

УДК 678.01:539.1/3

Н. Р. ПРОКОПЧУК, профес-  
сор;

О. Я. ТОЛКАЧ, ассистент

### ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ТРУБ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ

The developed technique differs by response, low material consumption, broad propagation of underlying hardware. Using of the given method allows to reduce terms, to save materials and power resources at creation of new technologies and competitive production, and to execute incoming control of raw material, certification of off-the shelf production and to reveal disturbance of technological modes of processing.

Несмотря на накопленный к настоящему времени мировой опыт по изучению старения полимеров в естественных и искусственных условиях, вопрос надежного прогнозирования их долговечности еще далек от своего разрешения [1,2]. В настоящее время практически отсутствуют запатентованные или опубликованные в открытой печати методы прямой оценки долговечности полимерных материалов в реальных условиях их эксплуатации, выражаемой в годах. О долговечности пытаются судить косвенно, например, по коэффициентам сохранения прочности  $K_s$  или эластичности  $K_e$  материала при его ускоренном термо- или фотостарении. Это обусловлено тем, что долговечность полимеров является временным показателем протекания сложных физико-химических превращений в полимерах, скорость которых зависит от множества факторов, зачастую трудно поддающихся учету. Многие ученые ведут поиск параметра, связанного одновременно с химическим строением, составом и структурой полимерного материала — с одной стороны, и временем потери работоспособности изделия под воздействием комплекса факторов — с другой [3-5]. Однако до последнего времени такой универсальный параметр не был найден. Ведущие фирмы Германии, Франции, Японии, США и других стран мира пользуются экстраполяционными методами, основанными на данных длительных натуральных и ускоренных испытаний. Уравнений для расчета долговечности по одному универсальному физико-химическому параметру, надежно определяемому экспериментально, в известной нам литературе нет. Например, в немецкой DIN на пластмассовые трубы приводятся номограммы для оценки их долговечности в годах с учетом температуры и давления воды [6]. Но эти номограммы справедли-

вы лишь для проектирования систем водоснабжения из труб немецкой фирмы Rehau, изготовленных из полипропилена определенного качества или спитого по заданной технологии полиэтилена. Их невозможно применять для сертификации полимерных труб других предприятий-изготовителей.

В Белорусском государственном технологическом университете интенсивно разрабатываются экспресс-методы прогнозирования долговечности полимерных композиционных материалов [7-9]. В основу методов положено уравнение

$$\tau = 10^{-\alpha(E_D - E_{MB} - \gamma\sigma_{CT}) + \beta} \times e^{\frac{(E_D - E_{MB} - \gamma\sigma_{CT})}{RT}}, \quad (1)$$

где  $\tau$  – долговечность в сутках;

$E_D$  – энергия активации термоокислительной деструкции, рассчитываемая методом Бройдо по данным динамической ТГ;

$E_{MB}$  – снижение энергии межмолекулярных взаимодействий на межфазной границе «стенка трубы – теплоноситель»;

$\gamma$  – структурно-чувствительный коэффициент;

$\sigma_{CT}$  – напряжение в стенке трубы, создаваемое давлением воды;

$R$  – универсальная газовая постоянная;

$T$  – температура стенки трубы в К.

Параметр  $E$  полимерных композиционных материалов, макромолекулы которых не подвержены химической сшивке при нагревании, определяется по данным динамической термогравиметрии. Запись кривых ТГ может осуществляться на дериватографе любой модификации фирмы МОМ (г. Будапешт). Расчет значений  $E$  осуществляется по методу Бройдо (двойного логарифмирования).

Параметр  $E$  является высокочувствительным не только к химическому строению, составу и структуре материала, но и к разрушающим факторам, действующим на него в процессе технологической переработки и, особенно, при эксплуатации (тепло, кислород и озон воздуха, УФ-излучение, механические нагрузки, физические и химически агрессивные среды), а также к видоизменениям молекулярной и надмолекулярной структур в процессе старения [10-12]. Методы отличаются быстродействием, низкой материалоемкостью, широким распространением используемого оборудования. Они сокращают сроки, экономят материальные и энергетические ресурсы при создании новых технологий и конкурентоспособной продукции.

По заданию Министерства архитектуры и строительства РБ разработан государственный стандарт Республики Беларусь «Трубы полимерные для систем отопления и горячего водоснабжения. Общие технические условия», согласно которому основным контрольным показателем, гарантирующим качество изделий, выступает долговечность труб.

Напряжение в стенке трубы  $\sigma_{ст}$ , создаваемое давлением воды, рассчитывалось по формуле Кесселя:

$$\sigma_{ст} = \frac{P(d - \delta)}{2\delta} \times K_B, \quad (2)$$

где  $P$  — рабочее давление воды в трубе;  $d$  — диаметр трубы наружный в мм;  $\delta$  — толщина стенки трубы в мм;  $K_B$  — коэффициент безопасности, принимаемый для систем горячего водоснабжения за 1,5, для систем отопления — 2,5.

Произведение  $\sigma_{ст} \times \gamma$  в формуле (1) представляет собой долю энергии, на которую механические напряжения, возникающие в полимерном материале, понижают потенциальный барьер разрыва химических связей полимера  $E$ . Значение структурно-чувствительного коэффициента  $\gamma$  в уравнении Журкова для пластмассы, из которой изготавливаются трубы, устанавливалось экспериментально из температурной зависимости разрушающего напряжения.

В последние годы все большее распространение в народном хозяйстве получают полимерные трубы, используемые для систем горячего и холодного водоснабжения, систем отопления, канализации, а также в качестве подземных газопроводов. Для всех этих видов труб нами были найдены значения долговечности с использованием разработанных экспресс-методов прогнозирования эксплуатационных свойств полимерных материалов.

*Трубы для систем горячего водоснабжения и отопления.* Для систем горячего водоснабжения и отопления применяются трубы из полипропилена и сшитого полиэтилена высокой и средней плотности.

Расчетная долговечность труб ( $\tau$ ), годы, определяется по формуле

$$\tau = \left[ 10^{\alpha(E - E_{M.B.} - \sigma_{ст})} \cdot e^{\frac{(E - E_{M.B.} - \sigma_{ст})}{Rt}} \right] : 365,$$

где  $\alpha$  и  $\beta$  - эмпирические коэффициенты:

для полипропилена  $\alpha = -0,1163$ ;  $\beta = -0,1198$ ;

для сшитого полиэтилена  $\alpha = -0,1167$ ;  $\beta = -0,9000$ ;

$E$  - энергия активации термоокислительной деструкции, кДж/моль;

$\Delta E_{\text{м.в.}}$  - параметр, учитывающий влияние жидкой среды на понижение энергии межмолекулярных взаимодействий на поверхности материала труб (эффект Ребиндера), кДж/моль, равный для труб из полипропилена

при  $t$  до  $60^\circ\text{C}$ ..... 4,0;

при  $t$  выше  $60^\circ\text{C}$  .....2,0;

для труб из сшитого полиэтилена .....1,0;

$\gamma$ -структурно-чувствительный коэффициент материала трубы, кДж/(моль·МПа), принимаемый для труб из полипропилена РР

при  $t$  до  $60^\circ\text{C}$  .....3,75;

при  $t$  выше  $60^\circ\text{C}$  ..... 2,25;

сшитого полиэтилена высокой плотности РЕ-HDX .....2,50;

сшитого полиэтилена средней плотности РЕ-MDX.....3,2;

$\sigma_p$  - расчетное напряжение в стенке трубы, МПа;

$R$  - универсальная газовая постоянная, кДж/(моль· $^\circ\text{C}$ );

$t$  - температура теплоносителя, К.

Таблица 1

Расчетная долговечность труб из полипропилена в зависимости от температуры теплоносителя и напряжения в стенке трубы при  $E=133$  кДж/моль

$\sigma_{\text{ст.}}$ МПа	Долговечность (годы) при температуре воды, $^\circ\text{C}$							
	65	70	75	80	85	90	95	100
1	170	88	46	25	13	7,2	4,2	2,4
2	130	68	36	20	11	5,9	3,5	2,0
3	99	52	28	16	8	4,9	2,9	1,7
4	75	40	22	13	7	4,0	2,3	1,4
5	57	31	17	10	6	3,2	1,9	1,2
6	43	24	13	8	4	2,6	1,5	1,0

В расчетах долговечности полиолефиновых труб использовались значения энергии активации термоокислительной деструкции, определенные усреднением значений параметра  $E$ , рассчитанных методом Бройдо по данным динамической ТГ труб лучших фирм-производителей различных стран мира.

Найденные значения долговечности при различных температурах и напряжениях, действующих на полимер, представлены в табл. 1.

Эти значения хорошо согласуются с данными номограмм долговечности фирмы Rehau для полипропиленовых труб (различия не превышают 5-10%).

При расчете долговечности труб с переменной температурой теплоносителя в системе отопления, зависящей от среднесуточной температуры наружного воздуха (табл.2), используют принцип долевого воздействия температур теплоносителя в подающем трубопроводе.

Таблица 2

Температура теплоносителя в системе отопления по отопительному графику и число часов за отопительный период со среднесуточной температурой наружного воздуха для г. Минска

Температура наружного воздуха, °С	0÷-5	-5÷-10	-10÷-15	-15÷-20	-20÷-25	-25÷-30
Число часов за отопительный период	1375	696	395	158	51	15
Температура воды в подающем трубопроводе	65	70	75	80	85	90

Так, при расчете долговечности труб из полипропилена с напряжением в стенке  $\sigma_{ст}$ , равном 3 МПа, учет переменной температуры в г. Минске проводится по следующей схеме:

$$\tau_{общ} = \frac{1375}{2690} \cdot 99 + \frac{696}{2690} \cdot 52 + \frac{395}{2690} \cdot 28 + \frac{158}{2690} \cdot 16 + \frac{51}{2690} \cdot 8 + \frac{15}{2690} \cdot 4,9 =$$

$$= 506 + 135 + 4,1 + 0,9 + 0,2 + 0,03 = 6933 \text{ з.}$$

Расчетные значения долговечности труб из сшитого полиэтилена высокой плотности PE-HDX 135 кДж/моль и из сшитого полиэтилена средней плотности PE-MDX 146 кДж/моль приведены в табл. 3,4.

Таблица 3

Расчетная долговечность труб из сшитого полиэтилена высокой плотности PE-HDX в зависимости от температуры теплоносителя и расчетного напряжения в стенке трубы при  $E=135$  кДж/моль

Расчетное напряжение в стенке трубы $\sigma_p$ , МПа	Температура теплоносителя (t), °C								
	60	65	70	75	80	85	90	95	100
	Расчетная долговечность трубы ( $\tau$ ), годы								
1	-	217,0	114,0	58,0	31,0	16,7	9,0	5,0	2,8
2	-	183,0	93,0	48,0	26,0	14,0	7,7	4,3	2,4
3	276,0	147,0	75,5	39,6	21,5	11,8	6,6	3,7	2,1
4	218,0	118,0	61,5	33,0	18,0	10,0	5,6	3,1	1,8
5	176,0	94,0	50,0	27,0	15,0	8,5	4,7	2,7	1,6
6	140,0	76,0	40,0	22,0	12,5	7,0	4,0	2,3	1,4

Таблица 4

Расчетная долговечность труб из сшитого полиэтилена средней плотности PE-MDX в зависимости от температуры теплоносителя и расчетного напряжения в стенке трубы при  $E=146$  кДж/моль

Расчетное напряжение в стенке трубы $\sigma_p$ , МПа	Температура теплоносителя (t), °C							
	65	70	75	80	85	90	95	100
	Расчетная долговечность трубы ( $\tau$ ), годы							
1	-	260,0	126,0	63,0	32,0	17,0	8,8	4,8
2	-	195,0	98,0	50,0	26,0	13,5	7,2	4,0
3	-	151,0	74,0	40,0	20,0	11,0	6,0	3,3
4	237,0	117,0	60,0	32,0	16,0	9,1	5,0	2,8
5	176,0	90,0	46,0	25,0	14,0	7,5	4,1	2,3
6	130,0	68,0	36,0	20,0	11,0	6,0	3,4	1,9

Таблица 5  
Характеристики труб, используемых для водопроводов и канализации

№ п/п	Фирма-изготовитель	Цвет	Диаметр наружный, мм	Толщина стенки, мм	T <sub>пл</sub> , °C	Полимер	E, кДж/моль	Примечание
Водопроводные								
1	Белсантехмонтаж – 1	черный	34	3	132	ПЭНД	100	
2	БЗПИ	черный	50	5	106	ПЭВД	93	используется для кан-ции
3	Югославия	светло-серый	36	4	150	ПП	126	для хол. и гор. воды
4	РБ	черный	12	1,2	109	ПЭВД	83	не-
5	РБ	голубой	12	1,2	106	ПЭВД	80	высокое
6	РБ	серый	20	2	125	ПЭНД	87	качество
Канализационные								
1	«Полипайт» (Польша)	черный	80	1	162	ПП	83	гофрированная
2	З-д электромонтажных изделий	черный	50	2	133	ПЭНД	106	
3	ООО «ЧПТК»	черный	50	2,4	130	ПЭНД	113	
4	«Гамрат» (Польша)	черный	140	2	123	ПЭНД	106	
5	Пр-во в г. Пинске	черный	50	2	126	ПЭНД	79	Низкое кач-во

Таблица 6

## Справочные данные по трубам напорным из полиэтилена

Срок службы	Температура, °С	Рабочее давление, МПа							
		Тип труб							
		ПЭНД				ПЭВД			
		Л	СЛ	С	Т	Л	СЛ	С	Т
50	20	0,25	0,4	0,6	1,0	0,25	0,4	0,6	1,0
	30	0,16	0,25	0,4	0,63	0,16	0,25	0,4	0,63
	40	0,10	0,16	0,25	0,4	0,10	0,16	0,25	0,4
	50	-	-	-	-	0,06	0,10	0,16	0,25
	60	-	-	-	-	-	0,06	0,10	0,16
25	20	0,28	0,45	0,67	1,12	0,28	0,45	0,67	1,12
	30	0,18	0,30	0,45	0,75	0,20	0,32	0,5	0,80
	40	0,12	0,18	0,28	0,45	0,12	0,20	0,32	0,5
	50	-	-	-	-	0,08	0,12	0,20	0,32
	60	-	-	-	-	0,06	0,1	0,15	0,25
10	20	0,30	0,5	0,75	1,25	0,3	0,5	0,7	1,2
	30	0,22	0,35	0,53	0,9	0,25	0,4	0,6	1,0
	40	0,14	0,22	0,35	0,6	0,18	0,3	0,42	0,71
	50	0,08	0,12	0,2	0,32	0,12	0,18	0,28	0,45
	60	-	-	-	-	0,08	0,12	0,2	0,32
5	20	0,32	0,53	0,8	1,32	0,32	0,53	0,8	1,30
	30	0,25	0,4	0,6	1,0	0,28	0,42	0,63	1,1
	40	0,16	0,25	0,4	0,67	0,2	0,32	0,5	0,85
	50	0,10	0,16	0,25	0,4	0,15	0,25	0,36	0,6
	60	0,06	0,1	0,16	0,25	0,1	0,16	0,25	0,4
1	20	0,36	0,6	0,85	1,4	0,36	0,6	0,85	1,4
	30	0,30	0,5	0,7	1,2	0,3	0,5	0,75	1,2
	40	0,24	0,38	0,56	0,95	0,25	0,4	0,6	1,0
	50	0,16	0,27	0,4	0,65	0,2	0,3	0,5	0,8
	60	0,10	0,16	0,25	0,4	0,15	0,25	0,4	0,6

*Трубы для систем холодного водоснабжения и канализации.*

Для исследования долговечности труб, предназначенных для систем холодного водоснабжения и канализации, была отобрана продукция различных фирм-производителей. Это трубы различных диаметров и толщин стенок, выпущенные предприятиями различных форм собственности, осуществляющими свою деятельность как в Республике Бе-



ларусь, так и в других европейских странах (Польша, Югославия и др.).

На основании дериватографического анализа материалов этих труб производилась их идентификация (по температурам плавления, характеру кривых ДТА и ТГА).

Полученные физико-химические характеристики труб сведены в табл. 5.

Как следует из табл. 5, трубы напорные водопроводные изготавливаются из ПЭВД, ПЭНД, ПП и ПВХ. Трубы напорные из полиэтилена (ПЭВД и ПЭНД) выпускаются в соответствии с ГОСТ 18599-83 4-х типов: легкие (Л) – на номинальное давление  $P$ , равное 0,25 МПа, среднелегкие (СЛ) – на  $P=0,4$  МПа, средние (С) – на  $P=0,6$  МПа, тяжелые (Т) – на  $P=1,0$  МПа. В соответствии с Приложением 1 ГОСТ 18599-83, рабочее давление при транспортировании воды в зависимости от температуры и срока службы не должно превышать следующих значений (см. табл. 6).

Рассчитанные по формуле Кесселя напряжения в стенке для четырех типов полиэтиленовых труб из ПЭНД и ПЭВД на основании средних наружных диаметров труб и толщин их стенок (табл. 2 и табл. 3 ГОСТ 18599-83) сведены в табл. 7.

Таблица 7  
Значения напряжений в стенке полиэтиленовых труб в зависимости от рабочего давления воды в них

$\sigma_{ст}$ , МПа	ПЭНД				ПЭВД			
	Л	СЛ	С	Т	Л	СЛ	С	Т
0,25	5,0				3,0			
0,4	5,0				3,0			
0,6	5,0				3,0			
1,0	5,0				3,0			

Расчет долговечности водонапорных труб проводился по уравнению (1) с использованием экспериментально найденных значений для ПЭ:  $E_{м.в.}=1$  кДж/моль,  $\gamma=2,2$  кДж/моль·МПа. Коэффициенты  $\alpha$  и  $\beta$  имеют значения: для ПЭВД до  $40^{\circ}$  С ( $\tau$  в годах) - 0,144 и - 1,730; выше  $40^{\circ}$  С ( $\tau$  в сутках) - 0,117 и - 1,343 соответственно. Для ПЭНД  $\alpha=-0,1167$ ,  $\beta=-0,936$  ( $\tau$  в сутках). Результаты приведены в табл. 8.

Таблица 8

Расчетная долговечность труб из ПЭВД ( $E_d = 93$  кДж/моль) и ПЭНД ( $E_d = 100$  кДж/моль) в зависимости от температуры воды и напряжения в стенке трубы  $\sigma_{ст}$

$\sigma_{ст}$ , МПа	Полиэтилен высокого давления (ПЭВД)			Полиэтилен низкого давления (ПЭНД)				
	$\tau$ (годы)			$\tau$ (годы)				
	20 <sup>0</sup>	30 <sup>0</sup>	40 <sup>0</sup>	20 <sup>0</sup>	30 <sup>0</sup>	40 <sup>0</sup>	50 <sup>0</sup>	60 <sup>0</sup>
1	23	7	4	276	75	22	7	2,5
2	19	6	3,5	222	61	18	6	2,2
3	16	5	2,9	178	50	15	5	2,0
4	14	4	2,4	139	40	12,6	4,3	1,8
5	11	3,7	2,1	111	33	10,6	3,6	1,6
6	9	3,2	1,8	90	27	8,9	3,1	1,5

Анализ данных табл.8 показывает, что вопреки справочному Приложению 1 ГОСТ 18599-83 «Трубы напорные из полиэтилена. ТУ» трубы из ПЭВД нельзя использовать даже для транспортировки воды при 30<sup>0</sup> С, т.к. их долговечность при напряжении в стенке 3 МПа будет составлять всего 5 лет, а при 40<sup>0</sup> С – 2,9 года. Для надежной эксплуатации труб из ПЭВД в напорных системах холодного водоснабжения, в которых температура воды не превышает 15<sup>0</sup> С, требуется установить контроль качества труб по значению  $E_d$  на уровне 95 кДж/моль (это значение  $E_d$  соответствует лучшим маркам нестабилизированного ПЭВД производства ПО «Полимир» (г. Новополоцк)). Такой материал в условиях эксплуатации ( $T = 15^0$  С,  $\sigma_{ст} = 3$  МПа) будет иметь долговечность 35 лет.

Из данных табл.4 следует также, что, несмотря на рекомендации ГОСТ 18599-83, трубы из ПЭНД тоже не следует применять для транспортировки горячей воды, т.к. их долговечность при  $\sigma_{ст} = 5$  МПа составляет: для  $T = 60^0$  С – 1,6 года, для  $T = 50^0$  С – 3,6 года, для  $T = 40^0$  С – 10,6 года, для  $T = 30^0$  С – 33 года. В системах холодного водоснабжения срок их эксплуатации будет составлять около 100 лет.

*Трубы напорные из ПЭНД для подземных газопроводов.* Государственный стандарт Российской Федерации (ГОСТ Р 50838-95) «Трубы из полиэтилена для газопроводов. Технические условия» предполагает эксплуатацию труб в течение 50 лет при температуре 20<sup>0</sup>

С с минимальной длительной прочностью (MRS) 6,3 МПа (ПЭ63) и 8,0 МПа (ПЭ80).

Борисовский завод пластмассовых изделий выпускает трубы и соединительные детали для подземных газопроводов. Трубы из полиэтилена низкого давления средней плотности предназначены для строительства подземных газопроводов и газораспределительных сетей, транспортирующих природные горючие газы. Допускается применение труб для транспортировки других газов и жидкостей, к которым полиэтилен химически стоек. Трубы изготавливаются из PE80 с  $\rho = 0,941 \text{ г/см}^3$  марки «Finathene 38024CF». БЗПИ проводит работу по расширению сырьевой базы для производства труб (полиэтилены фирмы Hostalen (Германия) и Казанского химзавода (Россия)).

Номинальное рабочее давление 0,6 МПа, максимальное рабочее давление при коэффициенте запаса прочности 2,5 – 0,64 МПа.

Изготовитель труб констатирует: срок службы при номинальном рабочем давлении не менее 50 лет.

Характеристики исследованных труб из ПЭНД приведены в табл. 9.

Таблица 9

Характеристики труб для подземных газопроводов производства БЗПИ

Фирма-изготовитель материала для труб	$d_{\text{нар.}}$ , мм	$\delta$ , мм	$\sigma_{\text{ст.}}$ , МПа	$E_d$ , кДж/моль	$\Delta E_{\text{м.в.}}$ , кДж/моль	$\gamma\sigma_{\text{ст.}}$ , кДж/моль
Finathene (Бельгия)	62	6	7,0	105	5	11
Finathene (Бельгия)	32	3	7,3	100	5	12
Hostalen (Германия)	62	6	7,0	103	5	11
Fusamatic	62	6	7,0	96	5	11
Казанский химзавод	26	2	9,0	88	5	14
Казанский химзавод	200	18	7,6	79	5	12

Максимальное напряжение в стенке трубы  $\sigma_{\text{ст.}}$ , создаваемое давлением газа, рассчитывалось по формуле Кесселя (коэффициент запаса прочности равен 2,5).

Расчет долговечности газопроводных труб проводился по формуле (1), в которой  $\tau$  рассчитывается в сутках. Величина  $\Delta E_{\text{м.в.}}$  – снижение энергии межмолекулярного взаимодействия в ПЭНД физически агрессивной средой (природным газом) за счет эффекта Ребиндера (для труб из ПЭНД максимально возможное понижение потенциаль-

ного барьера разрушения химических связей полимера  $\Delta E_{м.в.}$  составляет 5 кДж/моль). Структурно-чувствительный коэффициент  $\gamma$  в уравнении Журкова С.Н. принимался равным 1,6 на основании экспериментальных данных кДж/моль·МПа ; коэффициент  $\alpha = -0,1167$ , коэффициент  $\beta = -0,936$ . Долговечность труб составила 98, 42, 73, 27, 6 и 2 года в соответствии с порядком их расположения в табл.9.

Формула (1) позволяет учесть все факторы, определяющие долговечность материала газопроводных труб: качество полимера ( $E_d$ ), действие газа как физически агрессивной среды ( $\Delta E_{м.в.}$ ), механическое напряжение в стенке трубы, создаваемое давлением газа ( $\gamma\sigma_{ст}$ ), температура (Т).

Проведенные расчеты долговечности показывают, что требованию ГОСТ Р 50838-95 по срокам эксплуатации труб для газоснабжения в 50 лет отвечают далеко не все трубы, производимые на Борисовском заводе пластмассовых изделий. Полиэтилен низкого давления Казанского химзавода совершенно непригоден для переработки его методом экструзии в трубы, т.к. получается явный брак. Надежными в эксплуатации можно считать трубы, получаемые из ПЭНД фирм Finathene и Hostalen. Долговечность таких труб колеблется от 42 до 98 лет.

Таким образом, фактором, определяющим долговечность газопроводных труб в условиях их эксплуатации, является качество ПЭНД (молекулярная масса и молекулярно-массовое распределение полимера, отсутствие остатков катализаторов, применяемых при синтезе ПЭНД, других примесей, ускоряющих термоокислительную деструкцию макромолекул полиэтилена, разветвленность макромолекул, уровень стабилизации полимера и др.). Все эти факторы влияют на значение эффективной энергии активации термоокислительной деструкции  $E_d$  ПЭНД, а следовательно, и на долговечность материала. Задаваемая долговечность труб предопределяет необходимые значения  $E_d$ , а следовательно, и уровень качества ПЭНД. Уровень качества ПЭНД, достигнутый в марке «Finathene 38024 CF» (Бельгия), обеспечивает долговечность трубам в условиях эксплуатации газопроводов в 100 лет. Как показали проведенные исследования, это лучшее сырье, из которого методом экструзии производят газопроводные трубы на БЗПИ.

Таким образом, разработанные экспресс-методы прогнозирования долговечности изделий из полимерных материалов, в отличие от существующих, позволяют через понижение величины эффективной энергии активации термоокислительной деструкции учитывать сово-

купность эксплуатационных факторов путем вычитания соответствующих долей разрушения. Методы отличаются быстродействием, низкой материалоемкостью, наличием широко используемого оборудования. Они сокращают сроки, экономят материальные и энергетические ресурсы при создании новых технологий и конкурентоспособной продукции.

Социальный эффект от применения методов заключается в исключении нежелательных последствий и даже аварийных ситуаций из-за неожиданного выхода из строя (разрушения) изделия из полимерного композиционного материала.

Экологический эффект достигается за счет более полного использования ресурса материала и тем самым снижения накопления полимерных отходов.

Экспресс-методы могут использоваться для сертификации готовой полимерной продукции на долговечность и для входного контроля сырья в технологическом процессе по установленному минимально допустимому значению параметра  $E$ .

Проведенные исследования позволяют установить контрольные минимально допустимые значения  $E_d$ , обеспечивающие требуемую строительной индустрией долговечность труб. Устанавливаемая заказчиком долговечность труб, контролируемая через параметр  $E_d$ , оставляет за производителем широкие возможности выбора марок полимера, подбора стабилизирующих систем, совершенствования технологии производства.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Заиков Г.Е. Современное состояние и перспективы развития исследований в области старения и стабилизации полимеров // Пластические массы. – 1991. - №5. – С. 30-34.
2. Корецкая Л.С. Атмосферостойкость полимерных материалов. — Мн.: Навука і тэхніка, 1993.
3. Асланян В.М., Варданян В.И., Оксюзян К.А. и др. Прогнозирующая способность энтальпии плавления аморфно-кристаллических полимеров в процессе старения // Пластические массы. – 1984. - №11. – С. 25-26.
4. Одинокова И.А., Шевелев А.Ю., Зеленев Ю.В. Прогнозирование механических свойств частично кристаллических полимеров по их теплофизическим характеристикам // Пластические массы. – 1988. - №3. – С. 32-33.

5. Буряченко В.А. Прогнозирование изменений эксплуатационных характеристик полимерных материалов при их хранении // Пластические массы. – 1986. - №3. – С. 17-18.
6. Трубы из сшитого полиэтилена. Техническая документация фирмы РЕХАУ АГ+Ко. 1998.
7. Патент РБ 2468 от 12.06.98. Способ определения долговечности эластомерных композиций / Прокопчук Н.Р., Кудинова Г.Д., Аслювская О.А., Гугович С.А., Паплевко И.Г.
8. Заявка на выдачу патента РБ №19980642 от 28.09.1998. Способ определения долговечности полиолефинов / Прокопчук Н.Р., Толкач О.Я.
9. Толкач О.Я. Прогнозирование долговечности материалов на основе полиолефинов по данным термоокислительной деструкции: Автореф. дис... канд. технич. наук: 05.17.06. / Бел. гос. технологический ун-т. – Мн., 1999.
10. Толкач О.Я., Прокопчук Н.Р. Изменение долговечности и структуры ПЭВД в процессе теплового старения // Весці НАН Беларусі. Сер. фізіка-тэхнічных навук. -1998. -№4. -С.73- 77.
11. Прокопчук Н.Р., Толкач О.Я., Паплевко И.Г. О температурной зависимости энергии активации деструкции пластмасс, волокон и резин // Доклады АН Беларусі. -1998. Т.42. -№5. -С.64-68.
12. Толкач О.Я., Прокопчук Н.Р. Изменение структуры и параметров деструкции ПЭВД в процессе фотостарения // Весці НАН Беларусі. Сер. фізіка-тэхнічных навук. -1999. -№3-С.107-109.