концентрациям антиоксидантных добавок в полипропиленовых (PP-R) рецептурах от производителей антиоксидантов. Так, например, в [8] даётся совет применения фенольных антиоксидантов в пределах 0,05–0,15% от массы исходного сырья, а фосфитов (фосфонитов) в пределах 0,10–0,25% для производства продукции, эксплуатируемой при температуре до +100°C (кратковременно). Суммарное количество антиоксидантов, по данным [8], должно лежать в пределах 0,15–0,4% от массы исходного PP-R-материала — диапазон допусков составляет почти 160%.

Однако как это исполняется на практике — неизвестно. Каждый производитель рандом-сополимера полипропилена создаёт и использует свой уникальный состав антиоксидантных добавок. По сути, конкретная рецептура антиоксидантных добавок — это «ноу-хау» производителя PP-R-компаунда (PP-R-материала с комплектом антиоксидантных добавок) и его коммерческая тайна.

Из этого следует очевидный вывод: термоокислительная стойкость полипропиленовых труб для отопления и ГВС, сделанных из материала «рандом-сополимер полипропилена» от разных производителей, будет разной.



:: Фото 1. Фрагмент полипропиленовой трубы, находящейся три года в эксплуатации в системе горячего водоснабжения многоквартирного дома, расположенного в городе Санкт-Петербурге (а — общий вид фрагмента трубы, б — увеличенный участок трубы)

Практические иллюстрации

На фото 1а показан фрагмент полипропиленовой трубы, находящейся в эксплуатации три года в системе ГВС многоквартирного дома в городе Санкт-Петербурге. На фото 1б представлен этот же фрагмент полипропиленовой трубы, но в увеличенном масштабе. Данные фотоиллюстрации отражают факт термической деструкции внутреннего слоя полипропиленовой трубы: имеется пожелтение материала и вымывание антиоксидантов с образованием хаотично расположенных мелких кратеров. Дальнейшая эксплуатация такой трубы в системе ГВС приведёт к аварийной ситуации.

Состояние внутреннего слоя полипропиленовой трубы, показанное на фото 1, является частным случаем поведения PP-R-компаунда от конкретного производителя в системе ГВС.

Полипропиленовая труба, сделанная из PP-R-компаунда другого производителя, после 16 лет эксплуатации в системе ГВС

многоквартирного дома (тоже в Санкт-Петербурге) показана на фото 2.

Состояние поверхности внутреннего слоя полипропиленовой трубы, показанной на фото 2, — практически идеальное, никаких следов температурной деструкции и вымывания антиоксидантов нет, пожелтения внутреннего слоя после 16 лет эксплуатации в системе ГВС многоквартирного дома не произошло.

Представленная на фото 2 труба была демонтирована в многоквартирном доме по программе капитального ремонта системы холодного и горячего водоснабжения. Качество водопроводной воды в данном доме, в том числе воды, которая протекала по демонтированным полипропиленовым трубам, можно косвенно оценить по состоянию стальных оцинкованных труб системы холодного водоснабжения (фото 3).

Данные примеры свидетельствуют, что полипропиленовые трубы, даже сделанные на одном производстве, но из PP-R-

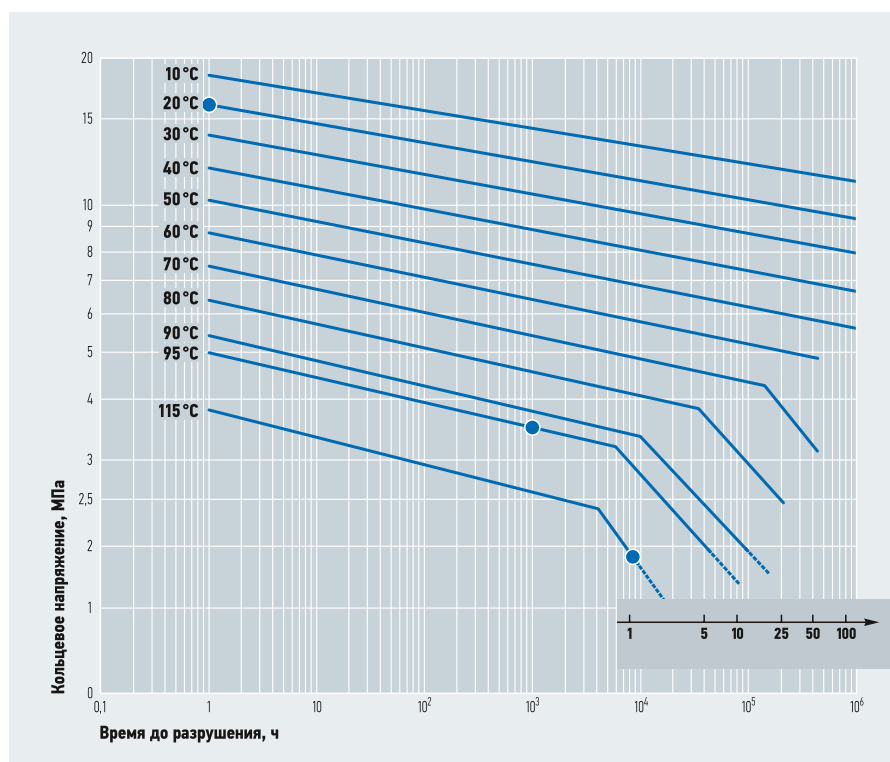
компаундов от различных производителей, могут показывать совершенно разные сроки безаварийной эксплуатации практически в идентичных системах ГВС и отопления.



:: Фото 3. Комплексные отложения коррозионно-минеральных компонентов в стальной оцинкованной трубе системы холодного водоснабжения многоквартирного дома в СПб



:: Фото 2. Фрагмент полипропиленовой трубы после 16 лет эксплуатации в системе горячего водоснабжения МКД в Санкт-Петербурге (а — оригинальный вид состояния фрагмента полипропиленовой трубы, б — отмытый от отложений фрагмент той же полипропиленовой трубы)



:: Рис. 2. Эталонные графики длительной прочности PP-R из ГОСТ 32415 [9]

Индивидуальные особенности PP-R-компаундов – практика

Производители полипропиленовых PP-R-труб в своей технической документации не дают информации о типе и характеристиках используемого PP-R-компаунда. На официальных сайтах и в сопроводительных документах просто указывается, что сделанные из рандом-сополимера полипропилена PP-R-трубы полностью соответствуют требованиям ГОСТ 32415–2013 [9]. Данный ГОСТ устанавливает требования к конструкции полипропиленовых труб (диаметры, толщины стенок, всевозможные варианты допусков по размерам), и в этом смысле полипропиленовые трубы, конечно, должны ему соответствовать. Но есть и другой аспект: указанный стандарт структурировал варианты практического использования труб из термопластов (в том числе полипропиленовых труб) в системах ХВС, ГВС и отопления по пяти классам эксплуатации с определёнными температурными режимами и допустил суммарный срок их службы в каждом классе до 50 лет при условии правильно установленного максимального значения рабочего давления. В этом положении скрыта огромная проблема.

Производители и поставщики полипропиленовых PP-R-труб проводят расчёт максимально допустимых значений рабочего давления по классам эксплуатации по эталонным графикам длительной прочности (Приложение В ГОСТ 32415 [9], рис. 2). Определять значения рабочих давлений по классам эксплуатации, используя эталонные графики длительной прочности, и указывать результаты в сопроводительной документации на продукцию (технических паспортах и каталогах) — недопустимая техническая ошибка. Эталонные графики длительной прочности (рис. 2) представляют собой компиляцию результатов множества лабораторных тестов и практического опыта применения полипропиленовых труб. PP-R-компаундов с характером изменения длительной прочности во времени, соответствующим виду эталонных графиков, в природе не существует. Из этого следует, что заявленные значения рабочих давлений в технических паспортах и каталогах полипропиленовых труб, а также сроки службы по классам эксплуатации, рассчитанные по методике ГОСТ 32415 [9] и эталонным графикам Приложения В [9], не соответствуют свойствам и характеристикам используемых PP-R-компаундов.

Производители и поставщики полипропиленовых PP-R-труб в своей технической документации не дают информации о типе и характеристиках используемого PP-R-компаунда. На официальных сайтах и в сопроводительных документах просто указывается, что сделанные из рандом-сополимера полипропилена PP-R-трубы полностью соответствуют требованиям ГОСТ 32415–2013 [9]. Данный ГОСТ устанавливает требования к конструкции полипропиленовых труб (диаметры, толщины стенок, всевозможные варианты допусков по размерам), и в этом смысле полипропиленовые трубы, конечно, должны ему соответствовать. Но есть и другой аспект: указанный стандарт структурировал варианты практического использования труб из термопластов (в том числе полипропиленовых труб) в системах ХВС, ГВС и отопления по пяти классам эксплуатации с определёнными температурными режимами и допустил суммарный срок их службы в каждом классе до 50 лет при условии правильно установленного максимального значения рабочего давления. В этом положении скрыта огромная проблема.

Производители и поставщики полипропиленовых труб, в зависимости от типа используемого PP-R-компаунда, его структуры, характеристик и параметров, должны рассчитать предельные значения рабочих давлений по классам эксплуатации, при которых продукция может прослужить прогнозируемый срок. Если это не делается, если индивидуальные особенности PP-R-компаундов не учитываются в расчётах максимально допустимых значений рабочих давлений по классам эксплуатации, то сроки службы полипропиленовых труб в системах ХВС, ГВС и отопления рассчитывать бессмысленно.

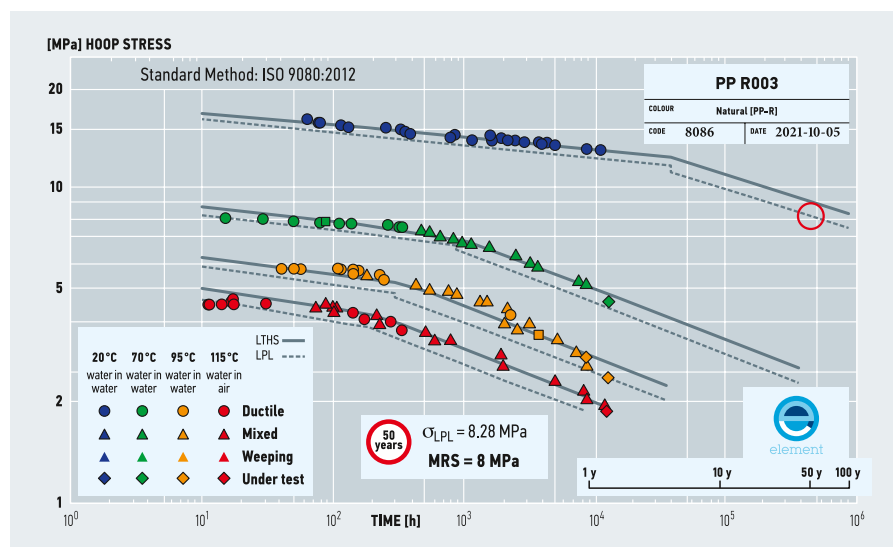
Термоокислительная стойкость на графиках гидростатической прочности PP-R-компаундов

Графики длительной прочности реальных PP-R-компаундов отличаются от эталонных графиков ГОСТ 32415 [9]. Для примера рассмотрим реальный протокол лабораторных испытаний полимерных труб (PP-R-компаунда) на долговременную прочность под внутренним давлением, выполненный лабораторией Element Materials Technology для материала SIBEX PP R003 EX-1 [10], с условным обозначением «R003» в логарифмических координатах:

$$\begin{aligned} x &= \log_{10}(\tau); \\ y &= \log_{10}(\sigma), \end{aligned} \quad (9)$$

где τ — время испытаний; σ — кольцевое напряжение.

Испытание PP-R-компаунда R003 [10] проводилось по методике, представленной в ISO 9080:2012 [11], а именно по методу определения долговременной гидростатической прочности термопластичных материалов труб на основе испытаний под внутренним давлением с последующей статистической экстраполяцией (рис. 3).



:: Рис. 3. Графики длительной прочности PP-R-компаунда R003 [10]

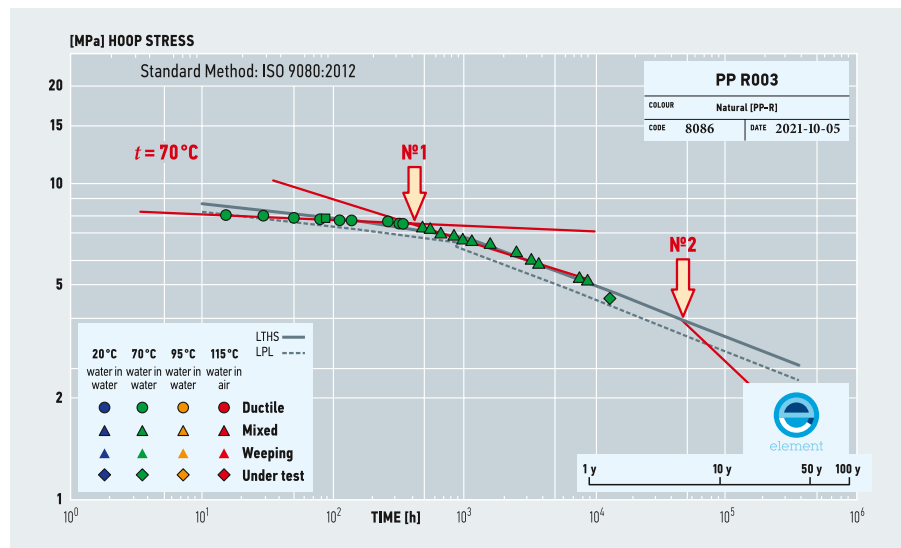
Обозначения на графиках (рис. 3) выполнены по ISO 9080 [11]:

1. **Ductile** — пластичное разрушение с явными признаками деформации и пластичности материала (ползучей характер разрушений).
2. **Brittle** — образцы с «хрупким» разрушением без заметной деформации исследуемой трубы (медленный рост трещины под действием внутренних напряжений), которое происходит из-за окислительной деградации (разрушения макромолекулярных цепей PP-R-материала) вследствие недостатков (вымывания) антиоксидантов или их неправильной работы.
3. **Mixed** — смешанное разрушение (комбинация пластичного и хрупкого механизмов).
4. **Weeping** — микроутечка или слабое протекание воды через стенку трубы.
5. **Under Test** — не разрушенные образцы, оставшиеся после испытаний.

Стандарт ISO 9080 [11] предполагает, что разрушение исследуемых образцов обуславливается ползучестью материала под напряжением [12]. Для выполнения данного условия испытательной средой выступает «очищенная» вода, не создающая агрессивного воздействия на исследуемые образцы. В таких лабораторных условиях деструкция полимерной матрицы полипропилена проявляется в большей степени за счёт температуры и давления воды и в меньшей степени за счёт окислительных процессов вследствие воздействия на материал растворённого кислорода.

Особенно важно, что в ходе испытаний по ISO 9080 [11] определяется одна из важнейших характеристик PP-R-компаунда — минимальная длительная прочность (Minimum Required Strength, MRS) по ГОСТ 32415 [9]. По данным протокола испытаний (рис. 3), у PP-R-компаунда R003 величина MRS составляет 8 МПа. Каждая точка графика рис. 3 является результатом испытания одного образца трубы с конкретным значением кольцевого напряжения и зафиксированным временем его испытания до разрушения. Линия ниже каждого графика (регрессионная прямая) — это нижняя доверительная граница на уровне 97,5 % (доверительной вероятности). Количество точек на графике соответствует числу образцов, прошедших испытание.

Для анализа процессов термоокислительной деструкции и их влияния на механику старения полимера из совокупности графиков гидростатической прочности PP-R-компаунда R003 рис. 3 выделим график, соответствующий температуре среды испытаний +70 °C, и обозначим на нём ряд ключевых особенностей (рис. 4):



•• Рис. 4. Графики гидростатической прочности PP-R-компаунда тип R003 при $t = 70\text{ }^{\circ}\text{C}$

1. Испытание образцов труб из PP-R-компаунда R003 проводилось на промежуток времени 10 000 часов (приблизительно 1,14 года), а общая (интегральная) оценка характера изменения кольцевого напряжения в интервале времени $\tau \in [10; 438\ 000]$ часов получена методом статистической экстраполяции по методике ISO 9080 [11].

2. Пересечением прямых линий красного цвета выделено первое «колено излома» (№1) графика гидростатической прочности, соответствующее сроку испытаний образцов $\tau_{k1} = 500$ часов. При этом левая часть графика соответствует ползучему характеру разрушений Ductile, а правая часть графика — Mixed (комбинация пластичного и хрупкого механизмов).

Колено излома графика гидростатической прочности по методике ISO 9080 [11] отражает факт изменения механизма разрушений исследуемых образцов и наклона графика линейной зависимости σ от $\log_{10}(\tau)$.

3. Интервал времени $\tau \in [10; 500]$ часов соответствует индукционному этапу окислительного старения полимера и начала процесса термоокислительной деструкции вследствие воздействия на образцы труб температуры среды $t = +70\text{ }^{\circ}\text{C}$ и кольцевого напряжения $\sigma_{LTHS}^* = 8,3\text{--}6,9$ МПа. В этот момент запускается процесс стабилизирующих действий антиоксидантов [описан математическими выражениями (2)–(7)]. При $\tau > 500$ часов, вследствие особенностей морфологической структуры полимерной матрицы полипропилена и/или недостаточной эффективности

антиоксидантной системы, проявляется истощение модификаторов. Поэтому реакция термоокислительной деструкции ускоряется, механизм разрушения образцов меняется, и, как следствие, угол наклона графика гидростатической прочности увеличивается.

Крайне важно, что эталонный график длительной прочности PP-R (рис. 4) при $t = +70\text{ }^{\circ}\text{C}$ в интервале времени $\tau \in [10; 145\ 000]$ часов не имеет выраженного колена излома и характеризуется равномерным наклоном, соответствующим ползучему (вязкому) механизму разрушения Ductile.

Наличие «излома» на экспериментальном графике при $\tau_{k1} = 500$ часов свидетельствует о том, что морфологическая структура полимерной матрицы исследуемого PP-R-компаунда R003 и эффективность применённой антиоксидантной системы существенно отличаются от характеристик эталонного материала.

4. На типовых (эталонных) кривых длительной прочности полипропилена ГОСТ 32415 [9] при $t = +70\text{ }^{\circ}\text{C}$ (рис. 2) в точке примерно 150 000 часов присутствует колено излома, характерное для перехода от типа разрушений образцов труб Ductile к хрупкому механизму разрушения Brittle, обусловленному развитием термоокислительной деструкции и истощением антиоксидантной системы материала. Экспериментальная кривая гидростатической прочности PP-R-компаунда R003 в интервале времени $\tau \in [1000; 438\ 000]$ часов не отражает второго излома, характерного для хрупкого механизма разрушения Brittle. Хотя факт присутствия на эталонном графике точки излома, обусловленной хрупким механизмом разрушения Brittle, однозначно обязывает разработчиков протоколов испытаний PP-R-компаундов такой излом отображать на экспериментальных графиках.

* σ_{LTHS} (Long-Term Hydrostatic Strength) — длительная гидростатическая прочность (по ISO 9080:2012 [11]). Данный параметр показывает, какое расчётное напряжение в стенке трубы материал способен выдерживать длительное время под действием внутреннего давления (при заданной постоянной температуре t в течение времени τ).

Парадокс ситуации состоит в том, что методика статистической обработки данных по ISO 9080 [11] предусматривает аппроксимацию кривой длительной прочности двумя линейными участками и, таким образом, не позволяет явно описывать более сложный, потенциально многосегментный характер зависимости, связанный с последовательной сменой механизмов разрушения.

В случае с испытанием PP-R-компаунда R003 «излом» графика гидростатической прочности произошёл в точке $\tau_{k1} = 500$ часов, график получился двухсегментный, и методика ISO 9080 [11] не позволила отобразить второе колено излома, соответствующее хрупкому механизму разрушения Brittle.

Простой инженерный анализ данных, представленных на рис. 4, позволяет выдвинуть утверждение, что, вследствие крайне ранней по времени смены характера разрушения образцов Ductile на Mixed, с учётом сформулированных обоснований п. 3, механизм хрупкого разрушения Brittle произойдёт существенно раньше, чем показано на эталонном графике.

Задача точного определения положения на оси времени колена излома №2 графика гидростатической прочности PP-R-компаунда R003 выходит за рамки данной статьи, однако оценочно можно предположить, что это событие произойдёт в интервале времени:

$$\tau \in [5000; 20\,000] \text{ часов.}$$

Внесение второго колена излома в график гидростатической прочности PP-R-компаунда R003 приведёт к резкому снижению допустимых кольцевых напряжений при использовании труб из данного материала в системах ГВС, что, в свою очередь, потребует значительного уменьшения величин допустимых рабочих давлений или сокращения сроков службы.

Результат

В работе выполнен детальный анализ данных протокола испытаний гидростатической прочности PP-R-компаунда R003, указаны признаки протекания процессов термоокислительной деструкции рандом-сополимера полипропилена и связанных с ними радикальных реакций окисления. На основании анализа характера разрушения образцов труб дана косвенная оценка эффективности применённой антиоксидантной системы.

На примере PP-R-компаунда R003 показаны (табл. 1) существенные отличия графиков гидростатической прочности от типовых зависимостей эталонных графиков, декларируемых специальными стандартами.

Сопоставление параметров эталонных графиков длительной прочности PP-R

табл. 1

№	Наименование параметра*	Данные эталонного графика длительной прочности PP-R по ГОСТ 32415–2013 [9]	Данные графика гидростатической прочности PP-R-компаунда R003
1	MRS, МПа	9,50	8,00
2	σ_{LPL} (график +70 °C) длительность испытаний 10 ч, МПа	6,75	8,05
3	σ_{LPL} (график +70 °C) длительность испытаний 500 ч, МПа	5,62	6,65
4	σ_{LPL} (график +70 °C) прогнозируемый срок службы 50 лет, МПа	3,30	2,63
5	σ_{LPL} (график +95 °C) длительность испытаний 1 год, МПа	2,95	2,70

* MRS (Minimum Required Strength) — показатель минимальной длительной прочности полимерного материала (допустимое напряжение на стенки трубы, которое материал способен выдерживать без разрушения в течение 50 лет при постоянной температуре воды +20 °C). σ_{LPL} (Lower Confidence Limit of Predicted Hydrostatic Strength) — нижний доверительный предел прогнозируемой гидростатической прочности материала трубы (по ГОСТ 32415–2013 [9]), представляет собой 97,5 %-ный нижний доверительный предел прогнозируемой длительной гидростатической прочности при температуре t и времени t .

Заключение

Термоокислительная деструкция — один из факторов снижения прочностных характеристик рандом-сополимера полипропилена. Из-за отсутствия стандартов по количеству и составу антиоксидантных добавок каждый производитель PP-R-компаунда использует свой уникальный состав. По этой причине температурная стойкость и прочностные характеристики полипропиленовых труб для систем отопления и водоснабжения, сделанных из PP-R-компаундов от разных производителей, покажут разные сроки службы даже в одинаковых условиях эксплуатации.

Это обстоятельство следует учитывать при установлении причин преждевременного разрушения полипропиленовых труб, особенно в системах горячего водоснабжения.

Требуется законодательная инициатива, обязывающая производителей и поставщиков полипропиленовых труб для систем отопления и водоснабжения прово-

дить сертификацию продукции по каждому типу PP-R-компаунда с учётом его индивидуальных характеристик.

Обязательным приложением к сертификату соответствия должны быть протоколы испытаний образцов труб по требованиям ГОСТ 32415–2013 [9] и первичные протоколы испытаний PP-R-компаунда по ISO 9080:2012 [11].

Отсутствие данных приложений к сертификату в открытом доступе должно приводить к аннулированию сертификата соответствия.

При наличии в графиках длительной прочности PP-R-компаундов, испытанных по ISO 9080:2012 [11], меньшего количества «колен излома» (при длительном времени испытания), чем показывают аналогичные эталонные графики длительной прочности по ГОСТ 32415–2013 [9], необходимо ограничивать прогнозируемый срок службы полипропиленовых труб, сделанных из такого PP-R-компаунда, в системах отопления и водоснабжения до 30 лет. ●

1. Полипропилен: формула и реакция получения [Электр. текст]. Inpolimer от 30.10.2022. Режим доступа: inpolimer.ru. Дата обрац.: 28.01.2026.
2. Gahleitner M., Paulik Ch. Polypropylene. В кн.: Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry [Электр. текст]. Wiley Online Library от 26.03.2014. Режим доступа: onlinelibrary.wiley.com. Дата обрац.: 10.02.2026.
3. Заворзая Я.Я., Бочкарёв В.В., Лопатинский В.Я., Гулиева Л.А. Деструкция и стабилизация полипропилена (обзор) // Пластические массы, 1990. №3. С. 29–32.
4. Rätzsch M., Arnold M., Borsig E. et al. Radical reactions on polypropylene in the solid state. Progress in Polymer Science. 2002. Vol. 27. Issue 7. Pp. 1195–1282.
5. Шляпников Ю.А. Антиокислительная стабилизация полимеров // Успехи химии, 1981. Т. 50. №6. С. 1036–1063.
6. Гаева Л.Н., Туров Ю.П., Нехорошев В.П., Нехорошев С.В. Структурно-групповой состав низкомолекулярных продуктов термоокислительной деструкции атактического полипропилена // Журнал прикладной химии, 2011. Т. 84. Вып. 3. С. 470–477.
7. Кербер М.Л., Горбунова И.Ю., Владимиров С.И., Куценко Е.С. Изучение влияния сложнэфирных модификаторов на свойства полипропилена // Пластические массы, 2003. №12. С. 26–30.
8. Plastic additives: Your key components for reliable performance in the building & construction industry [Электр. ресурс]. BASF Lampertheim GmbH. Lampertheim, Germany. 2021. Режим доступа: download.basf.com. Дата обрац.: 05.02.2026.
9. ГОСТ 32415–2013. Трубы напорные из термопластов и соединительные детали к ним для систем водоснабжения и отопления. Общие технические условия (с Попр.) / Дата введ.: 01.01.2015.
10. Element test report P-21-221-V2, 2021-10005: Determination of the long-term hydrostatic strength ISO 9080:2012 — Evaluation of the natural PP-R pipe grade SIBEX PP R003 EX-1. Element Materials Technology. London, UK. October 5, 2021.
11. ISO 9080:2012. Plastics piping and ducting systems — Determination of the long-term hydrostatic strength of thermoplastics materials in pipe form by extrapolation. Edition 2. International Organization for Standardization (ISO). Geneva, Switzerland. 2012. 44 p.
12. Порчидзе А.Д. Ползучесть как важнейшее эксплуатационное свойство полимерных материалов // World Science, 2018. Т. 4. №6. С. 54–56.

References — see page 80.

Thermal-oxidative degradation is the main factor in reducing the service life of polypropylene pipes. Pp. 18–23.

Anton O. Sushitsky, student, St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (SPbGASU)

1. *Polipropilen: formula i reaktsiya polucheniya* [Polypropylene: Formula and synthesis reaction]. *Inpolimer* of October 30, 2022. Web-source: inpolimer.ru. Access date: January 28, 2026. [In Russian]
2. M. Gahleitner, Ch. Paulik. Polypropylene. In the book: Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry. Wiley Online Library of March 26, 2014. Web-source: onlinelibrary.wiley.com. Access date: February 10, 2026.
3. Ya.Ya. Zavorzaeva, V.V. Bochkaryov, V.Ya. Lopatinsky, L.A. Gulieva. *Destruktsiya i stabilizatsiya polipropilena (obzor)* [Destruction and stabilization of polypropylene (review)]. *Plasticheskie massy* ["Plastic masses" Magazine]. 1990. No. 3. Pp. 29–32. [In Russian]
4. M. Rätzsch, M. Arnold, E. Borsig, H. Bucka, N. Reichelt. Radical reactions on polypropylene in the solid state. *Progress in Polymer Science*. 2002. Vol. 27. Issue 7. Pp. 1195–1282.
5. Yu.A. Shlyapnikov. *Antioksiditel'naya stabilizatsiya polimerov* [Antioxidant stabilization of polymers]. *Uspekhi khimii* ["Advances in Chemistry" Magazine]. 1981. Vol. 50. No. 6. Pp. 1036–1063. [In Russian]
6. L.N. Gaevaya, Yu.P. Turov, V.P. Nekhoroshev, S.V. Nekhoroshev. *Strukturno-grupповой состав nizkomolekulyarnykh produktov termookislitel'noy destruktsii atakticheskogo polipropilena* [Structural and group composition of low-molecular products of thermal-oxidative degradation of atactic polypropylene]. *Zhurnal prikladnoy khimii* [Journal of Applied Chemistry]. 2011. Vol. 84. Issue 3. Pp. 470–477. [In Russian]
7. M.L. Kerber, I.Yu. Gorbunova, S.I. Vladimirova, E.S. Kuksenko. *Izuchenie vliyaniya slozhnoefirnykh modifikatorov na svoystva polipropilena* [Study of the influence of ester modifiers on the properties of polypropylene]. *Plasticheskie massy* ["Plastic masses" Magazine]. 2003. No. 12. Pp. 26–30. [In Russian]
8. Plastic additives: Your key components for reliable performance in the building & construction industry. BASF Lampertheim GmbH. 2021. Web-source: download.basf.com. Access date: February 5, 2026.
9. GOST 32415–2013 [The State Industry Standard of Russia No. 32415–2013]. *Truby napornye iz termoplastov i soedinitel'nye detali k nim dlya sistem vodosnabzheniya i otopleniya. Obshchie tekhnicheskie usloviya (s Popr.)* [Thermoplastic pressure pipes and fittings for water supply and heating systems. General specifications (with Amendment)]. Date of impl.: January 1, 2015. [In Russian]
10. Element test report P-21-221-V2, 2021-10005: Determination of the long-term hydrostatic strength ISO 9080:2012 — Evaluation of the natural PP-R pipe grade SIBEX PP R003 EX-1. Element Materials Technology. London, UK. October 5, 2021.
11. ISO 9080:2012. Plastics piping and ducting systems — Determination of the long-term hydrostatic strength of thermoplastics materials in pipe form by extrapolation. Edition 2. International Organization for Standardization (ISO). Geneva, Switzerland. 2012. 44 p.
12. A.D. Porchkhidze. *Polzuchest' kak vazhneyshee ekspluatatsionnoe svoystvo polimernykh materialov* [Creep as the most important operational property of polymeric materials]. *World Science*. 2018. Vol. 4. No. 6. Pp. 54–56. [In Russian]