

# ПРОГНОЗ 100-ЛЕТНЕГО СРОКА ЭКСПЛУАТАЦИИ ПОЛИОЛЕФИНОВЫХ БЕЗНАПОРНЫХ ТРУБ

Тим Мейеринг – TERPFA, Бельгия

Жанетт Малдер – Wavin, Нидерланды

Гюнтер Дрейлинг – Borealis, Австрия

Хайнц Фогт – Lyondellbasell, Германия

Доклад на VII международной конференции Plastic Pipes, Чикаго

## Введение

Вопросы оценки срока службы полимерных трубопроводных систем достаточно хорошо проработаны для напорных труб, в которых напряжения в стенке трубы действуют постоянно. Гидравлические испытания труб, проведенные при разных температурах, позволяют дать с помощью экстраполяции Аррениуса достаточно надежные оценки их срока службы при заданных давлении и температуре.

Безнапорные трубы в системах канализации и водоотведения не испытывают внутреннего давления. После укладки и засыпки они испытывают постоянную деформацию и, следовательно, постоянное напряжение. Тем не менее, в существующих международных стандартах на безнапорные системы из ПЭ и ПП труб отсутствуют какие-либо указания на срок их службы. Отсутствует также методика оценки срока службы этих труб, не определены методы испытаний. Цель настоящей работы – обосновать возможность эксплуатации ПЭ и ПП труб, отвечающих требованиям EN13476-3 (тип В) [1], EN12666 [2] и EN1852 [3], в течение не менее чем 100 лет.

Для доказательства возможности длительной эксплуатации безнапорных ПЭ и ПП труб (как гладких, так и со структурированной стенкой) были проведены следующие исследования:

1) подтверждение длительной стойкости материалов труб к термоокислительной деструкции. Определение допустимых напряжений и параметров испытаний на основании результатов гидравлических испытаний и оценки MRS;

2) анализ поведения безнапорных труб под действием длительной деформирующей нагрузки. По результатам испытаний на релаксацию выполнены оценки длительных напряжений. Выполнены оценки риска разрушения трубы под действием длительной постоянной деформации;

3) рассмотрено возможное влияние состава и температур транспортируемых сточных вод на срок службы труб;

4) изучены образцы безнапорных труб из действующих трубопроводов с целью оценки их остаточного ресурса;

5) вся программа испытаний и результаты исследований подтверждены независимой третьей стороной.

## 1. Длительная стойкость к термоокислительной деструкции

Принято считать, что доминирующим механизмом разрушения безнапорных труб в результате химической дегградации полимера является хрупкое разрушение. Для достижения 100-летнего срока службы необходимо доказать, что безнапорные трубы способны противостоять преждевременному разрушению вследствие термоокислительной деструкции.

Самоокисление ПЭ и ПП хорошо изучено [4, 5]. Доказано, что кинетика процессов старения описывается уравнением Аррениуса, устанавливающего зависимость скорости деструкции от температуры:

$$k = \text{const} \cdot \exp\left(-\frac{E_A}{RT}\right),$$

где  $k$  – скорость реакции деструкции при температуре  $T$ ,  $E_A$  – энергия активации процесса старения,  $T$  – абсолютная температура,  $R$  – универсальная газовая постоянная.

На кривых ползучести, полученных по ISO 9080 [6], выделяются разные типы разрушения труб из полиолефинов: в фазе I происходит пластическое разрушение вследствие текучести, в то время как в фазе II доминирует хрупкое разрушение, обусловленное, главным образом, медленным распространением трещин. Срок службы трубы ограничивается фазой III, характеризующейся исключительной хрупкостью, связанной с деструкцией полимера (рис. 1).

Энергию активации  $E_A$  каждой фазы можно определить по наклону кривой Аррениуса, отображающей экспериментальную зависимость времени разрушения при заданном напряжении от температуры (рис. 1).

Как правило, срок службы оценивают на основе уравнения Аррениуса. Примером такой методологии является ISO 9080, пп. 5.1.4 и 5.2, для напорных труб. Было бы логично использовать правила экстраполяции, принятые ISO 9080, и для прогноза 100-летнего срока службы безнапорных труб.

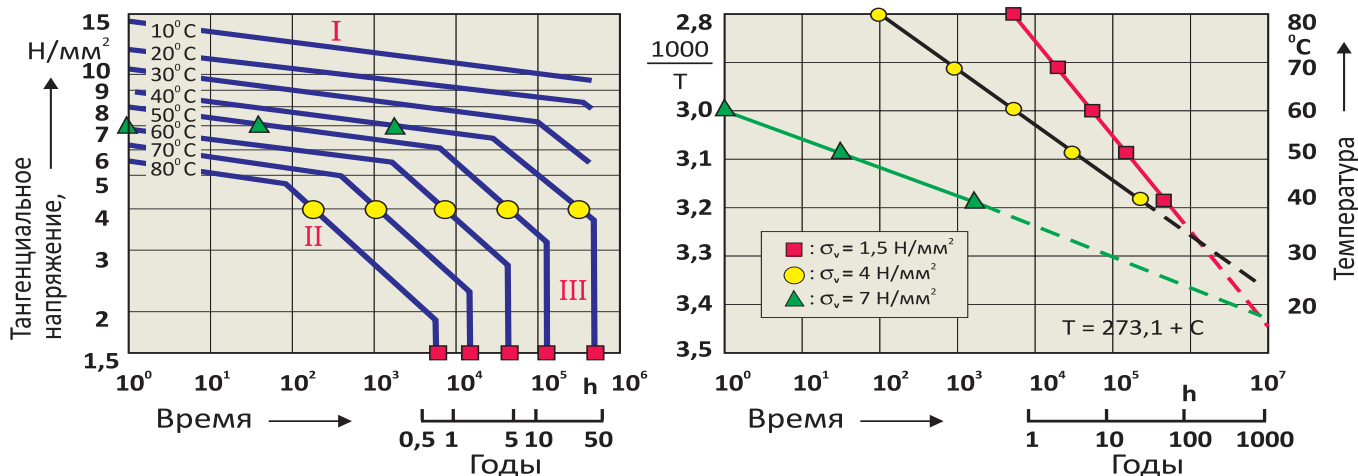


Рис. 1. Общий вид кривых ползучести и кривых Аррениуса

- ▲ Фаза I: пластическое разрушение вследствие текучести
- Фаза II: хрупкое разрушение, связанное с медленным ростом трещин
- Фаза III: хрупкое разрушение, связанное с деструкцией полимера

В этом случае для достижения времени экстраполяции 100 лет ускоренные испытания на старение для безнапорных труб должны проводиться при температуре, превышающей температуру эксплуатации труб минимум на 50°C и длиться минимум 8760 часов (1 год) без хрупкого разрушения.

Было принято, что прогноз 100-летнего срока службы должен строиться для постоянной температуры воды 45°C – в соответствии с EN 476 [7] для систем канализации. Следовательно, минимальная температура старения для безнапорных полиолефиновых труб составляет 95°C, если их кажущаяся энергия активации  $E_A$  процесса старения превышает 90 кДж (что было подтверждено экспериментально).

Если кажущаяся энергия активации  $E_A$  ниже 90 кДж/моль, то для того, чтобы ускорить старение, необходимо повысить температуру. Предварительные экспериментальные результаты показывают, что для блок-сополимера ПП кажущаяся энергия активации  $E_A$  находится в пределах 75–85 кДж/моль.

Таким образом, для подтверждения стойкости трубных полиолефинов к термоокислительной деструкции испытания должны иметь следующие параметры:

ПЭ: 8760 ч (1 год) / 95°C / 1,0 МПа / среда вода–вода (внутр.–наруж.);

ПП: 8760 ч (1 год) / 110°C / 1,0 МПа / среда вода–воздух (внутр.–наруж.);

Марки ПЭ и ПП, рекомендованные для производства безнапорных труб, должны превосходить эти требования.

## 2. Оценка срока службы при постоянном напряжении

Стандарты на ПЭ и ПП безнапорные трубы (гладкие и со структурированной стенкой) не включают расчетов максимально допустимого напряжения для достижения 100-летнего срока службы, т.к. они не описывают длительной зависимости температуры и напряжения. Максимально допустимые напряжения для 100-летнего срока службы можно оценить, используя эталонные кривые, приведенные в стандарте для напорных труб (табл. 1).

Стойкость к медленному распространению трещин в течение 100-летнего срока эксплуатации будет обеспечена, если ПЭ и ПП безнапорные трубы отвечают требованиям соответствующих стандартов и если длительные напряжения не превышают максимально допустимых.

## 3. Оценка срока службы при постоянной деформации и релаксации напряжений

Фактически, режим нагружения безнапорных труб в процессе эксплуатации характеризуется не постоянным напряжением, а постоянной деформацией. В течение довольно короткого времени после укладки (не более 2 лет) деформация трубы и, соответственно, напряжение в трубной стенке перестает нарастать.

В проведенном ТЕPPFA исследовании «Расчет подземных трубопроводов из термопластов» [9] показано, что деформация трубы после 100 лет эксплуатации оста-

Таблица 1. Максимальные допустимые напряжения для 100-летнего срока службы, рассчитанные по эталонным кривым, приведенным в EN ISO 15494 [8]

Тип полиолефина	Напряжение, МПа (45°C / 100 лет)	Напряжение, МПа (30°C / 100 лет)	Напряжение, МПа (23°C / 100 лет)
ПЭ	5,2	6,6	7,4
ПП	3,9	6,9	7,9

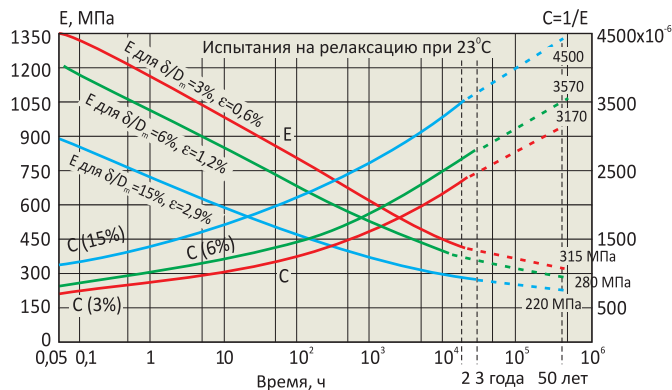


Рис. 2. Кривые релаксации Дженсона [10]

нется существенно ниже допускаемой стандартами EN величины 8%. Из приведенного в исследовании графика следует, что при надлежащем (сильном и среднем) уплотнении грунта засыпки, начальная деформация труб не превышает 2–4%, а после оседания грунта – 6%. При постоянной деформации трубы напряжения в ее стенке будут со временем уменьшаться вследствие процесса релаксации.

В этом исследовании в качестве основы для оценки срока службы труб был принят подход Дженсона [10], в котором ведущая роль отводится релаксации напряжений как функции времени.

В качестве примера, на рис. 2 показаны кривые релаксации, использованные Дженсоном. Для более надежной оценки срока службы трубных материалов экстраполяцию следует проводить по коэффициенту податливости  $C$  – величине, обратной модулю релаксации  $E$ .

Линейный вид кривых отражает физическое старение материала труб. Прямолинейная часть кривых податливости начинается сравнительно рано по времени, и момент начала такого линейного поведения также зависит от типа материала и характера нагружения. Для полиэтилена прямолинейный вид кривых податливости начинается при сильной деформации после 10–100 часов нагрузки. Это означает, что длительный (10–100 часов) модуль релаксации  $E$  для большинства марок ПЭ может быть определен при продолжительности испытаний 1000 часов и более. Надежная экстраполяция данных возможна на период 20–30 лет. Для полипропилена прямолинейная часть обычно начинается после примерно 1000 часов, соответственно, для надежной экстраполяции требуются более длительные испытания – предположительно, минимум 4000 часов.

В работе [11] показана релаксация труб, а также влияние на ее характер низкокачественных материалов и профиля трубной стенки.

#### 4. Измерения релаксации

Испытания на релаксацию были проведены в течение 13270 часов при постоянной деформации 15% при тем-

пературах 23°C и 45°C. Величина деформации 15% была выбрана как экстремальная ситуация, демонстрирующая работоспособность и надежность труб (EN 476 допускает конечную величину деформации 8%, а также утверждает, что случайные и локальные деформации до 15% не вызовут проблем).

Наряду с образцами новых безнапорных труб из современных марок сырья были отобраны три образца из трубопроводов, находящихся в эксплуатации.

Испытания гладких труб (со сплошной стенкой) проводились при 23°C: ПЭ – на образцах диаметром 200 мм SDR 17, как новых, так и из действующих трубопроводов (38 лет эксплуатации), ПП (блок-сополимер) – диаметром 110 мм, SN 6.3, новых и после 23 лет эксплуатации.

Испытания труб со структурированной стенкой (EN13476-3, тип В – гофрированные снаружи) проводились при 23°C и 45°C на образцах труб PP-B диаметром 160 мм, SN 8, новых и б/у (21 год эксплуатации).

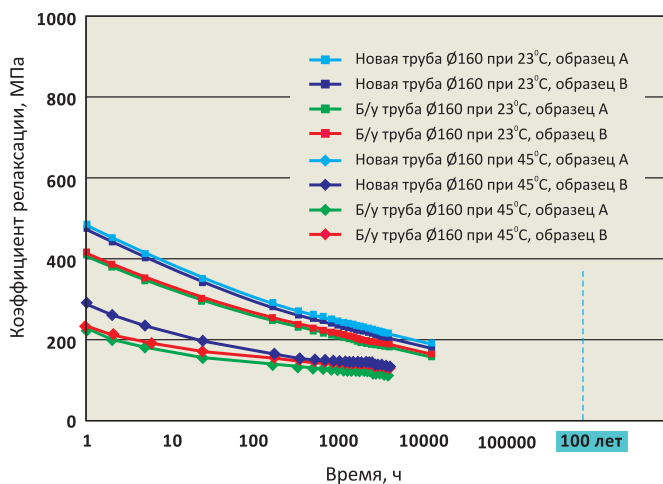


Рис. 3. Коэффициент релаксации ПП гофрированных труб при 23°C и 45°C

Рис. 4. Кривые податливости ПП гофрированных труб при 23°C и 45°C

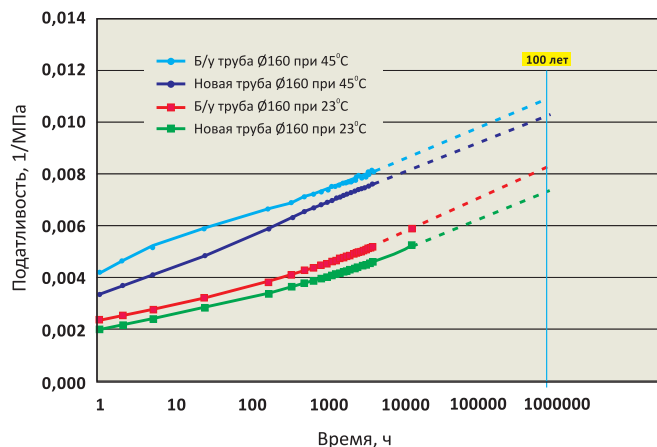


Таблица 2. Значения модуля релаксации (МПа) и податливости (1/МПа), экстраполированные на 100 лет на основании результатов испытаний продолжительностью до 13270 часов

Образцы	Модуль релаксации, МПа	Коэффициент корреляции R *	Коэффициент податливости, 1/МПа
Гладкая ПЭ труба Ø200 мм, б/у, при 23°C	208	0,996	0,0048
Гладкая ПЭ труба Ø200 мм, новая, при 23°C	172	0,996	0,0058
Гладкая ПП труба Ø110 мм, б/у, при 23°C	203	0,999	0,0049
Гладкая ПП труба Ø110 мм, новая, при 23°C	153	0,997	0,0066
Гофрированная ПП труба Ø160 мм, б/у, при 23°C	120	0,998	0,0083
Гофрированная ПП труба Ø160 мм, новая, при 23°C	135	0,998	0,0074
Гофрированная ПП труба Ø160 мм, б/у, при 45°C	92	0,863	0,0109
Гофрированная ПП труба Ø160 мм, новая, при 45°C	97	0,991	0,0103

\*) Коэффициент корреляции R был рассчитан по последним 12 замерам. Значение  $R > 0.99$  указывает на очень высокую корреляцию и прямолинейность кривых

\*\*) Приведенные значения являются средними по двум образцам

В каждом испытании участвовали по два образца из каждого типа трубы. Продолжительность испытаний – 13270 часов (при температуре 45°C – до 4000 часов) – дает хорошую возможность для надежной экстраполяции.

На рис. 3 показаны результаты испытаний на релаксацию образцов гофрированных труб диаметром 160 мм. На рис. 4 – зависимость коэффициента податливости от времени для гофрированных труб с экстраполяцией до 100 лет (каждая линия – средняя по результатам двух определений). Сходные результаты получены для гладких ПП (диаметром 110 мм) и ПЭ (200 мм) труб.

В табл. 2 приведены значения модулей релаксации и податливости для всех образцов, экстраполированные на 100 лет. Следует отметить, что у новых гладких труб экстраполированные значения коэффициента релаксации ниже, чем у труб, бывших в эксплуатации. Кроме того, бывшие в эксплуатации трубы в результате старения обладают большей жесткостью. Это, однако, не распространяется на трубы со структурированной стенкой, у которых новые трубы показали более высокие значения коэффициента релаксации.

## 5. Расчетные деформации и остаточные напряжения в деформированной трубе

Для расчета остаточных напряжений в долгосрочном периоде необходимо знать реальные деформации в стенке трубы и коэффициент релаксации. Деформация  $\varepsilon$  во внешнем слое трубы при заданном изгибе может быть рассчитана по формуле:

$$\varepsilon = Fd \cdot (\delta/Dn) \cdot (2 \cdot e/Dn),$$

а напряжение:

$$\sigma(t) = \varepsilon \cdot E(t),$$

где  $Fd$  – постоянный коэффициент, назначаемый в зависимости от условий нагружения; при поперечной деформации трубы принимается  $Fd = 3$ ,  $\delta$  – изменение диаметра,  $Dn$  – диаметр трубы по нейтральной оси,  $e$  – расстояние от наружного слоя до нейтральной оси. Из-за релаксации действующие в трубе напряжения зависят от времени, поэтому  $\sigma(t)$  – напряжение в момент времени  $t$ ,  $E(t)$  – коэффициент релаксации в этот же момент времени.

На основе полученных результатов испытаний на релаксацию можно рассчитать и проанализировать деформации и напряжения, возникающие в стенке трубы. Приведенные выше формулы позволяют рассчитать реальные постоянные деформации для любой конструкции трубы.

Из них следует, что деформация наружного волокна стенки трубы зависит от величины  $e$ , расстояния до нейтральной оси. Для гладких труб это около половины толщины стенки. Для труб со структурированной стенкой это расстояние существенно больше, а это значит, что деформация наружного волокна гораздо выше. Для расчета деформаций были проанализированы разные конструкции труб. В результате были получены следующие расчетные значения максимальных деформаций, принятые за основу для расчета напряжений (табл. 3).

Таблица 3. Максимальные деформации наружного волокна стенки труб SN8

Деформация трубы	8 %	15 %
Гладкая ПП труба Ø110 мм	0,83 %	1,55 %
Гофрированная ПП труба Ø160 мм	1,81 %	3,39 %
Гладкая ПЭ труба Ø200 мм	1,15 %	2,16 %

Все приведенные в табл. 3 значения относятся к трубам SN8. Для труб SN4 эти значения будут ниже, а для труб более высоких классов жесткости – выше. Значения для труб других диаметров не будут существенно отличаться от указанных.

С полученных кривых релаксации были взяты значения коэффициента релаксации в моменты 1, 24, 400 и 13270 часов. Экстраполированные значения взяты из табл. 2. Величины напряжений в трубах со структурированной стенкой после релаксации в эти моменты времени приведены в табл. 4. Напряжения в стенке гладких труб существенно меньше и не являются критическими.

Из таблицы 4 видно, что при деформации трубы 8% уже через 24 часа во всех образцах напряжение снижается до уровня ниже предельно допустимого, см. также табл. 5. При деформации 15% напряжения снижаются до допустимого уровня в течение 1000 часов. В этом примере приведены результаты расчетов только для труб со структурированной стенкой EN13476-3 тип В. Были также рассчитаны максимальные величины внутренних деформаций всех других диаметров и типов профиля – они лишь очень незначительно отличались от приведенных значений, так что эти значения являются вполне репрезентативными.

Для ПЭ труб, и гладких, и со структурированной стенкой, расчеты дают более низкие начальные значения по сравнению с ПП трубами, но более высокие в длительном периоде, которые, тем не менее, никогда не превышают критических значений благодаря более высоким допустимым напряжениям. При температуре 45°C напряжение оказывается существенно ниже допустимых 4,0 МПа (табл. 5).

Примечание: при конечной величине деформации 8% начальная деформация обычно не превышает 6%. При этом максимальные начальные напряжения суще-

ственно ниже предела ползучести, даже в трубах со структурированной стенкой. Поэтому требование максимальной длительной деформации 8% является вполне безопасным.

Таблица 5 показывает, что если мы рассматриваем постоянную деформацию при 23°C и 45°C, в обоих случаях напряжения в стенке трубы не превышают допустимых значений. Если принять более реалистичную температуру 30°C, критический уровень также не будет достигнут. Тем не менее, следует отметить, что эти оценки выполнены для уровней напряжений в гофрированной трубе, исходя из предела экстраполяции 100 лет. На практике случаются кратковременные превышения этих уровней, и этот вопрос рассмотрен в следующем разделе.

## 6. Концентрация напряжений, анализ методом конечных элементов, визуальный анализ, конструкция стенки

В трубах со структурированной стенкой, независимо от материала трубы, в некоторых особых точках может наблюдаться концентрация напряжений, превышающая расчетные значения. Для выявления таких мест критической концентрации напряжений был проведен анализ методом конечных элементов образца конструкции такой трубы (двухслойная ПП труба диаметром 300 мм с гладким внутренним и гофрированным наружным слоем, деформация 6% и 15%). Он показал, что на некоторых участках гофр начальные напряжения могут быть существенно выше расчетных. Важно было проанализировать возможность возникновения при этом ползучести или растрескивания. Такой анализ входит в число процедур, обязательных при оценке возможности 100-летнего срока эксплуатации. Визуальный осмотр образцов показал отсутствие помутнения, характерного для начала ползучести, и признаков образования трещин.

Необходимо подчеркнуть, что анализ кривых релаксации не выявил никаких нарушений непрерывности этого процесса – растрескивание должно проявляться в изломах на этих кривых, что подтвердило выводы визуального анализа.

Таблица 4. Изменение коэффициента релаксации и напряжений в гофрированной ПП трубе SN8 диаметром 160 мм при 23°C

Время	1 ч	24 ч	400 ч	13270 ч	100 лет
<b>Деформация трубы 15%, деформация наружного волокна 3,39%</b>					
Коэффициент релаксации, МПа	447	328	204	179	135
Напряжение, МПа	15,15	11,11	6,91	6,06	4,57
<b>Деформация трубы 8%, деформация наружного волокна 1,81%</b>					
Коэффициент релаксации, МПа	581	426	265	233	176
Напряжение, МПа	10,50	7,71	4,79	4,21	3,17

Таблица 5. Сравнение допустимых и расчетных напряжений в ПП трубе со структурированной стенкой через 100 лет

Температура	Допустимое напряжение	Расчетное напряжение, МПа, при деформации трубы		Коэффициент релаксации
		8%	15%	
20°C	8,4	3,2	4,6	176/135
30°C	7,0	2,6	4,1	интерполированный
45°C	4,0	2,3	3,3	126/97

С другой стороны, кратковременные испытания при 30% кольцевой деформации и испытания на стойкость к удару позволяют выявить некачественные материалы или недостатки конструкции трубы. Тем не менее, вопрос остается открытым, и при конструировании труб со структурированной стенкой возможность возникновения концентрации напряжений должна быть учтена и сведена к минимуму. Идентификация участков концентрации напряжений в гофрированных трубах имеет большее значение при микроскопических исследованиях по окончании испытаний Дженсона.

## 7. Влияние состава и температуры сточных вод

### 7.1 Возможное влияние сточных вод

Стадия III процесса старения (см. рис. 1) – так называемая стадия окончания жизненного цикла – характеризуется полной выработкой стабилизатора и потерей материалом целостности. В рамках проведенных исследований было изучено влияние состава транспортируемой воды на расход стабилизатора. Исследование проводилось в Technologisches Gewerbe Museum (TGM), в Вене.

Эти исследования не выявили влияния состава сточных вод на скорость старения труб вследствие низкой концентрации примесей. Даже в подключениях к зданиям, где концентрация иногда повышается (кратковременные шок-нагрузки), скорость старения не увеличивается.

### 7.2 Влияние температуры

В основе настоящего исследования возможности 100-летнего срока службы труб лежит предположение о постоянной температуре транспортируемой воды 45°C – в соответствии с EN 476 [10] для безнапорных наружных сетей диаметром до 200 мм. Для более реалистичной оценки необходимы сведения о фактических температурах сточных вод.

В рамках проведенных работ TGM собраны опубликованные данные о температуре сточных вод и, кроме того, проведен мониторинг температуры в течение одного рабочего дня на четырех различных объектах.

Полученные данные показали, что температура сточных вод в течение дня не превышала 30°C, составляя в среднем около 25°C.

Данные, найденные в других источниках, аналогичны полученным в Австрии. Более того, установлено, что на практике температура сточных вод ниже указанной в стандарте (15–20° против 45°C), что дает дополнительный запас надежности.

## 8. Исследования труб – гладких и гофрированных – бывших в эксплуатации

Для прогнозирования срока службы труб большое значение имеет исследование труб, долгое время находящихся в эксплуатации в сетях канализации – оценка происходящих в них изменений и остаточного ресурса. На пяти объектах в Германии, Финляндии, Норвегии и Дании были отобраны образцы труб – гладкой ПП трубы диаметром 110 мм, гофрированной ПП трубы диаметром 160 мм, гладкой ПЭ трубы из полиэтилена первого поколения диаметром 200 мм, а также образцы труб диаметром 280 и 255 мм из современных марок ПЭ. Трубы находились в эксплуатации от 10 до 38 лет. Помимо стандартных испытаний был проведен анализ материала труб и его стабилизации.

Результаты испытаний не выявили ухудшения качества труб и показали, что все трубы отвечают требованиям стандартов. Также было установлено, что содержание стабилизаторов остается достаточным для того, чтобы противостоять термо-окислительной деградации в течение более чем 100 лет.

Кроме того, трубы из ПЭ первого поколения, находящиеся в эксплуатации 38 лет, при гидростатических испытаниях при 80°C показали время разрушения, полностью соответствующее кривой регрессии, что свидетельствует о том, что материал полностью сохранил свои свойства. Этот вывод подтверждается и результатами ОИТ, ИК-Фурье-спектрометрии, гель-проникающей хроматографии и др.

## 9. Выводы

Проведенные исследования показали, что срок службы безнапорных труб из ПЭ и ПП может достигать 100 лет

при соблюдении некоторых важных условий, приведенных в табл. 6.

## Благодарность

Авторы и участники проекта выражают признательность проф. Хайнцу Драгону из TGM, Вена, за его вклад и руководство исследованиями.

## Литература

1. EN 13476-2:2007-05 "Plastics piping systems for non-pressure underground drainage and sewerage – Structured-wall piping systems of non-plasticized poly(vinyl chloride) (PVC-U), polypropylene (PP) and polyethylene (PE) - Part 3: Specifications for pipes and fittings with smooth internal and profiled external surface and the system, Type B.
2. EN 12666-1:2011-11 "Plastics piping systems for non-pressure underground drainage and sewerage – Polyethylene (PE) - Part 1: Specifications for pipes, fittings and the system".
3. EN 1852-1:2009-07 "Plastics piping systems for non-pressure underground drainage and sewerage – Polypropylene (PP) – Part 1: Specifications for pipes and fittings and the system".

4. F. Gugumus, "Thermo-oxidative degradation of polyolefins in the solid state", *Polymer Degradation and Stability*. 1996, 52, 131 ff.
5. J.D. Peterson, S. Vyazovkin, C. A. Wight, "Kinetics of the thermal and thermo-oxidative degradation of polystyrene, polyethylene and polypropylene", *Macromol. Chem. Phys.* 2001, 202, 775–784.
6. ISO 9080:2012-10 "Plastics piping and ducting systems – Determination of the long-term hydrostatic strength of thermoplastics materials in pipe form by extrapolation".
7. EN 476:2011-04 "General requirements for components used in drains and sewers".
8. EN ISO 15494:2003, Plastics piping systems for industrial applications – Polybutene (PB), polyethylene (PE) and polypropylene (PP) – Specifications for components and the system – Metric series.
9. Design of Buried Thermoplastic Pipes, Results of a European research project by APME and TEPFPA, March 1999.
10. Plastics Pipes for Water Supply and Sewage Disposal, by Lars-Eric Janson, Stockholm 2003, 4th edition.
11. Durability testing for 100 year lifetime for buried non-pressure plastic pipes", G. Bergström, S. Nilsson, K.Thörnblom, C.-G. Ek, H. Herbst, A. Stenström, *Plastics Pipes XIII*, Washington DC, 1-5 October 2006.

Таблица 6

Требования к материалу	Термоокислительная деструкция	ПЭ: 95°C, $\sigma = 1,0$ МПа ПП: 110°C, $\sigma = 1,0$ МПа	> 8760 ч > 8760 ч
	Максимальное допустимое напряжение, полученное по имеющимся эталонным кривым	45°C: ПЭ, $\sigma = 5,3$ МПа ПП, $\sigma = 3,9$ МПа 23°C: ПЭ, $\sigma = 7,4$ МПа ПП, $\sigma = 7,9$ МПа	100 лет 100 лет 100 лет 100 лет
Требования к трубам	Гидростатические испытания по EN12666 и EN1852	ПЭ: 80°C, $\sigma = 2,8$ МПа ПП: 95°C, $\sigma = 2,5$ МПа	1000 ч 1000 ч
	Требования к изделию в соответствии с EN13476	Кольцевая гибкость	30%
	Испытания на релаксацию	ПЭ и ПП: в соответствии с [10]	> 4000 ч при 15% деформации
	Микроскопический анализ деформированных образцов трубы	ПЭ и ПП: по окончании испытаний Дженсона продолжительностью > 4000 ч	Отсутствие трещин и др. повреждений
Требования к монтажу	Монтаж труб	В соответствии с CEN/TR1046 В соответствии с исследованием TEPFPA [9]	Среднее или сильное уплотнение грунта засыпки Стандартный Проктор >87 %
	Максимальная деформация трубы при вводе в эксплуатацию	В соответствии с CEN/TR1046	Max. 8 %