

Значения $U_{пр}$ для некоторых полимерных пленок, из которых может быть изготовлена мембрана ЭПП

Материал пленки	$U_{пр}$ (в В) пленок толщиной, мкм			
	15	20	25	30
Полиэтилен	573	623	669	712
Фторопласт-4	595	650	700	746
Фторопласт-3	540	583	623	660
Лавсан	527	568	605	640

стичь такого результата удается благодаря малому воздушному зазору и применению полимерной мембраны. Однако при этом ограничивается величина рабочего электрического напряжения; падение напряжения на воздушном зазоре определяется по формуле:

$$U_1 = E_1 (h_1 + h_2) \quad (9)$$

Соответствующий участок кривой Пашена [3] аппроксимиру- ют выражением вида:

$$U_{пр} = a + b (h_1 + h_2) \quad (10)$$

При этом $a=300$ В, $b=7 \cdot 10^6$ В/м для $d < 100$ мкм и $a=600$ В, $b=4 \cdot 10^6$ В/м для $d > 100$ мкм. На основании уравнений (3), (9) и (10) при условии, что кривые, описываемые выражениями (9) и (10), касаются, можно получить предельное значение $U_{пр}$ (таблица), при котором пробой при любой величине зазоров $h_1 + h_2$ не происходит:

$$U_{пр} = a + b \frac{H}{e_2} + 2 \sqrt{ab} \left(\frac{H}{e_2} \right)^{1/2} \quad (11)$$

При конструировании и эксплуатации ЭПП необходимо учи- тывать, что U не должно превышать указанных в таблице зна- чений. В противном случае возможны пробои, обуславливающие нестабильность работы ЭПП.

При практическом использовании электростатического ЭПП необходимо знать величину электрического напряжения $U_{ср}$, при котором происходит срабатывание ЭПП. Из условия $F_{пн} = F_D$ ус- тановлено, что при $p_{пнт} = 0,15$ МПа расчетное значение $U_{ср}$ равно 270 В, экспериментальное — 480 В, при $p_{пнт} = 0,20$ МПа — 391 и 510 В, при $p_{пнт} = 0,25$ МПа — 483 и 560 В, при $p_{пнт} = 0,30$ МПа — 560 и 600 В, при $p_{пнт} = 0,35$ МПа — 626 и 630 В соответственно (при этом $h_1 = 170$ мкм; $h_2 = 25$ мкм; $d_1 = 0,6$ мм; $e_2 = 2,2$; $D_2 = 46$ мм; $D_1 = 3$ мм; $d_2 = 0,4$ мм).

Использование в качестве мембраны пленок большей толщи- ны не улучшает силовые характеристики ЭПП, хотя при этом возможно использование для управления мембраной электриче- ского напряжения большей величины (см. таблицу). Это объяс- няется тем, что падение напряжения U_1 на воздушном зазоре ограничено величиной $U_{пр}$. Поэтому, как следует из выражений (3), (4) и (9), чрезмерное увеличение толщины мембраны не- целесообразно. Статические характеристики предлагаемого электростатического ЭПП (рис. 2) значительно лучше, чем известных.

Таким образом, рассмотренный ЭПП работоспособен при вы- соких и средних уровнях давления питания. Его применение сов- местно с мембранно-клапаным усилителем мощности позволяет повысить точность и надежность работы электропневматических следящих систем.

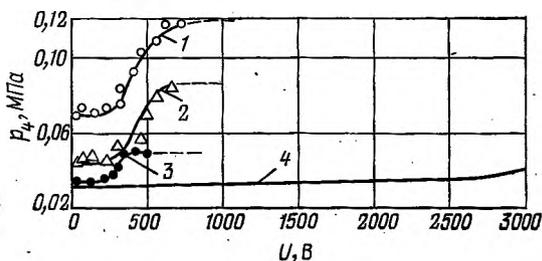


Рис. 2. Статические характеристики предлагаемого (1—3) и из- вестного (4) электропневматического преобразователя. $p_{пнт}$, МПа: 1 — 0,2; 2 — 0,15; 3, 4 — 0,1.

Литература

1. Авт. свид. 911054; опубли. в Б. И., 1982. № 9, с. 155.
2. Кудряшов Ю. Ф., Нагорный В. С., Петков П. П. Исследова- ние усилительного каскада типа сопло—заслонка электропнев- матического преобразователя с непосредственной связью по управлению. В кн.: Материалы IV научной конференции бол- гарских аспирантов, обучающихся в СССР. НРБ, София, из- дательство Министерства Народного просвещения, 1980, с. 895—903.
3. Мекишев Г. А. Канд. дис. Л., ЛЭТИ, 1981.

УДК 678.5.06:678.027:537.228.1:621.38

Применение пьезополимеров в электронной технике (обзор)

А. В. ГОРОХОВ, В. И. ЗАКРЖЕВСКИЙ, И. М. СОКОЛОВА, В. Н. ТАИРОВ, Г. П. ТИМОШИНОВ

Ранее пьезоэлектрические преобразователи изготавливали только на основе монокристаллов и пьезокерамики. Практическое применение полимеров в качестве пьезоэлектриков началось после того, как у поливинилиденфторида (ПВДФ) были обнару- жены пьезоэлектрические свойства [1]. Было установлено, что пьезомодуль ПВДФ достигает $30 \cdot 10^{-12}$ Кл/Н, что, однако, в несколько раз меньше, чем у керамических пьезоэлектриков (таблица). В то же время полимерная пленка, обладающая низкой диэлектрической проницаемостью, может быть использована для создания преобразователей с высоким электрическим напря- жением, генерируемым на единицу механического напряжения. Кроме того, эти преобразователи могут быть изготовлены лю- бой формы, что имеет большое значение, в частности, при их эксплуатации в контакте с поверхностью большой кривизны. Технология получения полимерных пьезоэлементов практически такая же, как и электретных элементов [3, 4].

Для изготовления пьезоэлектрических преобразователей при- меняют электризованные и стабилизированные пленки на основе ПВДФ и его сополимеров с трифторэтиленом и тетрафторэтиле- ном. При этом используют, как правило, одноосно- и двухосно- ориентированные пленки толщиной 5—50 мкм. Пленка на основе ПВДФ обладает высокой механической прочностью и пригодна для получения пьезоэлементов большой площади (1—100 см²). В отличие от традиционных пьезоматериалов ПВДФ можно при- менять в качестве активного элемента как при постоянной, так и при переменной частоте электрического поля. Пьезополимеры использованы в электромеханических преобразователях различ- ного назначения, в частности в электроакустических [5—8]. Раз- работаны конструкции пьезополимерных микрофонов, в том чис- ле для телефонов [9—12] и громкоговорителей [13].

Недостаточная стабильность механических показателей пьезо- полимерных мембран не обеспечивает однородности и стабиль- ности эксплуатационных характеристик пьезопреобразователей с такими мембранами при их массовом производстве. Стабильность характеристик преобразователей повышается при использовании конструкции, в которой пьезополимерная мембрана помещена на центральную жесткую опору или ряд точечных опор, располо- женных на внутренней поверхности мембраны. При этом мембра- на приобретает выпуклую (кулообразную) форму [6, 11]. Од- нако усовершенствование конструкции преобразователей, по- видимому, недостаточно для создания на основе ПВДФ электро- акустических преобразователей класса Ni—Fi, способных конку- рировать, например, с электретными преобразователями, в кото- рых возможно разделение функций механической мембраны и электрически активного элемента.

Перспективной областью применения пьезополимеров, в ко- торой они могут конкурировать с другими материалами, явля- ется производство электроакустических преобразователей с удов- летворительными характеристиками в низкочастотном диапазоне, необходимых, в частности, для телефонных аппаратов. Современ- ный телефонный аппарат становится все более сложным электр- онным устройством. В этих условиях эффективно использова- ние микрофонов, касколей головных телефонов и вызывных устройств из пьезополимерных материалов. Так, чувствительность микрофонов на основе ПВДФ составляет от —55 до 50 дБ при 1 В/Па их электрическое сопротивление колеблется в диапазоне



Свойства пьезоэлектрических материалов [2]

Материал	Плотность, г/см ³	Относительная диэлектрическая проницаемость	Пьезомодуль · 10 ⁻¹² , Кл/Н	Электрическое напряжение, генерируемое на единицу механического напряжения, мВ · м/Н	Коэффициент электромеханической связи, %	Акустический импеданс · 10 ⁹ , г · м ⁻² · с ⁻¹
β-кварц	2,7	4,5	2	50	10	14,3
BaTiO ₃ -керамика	5,7	1350	78	5	21	30,0
ЦТС-керамика	7,5	1700	100	10	30	30,0
ПВДФ	1,8	12	20—30	190	14	2,5

от 5 до 40 кОм при частоте 1 кГц [14], что позволяет применять эти микрофоны без предварительных усилителей при наличии такого усилителя в телефонном аппарате. Уровень звукового давления в головном телефоне достигает 92 дБ/В, а при использовании двойной диафрагмы — 100 дБ/В. Электрическое сопротивление такого телефона составляет 3 кОм при частоте 1 кГц. Вызывные устройства генерируют сигнал с уровнем звукового давления 86 дБ в диапазоне 900—1125 Гц. Эти устройства могут быть выполнены также из двойной пьезополимерной мембраны, причем между металлизированными с обеих сторон пленками помещается упругая прокладка из пенопласта [15]. Для пьезополимерных вызывных устройств характерен повышенный уровень выходного сигнала при частоте до 1 кГц. Создан электронный телефонный аппарат, во всех электроакустических преобразователях которого применена пьезополимерная пленка [16].

Перспективно использование пьезополимерного телефонного капсуля [17]. При этом передача речевых сигналов осуществляется цифровыми методами. В большинстве случаев цифро-аналоговое или аналого-цифровое преобразование происходит непосредственно в конечных пунктах канала связи, т. е. за микрофоном или перед телефонным капсулем. Для упрощения электронных цепей такое преобразование целесообразно в электроакустическом преобразователе. Цифро-аналоговое преобразование возможно, например, в электретном телефонном капсуле с секционированным противозлектродом [18]. Аналогичный пьезополимерный телефонный капсюль имеет простую конструкцию, которая отличается от конструкции обычного капсуля только тем, что металлизация мембраны с одной стороны выполнена в форме спирали, получаемой с помощью фотолитографии. Однако в настоящее время предпочтительно использование в телефонных аппаратах электретных, пьезокерамических, электродинамических преобразователей, поскольку накоплен большой опыт их массового производства.

Пьезополимерные материалы применяют также в электроакустических преобразователях для устройств ввода информации (вычислительные машины, телефонные аппараты, электрические пишущие машинки). В простейшем варианте конструкции пьезоэлектретной клавиши [18] пьезоэлектрическая пленка с нанесенными на обе ее стороны металлизированными электродами расположена между слоями упругого материала. При нажатии на упругий слой и деформировании пьезоэлектрической пленки возникает электрический сигнал, который снимается с электродов. Отсутствие движущихся механических элементов обеспечивает высокую надежность такого устройства. Однако конструкция обладает рядом недостатков. В частности, амплитуда выходного сигнала зависит от величины прилагаемого усилия, отсутствует обратная связь клавиша — оператор. В настоящее время разработаны конструкции клавиши [18] с кинестатической обратной связью, реализуемой с помощью пружин различного вида, в которых форма выходного сигнала не зависит от прилагаемого усилия. Благодаря возможности получения при использовании пьезополимеров активных элементов большой площади разработаны матричные конструкции устройства ручного ввода информации [19].

На основе пьезополимеров созданы также чувствительные элементы ультразвуковой техники [7, 20] и гидроакустики [21], микросонды механических напряжений [22], а также различные датчики для применения в медицине [23]. Преимуществом таких преобразователей, особенно для диагностических исследований в медицине или для неразрушающего ультразвукового контроля, является возможность создания гибких ленточных элементов с липким слоем для закрепления на исследуемой поверхности [24]. При использовании таких преобразователей в отличие от известных преобразователей ультразвуковой диагностики для акустической связи с пациентом не требуются промежуточные жидкостные камеры, а для крепления на жестких стальных деталях — массивные магниты, снижающие чувствительность приборов.

Возможно, что применение в ультразвуковой технике и гид-

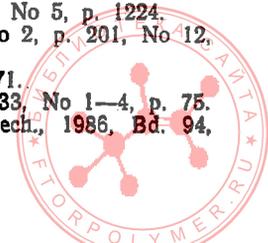
роакустике пьезополимерных преобразователей станет предпочтительнее, чем электретных. В частности, использование электретных преобразователей в гидроакустике связано с необходимостью решения проблемы гидроизоляции. В то же время пьезоэлектрические преобразователи работают в условиях короткого замыкания и воздействие воды на них проявляется в меньшей степени, чем на электретные. Тем не менее из-за поглощения полимером воды снижается пьезоактивность и полимерных материалов [25].

Перспективно применение ПВДФ в робототехнике [26] и пьезопреобразователях поверхностных акустических волн [27]. Пьезоэлектрический коэффициент ПВДФ достигает $(4-5) \times 10^{-9}$ Кл/см² · К. Благодаря этому разработаны конструкции различных пьезоэлектрических датчиков из ПВДФ, предназначенных для регистрации ИК-излучения [28] и давления [29], а также для использования в телевизионных передающих трубках [12]. Эффективно применение ПВДФ в электрооптике [30], в том числе для создания электрооптических модуляторов [30].

Несмотря на широкое внедрение пьезополимеров в различные области техники, выхода пьезополимерных преобразователей на мировой потребительский рынок не ожидается. В настоящее время разработано большое количество лабораторных образцов таких преобразователей, не уступающих по функциональным характеристикам преобразователям других типов. Однако все еще не достигнута достаточная воспроизводимость параметров пьезополимерных преобразователей при их массовом производстве. Постоянно возрастающий объем информации по пьезополимерам позволяет предположить, что эти недостатки будут устранены. Подтверждением этому является освоение выпуска в Японии электретной пьезопленки на основе ПВДФ [31]. Широкое внедрение пьезополимерных преобразователей ожидается прежде всего в отраслях, в которых комплекс свойств этих преобразователей обеспечивает их повышенную конкурентоспособность по сравнению с другими преобразователями, например, в медицинской технике. В других отраслях предполагается одновременное применение пьезополимерных преобразователей и преобразователей других типов.

Литература

1. Kawai H. J. Appl. Phys., Jap., 1969, v. 8, p. 975; Kabau X. Oe butyuri, 1969, v. 38, No 12, s. 1133.
2. Bloomfield P. E. e. a. Naval Research Review, 1978, v. 81, No 5, p. 1.
3. Луцкекин Г. А. Полимерные электреты. М., Химия, 1984.
4. Электреты. Под ред. Г. Сесслера. М., Мир, 1983.
5. Ricketts D. J. Acoust. Soc. Am., 1980, v. 58, No 4, p. 1025; Toda M. Ferroelectrics, 1981, v. 32, No 1-4, p. 127; Canavesio F., Ceruti R. Electron. Telecommun., 1978, v. 28, No 1, p. 3; Swartz R. G., Plummer J. D. IEEE Trans. Electr. Devices, 1979, v. ED-26, No 12, p. 1921.
6. Ravinet P., Guillou D., Micheron F. Rev. Techn. Thomson-CSF, 1981, v. 13, No 1, p. 5.
7. Sussner J. In: Ultrasonics Symp. Proceed. N-Y, IEEE, 1979, p. 491.
8. Цутаси Н., Тамура М. Оё бутури, 1978, т. 47, № 12, с. 1162.
9. Abram R. A. J. Phys. D., 1980, v. 13, No 2, p. 195; Lerch R., Sessler G. M. J. Acoust. Soc. Am., 1981, v. 69, No 6, p. 1809; Ravinet P. e. a. J. Acoust. Soc. Am., Suppl., 1982, v. 72, No S1, p. S24; Grubb J. A. Electrocomp. Sci. Techn., 1982, v. 9, No 3, p. 197. Telephony, 1982, 203, № 2, p. 48; англ. пат. 8402759; фр. пат. 2542552.
10. Lerch R. J. Acoust. Soc. Am., 1981, v. 70, No 5, p. 1224.
11. Abram R. A. J. Phys. D., 1980, v. 13, No 2, p. 201, No 12, p. 2237.
12. Сако Д. Корё дзайрё, 1982, т. 30, № 6, с. 71.
13. Das-Gupta D. K. Ferroelectrics, 1981, v. 33, No 1-4, p. 75.
14. Murphy P. V. e. a. Feinwerktech. Messtech., 1986, Bd. 94, No 5, S. 269, 279.



15. Англ. пат. 8402759.
16. *Yashitoshi M. e. a.* IEEE Trans. Commun. Electron., 1982, v. CE-28, No 3, p. 415.
17. *Hohm D. e. a.* Acoustica, 1985, v. 57, No 4-5, p. 218.
18. Пат. ФРГ 2757099.
19. Пат. ФРГ 053048719, 2915410; 2915456.
20. *Chutachi N.* Rev. Electr. Commun. Eng. Cenvercazione, 1979, v. 48, No 1, p. 48. *Von Kutruff H., Sung K. M.* Acustica, 1979, v. 43, No 2, p. 162; *Kovnovich S., Harnik E.* Electron. Lett., 1980, v. 16, No 20, p. 776; *Scott W. R., Bloomfield P. E.* Ferroelectrics, 1980, v. 28, No 1-4, p. 13; *Galantree H. R., Marconi Rev.,* 1982, v. 45, N 224, p. 49; *Chivers R. C., Levin P. A.* Ultrasonics, 1982, v. 20, No 6, p. 279; *Ambrosy A., Holdi K. K. J.* Phys. Engng., 1984, v. 17, No 10, p. 856.
21. *Powels J. M.* In: Eason 79. IEEE Electronics and aerospace systems Conf., N.-Y., IEEE, 1979, p. 517. *Sasady H. C., Hartig A.* 12 Conf. Ultrasonics Internat. Guildford, IPC Business Press. Ltd. 1979, p. 468. *De Reggi A. S. e. a. J.* Acoust. Soc. Am., 1981, v. 69, No 3, p. 853; *Ricketts D.* Acoust. Soc. Am., 1981, v. 70, No 4, p. 929; *Bacon D. R.* IEEE Trans. Sonics Ultrasonics, 1982, v. SU-29, No 1, p. 18; *Holden A. J. e. a. J.* Acoust. Soc. Am., 1983, v. 73, No 5, p. 1858.
22. *Lang S. B. e. a.* Ferroelectrics, 1980, v. 27, No 1-4, p. 289.
23. *Kobayachi K., Yasude T.* Ferroelectrics, 1981, v. 32, No 1-4, p. 181; *Preston R. C. e. a. J.* Phys. Engng., 1983, v. 16, No 8, p. 786; *Бенькова А. Д. и др.* ПТЭ, 1983, т. 26, № 4, с. 220; *Dario P. e. a.* Ferroelectrics, 1984, v. 60, No 1-4, p. 199; *Pedotti A. e. a.* Ferroelectrics, 1984, v. 60, No 1-4, p. 163; *Richardson D. e. a.* Ferroelectrics, 1984, v. 60, No 1-4, p. 174.
24. Фр. пат. 2507424.
25. *Blyler L. L. e. a.* Ferroelectrics, 1980, v. 28, No 1-4, p. 303.
26. *Sullivan D. M. e. a.* Ultrason. Symp. Proc., N.-Y., 1984, v. 1, p. 460.
27. *Bjerkan L. e. a. J.* Appl. Phys., 1979, v. 50, No 8, p. 5307; *Mattiochio F., Dieulesaint E.* Electron. Lett., 1980, v. 16, No 7, p. 250; *Caramo E. e. a.* Ultrason. Symp. Proc., N.-Y., IEEE, 1979, p. 641.
28. *Meixner H., Kleinschmidt P.* Elektroniker, 1985, Bd. 24, No 10, S. 81, 87.
29. *Scheinbeim J. I. e. a.* Bull. Am. Phys. Soc., 1980, v. 25, No 3, p. 222; *Newman B. A. e. a.* Ferroelectrics, 1981, v. 32, No 1-4, p. 135; фр. пат. 2576705.
30. *Micheron F.* Rev. Tech. Thomson-CSF, 1979, v. 11, No 3, p. 513; *Ferroelectrics,* 1980, v. 28, No 1-4, p. 395. *Bros-soux D., Micheron F. J.* Appl. Phys., 1980, v. 51, No 4, p. 2020; *Toda M., Osaka S.* Ferroelectrics, 1980, v. 23, No 1-2, p. 121; *Toda M., Ikenohira K. J.* Appl. Phys., 1980, v. 51, No 11, p. 5657; *Sato T. e. a. J.* Appl. Opt., 1981, v. 20, No 2, p. 343; *Kimura M. e. a.* Electron. Lett., 1984, v. 20, No 19, p. 772; *Hatwi P. J. Opt. Soc. Am.,* 1983, v. 73, No 1, p. 110; *Goodkin D., Morris R.* Appl. Phys. Lett., 1984, v. 45, No 5, p. 603.
31. High Polymer Jap., 1986, v. 35, No 4, p. 377.

композиций АН-I, АН-I-V, АН-260 и АН-117 после полимеризации.

Композиции на основе диметакрилатоксэтиленгликолей с повторяющимся звеном $-(CH_2-CH_2-O)_n-$, где $n=1-15$ (основным компонентом служил диметакрилат триэтиленгликоля — ТГМ-3) получали блочной полимеризацией исходных композиций при температуре 293—298 К с добавлением ускорителя «В» (раствор V_2O_5 в трибутилфосфате). Для каждой из исследуемых композиций был установлен рациональный режим полимеризации (количество ускорителя, время выдержки при комнатной температуре, дополнительная термообработка при 373—383 К), обеспечивающий оптимальные степень превращения двойных связей и условия образования сетчатых полимеров с заданными свойствами. Образцы полимера ТГМ-3 получали при комнатной температуре в присутствии окислительно-восстановительной системы иницирования, состоящей из 0,5 % гидропероксида кумола и 0,1 % ускорителя «В», с последующей термообработкой при 383 К.

Испытание полимеров в условиях одноосного растяжения и сжатия проводили на машине фирмы «Instron» типа ТТ-ДМ-Л при температуре 293—295 К и скорости испытания 0,05 (растяжение) и 0,1 см/мин (сжатие). По полученным диаграммам растяжения и сжатия определяли разрушающее напряжение при растяжении (σ_e), относительное удлинение при разрыве (ϵ) и модуль упругости при растяжении (E_e) как среднеарифметическое значение по результатам 5—7 измерений с коэффициентом вариации не более 7 %. Ударную прочность (a) и разрушающее напряжение при изгибе ($\sigma_{из}$) измеряли на маятниковом копре типа МК-02 по ГОСТ 17036—71, причем среднеарифметические значения a и $\sigma_{из}$ находили по результатам 15—20 измерений. Зависимость динамических механических свойств от температуры исследовали на обратном круглом маятнике по ГОСТ 20812—75; dilatометрические исследования проводили на линейном dilatометре.

На экспериментальных кривых температурных зависимостей динамического модуля сдвига — G' (рис. 1, кривая 1''), тангенса угла механических потерь — $\text{tg} \delta$ (кривая 1') и относительного удлинения — $\Delta l/l_0$ (кривая 1) в области температур 293—473 К наблюдаются три области релаксации: при 313 К (T_B), 343—348 К (T_1) и 413—438 К (T_C). Переход при 313 К обусловлен локальным движением звеньев в макроцепях (β -переход), переход при 343—348 К — среднемасштабным совместным движением групп $(CH_2CH_2O)_3$ и звеньев в макроцепях (T_1 -переход), переход при температуре выше 373 К (в этом случае протекает основной релаксационный процесс) — размораживанием подвижности более крупных участков сетки полимера ТГМ-3 (α -переход). Положение T_1 -перехода АН-I, АН-I-V и для ТГМ-3 совпадает, но переход для АН-I и АН-I-V более широкий, что обуслов-

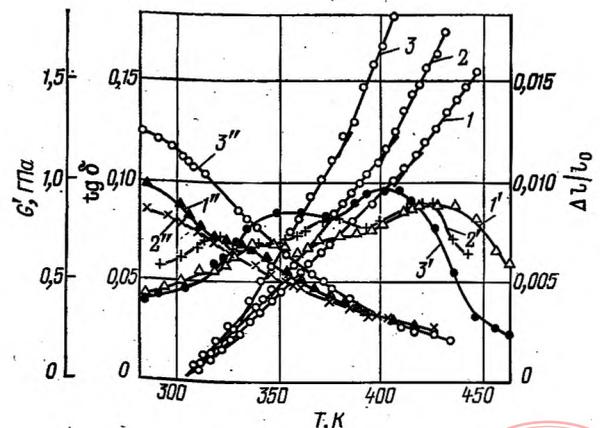


Рис. 1. Зависимость динамического модуля сдвига ($1''-3''$), тангенса угла механических потерь ($1'-3'$) и относительного удлинения ($1-3$) ТГМ-3 ($1, 1', 1''$), АН-I ($2, 2', 2''$) и АН-I-V ($3, 3', 3''$) от температуры.

УДК 678.5:668.3.01

Деформационно-прочностные и вязкоупругие свойства анаэробных композиций после их полимеризации

Е. М. ЕРЕМЕНКО, С. М. КИРЕЕВА, Ю. М. СИВЕРГИН, Д. А. АРОНОВИЧ, С. Б. МЕЙМАН, Ю. В. ЗЕЛЕНЕВ

Анаэробные составы, представляющие собой полимеризационноспособные композиции на основе олигоэфиракрилатов, содержат различные добавки [1, 2]. Изменяя качественный и количественный состав таких композиций, можно регулировать их свойства в очень широких пределах, что позволяет удовлетворить требования различных отраслей промышленности.

Представляло интерес исследовать деформационно-прочностные и релаксационные свойства анаэробных