

DOI: 10.32864/polymmattech-2019-5-3-31-36

УДК 678

ПЛАСТИЧЕСКОЕ РАЗРУШЕНИЕ В ПОЛИЭТИЛЕНОВЫХ ТРУБАХ С РАЗЛИЧНЫМИ СРОКАМИ ЭКСПЛУАТАЦИИ

В. Г. КОЛБАЯ, В. В. КОВРИГА⁺

ООО «Климовский трубный завод», Бережковский проезд, 10, микрорайон Климовск, 142181, г. Подольск, Московская область, Россия

Настоящая работа является продолжением публикации тех же авторов, опубликованной в журнале «Полимерные материалы и технологии» в 2017, №3. Изучен характер пластического разрушения на полиэтиленовых трубах и образцах. В качестве основного параметра, характеризующего изменение размеров при пластическом разрушении, выделена действительная кратность вытяжки. Показано, что в зоне пластического разрушения при гидравлических испытаниях труб формируется те же значения естественной кратности вытяжки, которые наблюдаются на образцах при одноосном растяжении. Показано, что значение естественной кратности вытяжки сохраняется в течение всего периода эксплуатации. Отмечено, что формирование зоны пластического разрушения может происходить в две стадии. На первой стадии происходит переход первичного материала образца из объёма к поверхности. На второй стадии переход со свежесформировавшейся поверхности в новую поверхность вытяжки перед разрушением. Показатель естественной кратности вытяжки может возрастать в 2–2,5 раза при переходе от одной марки полимера к другому, что позволяет оценивать способность к пластическим преобразованиям. На основании проведенных исследований предложена методика определения параметров, характеризующих зону пластического разрушения, которые используются для набора данных по комплексной и накопительной диагностике.

Ключевые слова: пластическое разрушение, естественная кратность вытяжки, скачок деформации при пластическом разрушении.

PLASTIC FAILURE IN POLYETHYLENE PIPES WITH VARIOUS OF THE OPERATIVE PERIOD. PART 2

V. G. KOLBAYA, V. V. KOVRIGA⁺

LLC Klimovsky Pipe Plant, Berezhkovsky proezd, 10, Klimovsk microdistrict, 142181, Podolsk, Moscow region, Russia

This work is a continuation of the publication of the same authors, published in the journal "Polymer materials and technologies" in no. 3, 2017. The nature of plastic degradation on polyethylene pipes and samples was studied. As the main parameter characterizing the change of sizes at plastic failure the real multiplicity of an extract is allocated. It is shown that in the plastic fracture zone, during hydraulic testing of pipes, it is formed at the same value of the natural extension ratio, which are observed on the samples under uniaxial tension. It is shown that the value of the natural extension ratio the extract is maintained throughout the period of operation. It is noted that the formation of the zone of plastic destruction can occur in two stages. At the first stage, the transition of the primary material of the sample from the volume to the surface takes place. In the second stage a transition from sizes formulas surface into a new surface drawing before breaking down. The index of natural extension ratio can increase 2–2.5 times during the transition from one polymer brand to another, which allows to assess the ability to plastic transformations. On the basis of the carried out researches the technique of definition of the parameters characterizing a zone of plastic failure which are used for a set of data on complex and cumulative diagnostics is offered.

⁺Автор с которым следует вести переписку. E-mail: kovriga@polyplastic.ru

Keywords: plastic fracture, natural extension ratio, jump in the tensile deformation hardener, epoxyimide composition at plastic fracture.

Введение

Газовые трубы из ПЭ представляют собой интенсивно развивающийся сектор переработки пластмасс. Благодаря достижениям в области синтеза сополимеров этилена, в последние десятилетия удалось создать новые материалы, которые позволили резко повысить рабочие параметры ПЭ газопроводов.

Объём производства газовых труб из ПЭ в РФ составляет около 60 тыс. т/год [1], из которых более половины производятся предприятиями «Группа ПОЛИПЛАСТИК». Климовский трубный завод, на базе которого проводили экспериментальные работы, производит ежегодно 20–25% от общероссийского объёма газовых труб.

Согласно нормативам газовой промышленности трубы, применяемые для транспортировки газа более 40 лет, подлежат диагностике с целью определения возможности дальнейшей эксплуатации. Однако для ПЭ газовых труб вопрос диагностики не разработан, хотя прогнозный срок эксплуатации, определённый международными стандартами [2], составляет 50 лет.

Цель работы — изучение пластического разрушения ПЭ труб с различными сроками эксплуатации для выбора параметра, который может быть использован в качестве критерия диагностики работоспособности газопровода.

Материалы и методы исследования

Поскольку газовые трубы эксплуатируют при двухосном нагружении внутренним давлением, параметры пластического разрушения изучали, как при одноосном, так и при двухосном нагружении.

Методические задачи, связанные с определением параметров зоны пластического разрушения, решали в связи с необходимостью анализа геометрии зоны пластического разрушения, которую обычно не изучают при одноосном и двухосном нагружении.

При одноосном нагружении — это параметры, методики определения которых приведены ниже, а также в [1]:

- скачок деформации;
- естественная кратность вытяжки (*ЕКВ1*);
- нормированное отношение площади поверхности к объёму зоны пластического разрушения.

При двухосном растяжении — это естественная кратность вытяжки (*ЕКВ2*).

При одноосном нагружении анализировали распределение деформации по длине образца (рис. 1) и определяли скачок деформации в зоне образования шейки. Для проведения испытания изготавливали образцы по ГОСТ 11262. Испытания проводили следующим образом:

- устанавливали образец в испытательную машину;
- измеряли длину рабочего участка лопатки, L_0 ;

- определяли площадь S_0 поперечного сечения выделенной базы;

- проводили одноосное растяжение лопатки до момента появления предела текучести (локального сужения образца) и измеряли длину L_1 рабочего участка между метками в этот момент (при этом образец не извлекали из машины);

- определяли значение деформации образца при пределе текучести по формуле:

$$E_{II} = (L_1 - L_0) / L_0;$$

- проводили растяжение образца до распространения этого локального сужения на длину, достаточную для проведения измерения поперечного сечения образца S_1 в месте сужения. Стабильность деформации (постоянство поперечного сечения) указывает на то, что это зона естественной кратности вытяжки;

- рассчитывали деформацию в зоне естественной кратности вытяжки E_E :

$$E_E = (S_0 - S_1) / S_1,$$

где S_0 и S_1 — площадь поперечного сечения базы рабочего участка лопатки до растяжения и в зоне локального сужения после растяжения соответственно;

- величину скачка деформации определяли по разности $E_E - E_{II}$.

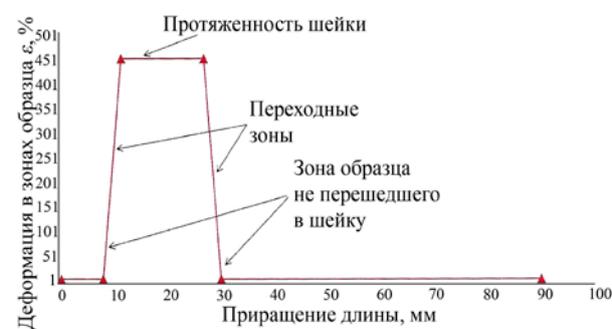


Рисунок 1 — Распределение деформации по длине образца для CRP100-RC

Fig. 1 — Distribution of deformation along the sample length for CRP100-RC

Если при растяжении образец разрушается до образования локального сужения, то скачок деформации отсутствует.

Следующий параметр, определяемый при одноосном нагружении — это естественная кратность вытяжки (*ЕКВ1*). Естественная кратность вытяжки представляет собой деформацию, внезапно возникающую при растяжении с зоной меньшего сечения постоянной геометрии. *ЕКВ1* определяли на лопатках, исходя из условий постоянства объёма, рассчитывали по отношению площадей:

$$ЕКВ1 = L_1 / L_0 = S_0 / S_1.$$

А. Л. Волынский и Н. Ф. Бакеев [2] отметили, что важное значение при анализе пластической деформации имеет отношение площади поверхности образца к его объёму. Так как отношение площади поверхности к объёму является размерной величиной, имеющей размерность $1/\text{см}$, представляется целесообразным пронормировать величину отношения площади поверхности к объёму по минимальному отношению поверхности к объёму, которое имеет шар с объёмом, равным объёму измеряемой зоны образцов. Это позволяет характеризовать отношение площади поверхности к объёму, возникающее при вытяжке, значением, показывающим во сколько раз возникшее отношение больше минимально возможного для этого же объёма материала. Учитывая площадь поверхности и объёма рабочей зоны образца и площади поверхности и объёма шара, выражали формулу для расчёта нормированного отношения, R_n , (рис. 2):

$$R_n = (S \times R) / (3 \times L_0 \times A_0 \times B_0),$$

где S — площадь шара, мм^2 , R — радиус шара, мм , L_0 , мм — начальная длина образца, A_0 , мм — начальная толщина образца, B_0 , мм — начальная ширина образца.

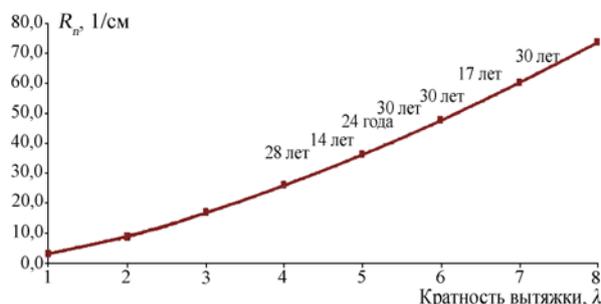


Рисунок 2 — Зависимость отношения площади поверхности к объёму, нормированного по минимальному значению для шара, от кратности вытяжки для полиэтиленовых труб с различным сроком эксплуатации

Fig. 2 — Dependence of the ratio of the surface area to the volume, normalized by the minimum value for the ball, on the extension ratio for polyethylene pipes with different time of exploitation

Для расчёта $EKB2$ при двухосном нагружении, зону пластического разрушения (ЗПР) на образцах труб получали при помощи гидравлических испытаний. Образец в виде трубы герметично закрепляли в заглушках и устанавливали на установку гидравлических испытаний. Обычно принятая схема гидравлических испытаний ПЭ труб предусматривает подачу постоянного давления и определение продолжительности жизни образца до разрушения. В отличие от этого, испытания проводили по схеме постоянно повышающегося давления вплоть до разрушения образца и образования ЗПР. Для ПЭ испытания проводили при 20°C , для сшитого — при 80°C , что соответствует рабочим параметрам трубопровода. Поскольку при двухосном нагружении

и формировании ЗПР один из размеров поперечного сечения (ширина) остаётся постоянным, то геометрию ЗПР определяли только по толщине.

Измеряли толщину стенки по длине ЗПР в каждом секторе. Фиксировали зоны с минимальной стабильной толщиной стенки в сегменте ЗПР с наибольшей шириной (L_{min}), после приложения гидравлической нагрузки. В этом случае удаётся определить параметр естественной кратности вытяжки при двухосном растяжении.

Для расчёта $EKB2$, до начала гидравлических испытаний, фиксировали минимальную толщину стенки образца трубы. В средних зонах, где происходит наибольшая вытяжка (зоне ЕКВ или ЗПР постоянного сечения), отбирали не менее 5 значений толщины стенки образца и рассчитывали их среднее значение. Далее рассчитывали $EKB2$ по формуле:

$$EKB2 = e_0 / e_{cp},$$

где e_0 — исходная толщина стенки, e_{cp} — средняя толщина стенки в зоне вытяжки.

В работе ЗПР также оценивали по показателям:

- предел текучести (ГОСТ 11262);
- относительное удлинение (ГОСТ 11262);
- свариваемость (РД 03-606-03), оценку качества производили согласно СП 42-103-2003;
- показатель текучести расплава при разных нагрузках (ГОСТ 11645);
- термостабильность — индукционный период окисления (Приложение ДИ ГОСТ Р 50838);
- степень кристалличности, используя метод ДСК (ГОСТ Р 55135).

В работе исследовали две группы материалов. Первая группа — это образцы до эксплуатации, различных современных трубных марки как отечественного, так и импортного производства. Российского производства — это образцы из класса ПЭ100-6949С, 2НГ11-9, ПЭ80 РЕ4РР25. Импортного производства — это материалы из различных классов ПЭ100 ($H1000PC$, $CRP100$, $6060R$). Из класса ПЭ-100-RC — *Superstress TUB121*. Перекисносшитый ПЭ — *Lupolen 5261 ZQ 456*. Представленные группы материалов охватывают весь диапазон вязкостей для трубных марок ПЭ.

Вторая группа — это образцы с различными сроками эксплуатации, предоставленные «Газпромпромаз». Характеристики образцов представлены в [3]. Образцы сгруппированы по срокам эксплуатации с шагом в 5 лет. Всего было изучено около 56 образцов с различными сроками эксплуатации, 8 образцов из современных марок и ~30 образцов из PEX материала.

Модуль упругости определяли согласно ГОСТ 9551.

Потерю ремонтпригодности оценивали по характеристикам свариваемости. В соответствии с требованиями стандартов с руководящим документом РД 03-606-03 и сводом правил СП 42-103-2003 проводили визуально-измерительный контроль шва сварного соединения и оценивали тип разрушения.

Результаты и их обсуждение

Установлен скачок деформации (рис. 1) и определены его границы. В качестве нижней границы — деформация при пределе текучести, в качестве верхней — естественная кратность вытяжки.

Параметр нормированного отношения площади поверхности к объёму и кратность вытяжки (рис. 2) связаны между собой и поэтому они представлены на одном графике. В качестве объёма, взятого за базу, приняли параметры измеряемой ЗПР образцов.

Результаты эксперимента показали, что протяжённость переходных зон мала — в результате деформации до 250–300% не реализуются. «Скачок» переводит материал на новый уровень реализуемых деформаций, соответствующий естественной кратности вытяжки.

Показано, что количественно величина пластической деформации может характеризоваться величиной скачка от деформации при пределе текучести до деформации при естественной кратности вытяжки.

Величина скачка существенно меняется при переходе от одной марки трубного ПЭ к другой (рис. 3). Для 4-х изученных материалов в [4] сопоставлены значения естественной кратности вытяжки, определённые при одноосном и двухосном нагружении. Установлено, что $EKB1$ и $EKB2$ близки между собой, что позволяет оценивать характеристики пластического разрушения в более простых условиях, а именно при одноосном растяжении.

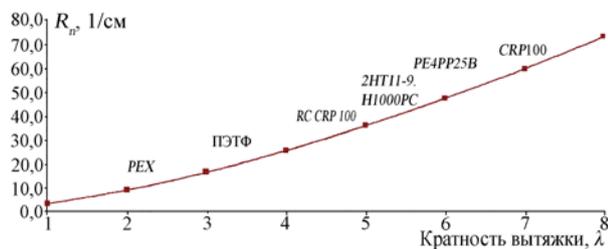


Рисунок 3 — Зависимость отношения площади поверхности к объёму, нормированного по минимальному значению для шара, от кратности вытяжки для полимерных труб

Fig. 3 — Dependence of the ratio of the surface area to the volume, normalized by the minimum value for the ball, on the extension ratio for polymer pipes with different time of exploitation

Видно, что величины EKB существенно отличаются при переходе от одной трубной марки к другой. Это даёт основание сделать вывод о том, что фактически EKB является характеристикой сополимера этилена.

Определены величины $EKB1$ для материалов с различными сроками эксплуатации. Материалы с длительными сроками эксплуатации были сгруппированы по величине естественной кратности вытяжки, по диапазонам: 1 группа (с EKB 3,7–4,7), 2 группа (с EKB 4,7–5,7), 3 группа (с EKB 5,7–6,7). Данные представлены на рис. 4. Видно, что естественная кратность вытяжки не зависит от срока эксплуатации. Таким образом можно утверждать, что EKB является характеристикой материала. Оценивая линии тренда для каждой из групп, установили, что сохра-

няется тенденция стабильности этих показателей за весь период эксплуатации.

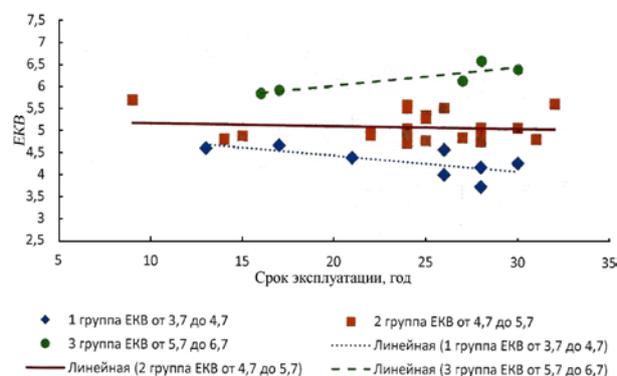


Рисунок 4 — Зависимость EKB от срока эксплуатации
Fig. 4 — Dependence of natural extension ratio on exploitation time

Для оценки жёсткости материала в исходном материале и в зоне естественной кратности вытяжки измерили модули упругости в этих двух зонах. Экспериментальные данные показали, что при пластическом разрушении происходит изменение модуля упругости от 20% до 60%.

Среди полиэтиленов, применяемых для труб газоснабжения, особое место занимает сшитый полиэтилен. В РФ он практически не используется, однако в мировой практике, например в Германии, его применение разрешено. Для сшитых полимеров шейкообразование не характерно. В связи с этим представляло интерес оценить характер пластического разрушения сшитого полиэтилена, который наблюдается при высоких температурах испытания.

Определение EKB показало, что оно составляет 2,3, данные по EKB приведены на рис. 4. На сшитом полиэтилене чётко проявляется двухстадийность формирования зоны пластического разрушения. При анализе ЗПР для РЕХ замечено, что ее формирование происходит в две стадии в трёх возможных вариантах, когда:

- 1) горизонтальное расположение трещины в основной и вторичной зонах пластического разрушения, при этом основная и вторичная зоны соосны;
- 2) «смешанное» расположение трещины одновременно в основной и во вторичной зонах пластического разрушения, при этом основная и вторичная зоны перпендикулярны по отношению друг к другу;
- 3) вертикальное расположение трещины одновременно в основной и во вторичной зонах пластического разрушения, при этом основная и вторичная зоны перпендикулярны по отношению друг к другу.

Поскольку практическим выходом проведенных исследований предполагалось создание методики оценки состояния газопроводов, кроме параметров пластического разрушения материалов, оценили и потерю ремонтпригодности, которая характеризуется способностью к свариванию (рис. 5). В качестве критерия истощения ресурса принимали:

- отсутствие индукционного периода окисления;
- полное несоответствие сварного соединения,

определённое методом визуально-измерительного контроля;

– отсутствие *EKB* при растяжении образцов, вырезанных из труб.

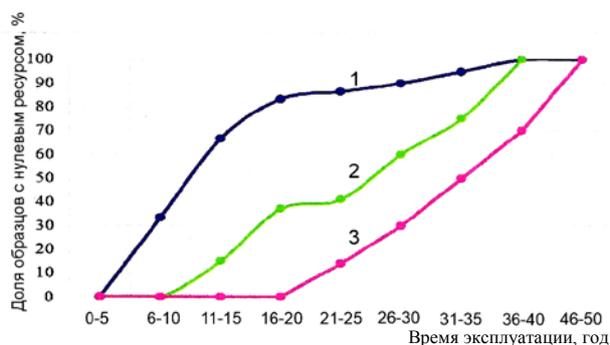


Рисунок 5 — Доля образцов с нулевым ресурсом в зависимости от срока эксплуатации: 1 — с нулевым ресурсом по индивидуальному периоду окисления (при 200 °С \square 20 мин); 2 — с нулевым ресурсом по свариваемости; 3 — с нулевым ресурсом по пластичности

Fig. 5 — The share of samples with a zero resource depending on the period of operation: 1 — with a zero resource in the individual oxidation period (at 200 °C 20 min); 2 — with zero resource on weldability; 3 — with zero resource plasticity

Как видно из приведенных на рис. 5 данных, определение ресурса по трём группам показателей, первым исчерпывается ресурс по химической стабильности (наличие стабилизаторов). Затем исчерпывается связанный с ним ресурс по свариваемости, так как сварка происходит при высоком температурном воздействии. Последним исчерпывается ресурс по потере пластичности. Потеря работоспособности соответствует моменту полного исчерпания ресурса по всем видам свойств. Таким образом, при проведении диагностики, необходимо давать оценку комплексно, по потере всех трёх видов ресурса.

В связи с тем, что было показано сходство *EKB1* и *EKB2*, разработана методика СТО 73011750-017-2016 «Пластмассы. Метод определения параметров комплексной и накопительной диагностики полиэтиленовых труб с использованием образцов, выделяемых при установке седловых отводов», которая позволяет существенно сократить трудоёмкость диагностики газопроводов. В настоящее время методику рассматривают в организациях Газпрома с целью определения возможности её применения.

Выводы

1. Впервые показано, что зона пластического разрушения при гидравлических испытаниях труб формируется с сохранением значений *EKB*, которые наблюдаются при одноосном растяжении.

2. На примере сшитого полиэтилена показано, что формирование зоны пластического разрушения может происходить в две стадии: на первой стадии происходит переход первичного материала образца из объёма в поверхность, на второй стадии — вторичный переход уже перешедшего на первой стадии материала в поверхность. При этом геометрия зоны пластического

разрушения, на первой стадии и на второй, характеризуется различными величинами *EKB*.

3. Показано, что показатель *EKB* (кратность вытяжки) существенно (до 2-х раз) изменяется при переходе от одной марки трубных сополимеров этилена к другой, что характеризует различную способность к пластическому разрушению трубных марок.

4. При анализе изменений отношения «площадь поверхности к объёму», наблюдающихся в ходе пластического разрушения, для широкого круга трубных материалов рекомендуется использовать отношение «площадь поверхности к объёму», нормированное по минимальному отношению поверхности к объёму для шара.

5. На основании проведенных исследований предложена методика определения параметров, характеризующих зону пластического разрушения, изложенная в стандарте организации СТО 73011750-012-2014 «Пластмассы. Метод определения параметров зоны пластического разрушения полимерных труб» и используемая для выполнения работ по договору «Исследование физико-химических свойств полиэтилена действующих распределительных газопроводов» с ОАО «Газпромпромгаз».

6. Разработана и предложена для применения организациям ОАО «Газпром» новая методика набора данных для комплексной и накопительной диагностики на малых образцах СТО 73011750-017-2016 «Пластмассы. Метод определения параметров комплексной и накопительной диагностики полиэтиленовых труб с использованием образцов, выделяемых при установке седловых отводов».

Обозначения

EKB1 — естественная кратность вытяжки, определённая при одноосном растяжении; *EKB2* — естественная кратность вытяжки, определённая при двухосном растяжении; ЗПР — зона пластического разрушения; A_0 , мм — начальная толщина образца; B_0 , мм — начальная ширина образца; E_E , % — естественная кратность вытяжки; E_{II} , % — значение деформации образца при пределе текучести, поперечного сечения образца (S_I) в месте сужения; e_0 , мм — исходная толщина стенки; e_{cp} , мм — средняя толщина стенки в зоне вытяжки; L_0 , мм — длина рабочего участка лопатки; L_I , мм — длина рабочего участка между метками; *PEX* — сшитый полиэтилен; R , мм — радиус шара; S , мм² — площадь шара; S_0 , мм² — площадь поперечного сечения базы рабочего участка лопатки до растяжения; S_I , % — площадь поперечного сечения в зоне локального сужения после растяжения; минимальной стабильной толщиной стенки в сегменте ЗПР с наибольшей шириной; λ — кратность вытяжки; ε , % — деформация в зонах образца.

Литература

- Трусов К. В., Усачёв М. А. Рынок 2016: борьба за выживание // Полимерные трубы. 2017. №2 (56). С. 36–40.
- ГОСТ 58121.1-2018 (ИСО 4437-1:2014). Пластмассовые тру-

- бопроводы для транспортирования газообразного топлива. Полиэтилен (ПЭ). Часть 1. Общие положения. М.: Стандартинформ, 2018. 42 с.
3. Колбая В. Г. Пластическое разрушение полиэтиленовых труб с различными сроками эксплуатации: дис. канд. техн. наук: 05.17.06. Москва, 2017. 121 с.
 4. Волынский А. Л., Bakeev N. F. Роль поверхностных явлений в структурно-механическом поведении твердых полимеров. Москва: Физматлит, 2014. 533 с.
 5. Тарасов В. В., Климентко В. А., Гельман А. В., Шпара И. Ф., Колбая В. Г., Метелкин В. А., Ковязин М. В., Коврига В. В. Возможность технического диагностирования полиэтиленовых газопроводов, эксплуатирующихся более 40 лет // Газ России. 2015. № 4. С. 50–57.
 6. Колбая В. Г., Коврига В. В. Пластическое разрушение в полиэтиленовых трубах с различным рабочим ресурсом // Полимерные материалы и технологии. 2016. Т. 2, № 4. С. 51–56.
- providy dlya transportirovaniya gazoobraznogo topliva. Polietilen (PE). Chast' 1. Obshchie polozheniya. [State standard 58121.1-2018 (ISO 4437-1:2014) Plastics piping systems for the supply of gaseous fuels. Polyethylene (PE). Part 1: General, MOD]. Moscow: Standartinform Publ., 2018. 42 p.
3. Kolbaya V. G. Plasticheskoe razrushenie polietilenovykh trub s razlichnymi srokami ekspluatatsii. Diss. kand. tekhn. Nauk [Plastic failure on polyethylene pipes with various of the operative period. Ph. D. eng. sci. diss.]. Moscow, 2017. 121 p.
 4. Volynskiy A. L., Bakeev N. F. Rol' poverkhnostnykh yavleniy v strukturno-mekhanicheskom povedenii tverdykh polimerov [The role of surface phenomena in the structural and mechanical behavior of solid polymers]. Moscow: Fizmatlit Publ., 2014. 533 p.
 5. Tarasov V. V., Klimentko V. A., Gel'man A. V., Shpara I. F., Kolbaya V. G., Metelkin V. A., Kovyazin M. V., Kovriga V. V. Vozmozhnost' tekhnicheskogo diagnostirovaniya polietilenovykh gazoprovodov, ekspluatiruyushchikhsya bolee 40 let [A possibility of technical diagnosing of the polyethylene gas pipelines which are operated more than 40 years]. *Gaz Rossii*, 2015, no. 4, pp. 50–57.
 6. Kolbaya V. G., Kovriga V. V. Plasticheskoe razrushenie v polietilenovykh trubakh s razlichnym rabochim resursom [Plastic failure on polyethylene pipes with various of the operative period]. *Polimernye materialy i tekhnologii* [Polymer Materials and Technologies], 2016, vol. 2, no. 4, pp. 51–56.

References

1. Trusov K. V., Usachev M. A. Rynok 2016: bor'ba za vyzhivanie [Market 2016: Struggle for survival]. *Polimernye truby* [Polymer pipes], 2017, no. 2 (56), pp. 36–40.
2. GOST 58121.1-2018 (ISO 4437-1:2014). Plastmassovye truboprovody dlya transportirovaniya gazoobraznogo topliva.

Поступила в редакцию 28.05.2019

© В. Г. Колбая, В. В. Коврига, 2019