

*Л. Б. Анискина, А. С. Викторovich,  
М. Ф. Галиханов, Д. Э. Темнов*

## **ПОЛИЭЛЕКТРОЛИТНАЯ МОДЕЛЬ ВОЛОКНИТОВ НА ОСНОВЕ ПОЛИЭТИЛЕНА И ПОЛИПРОПИЛЕНА**

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ-10-02-01065-а  
и в рамках выполнения госконтракта по ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры  
инновационной России» от 22 марта 2010 г. № 02.740.11.0544

*В работе показано, что повышенная стабильность электретного состояния волокнитов на основе полиэтилена и полипропилена по сравнению с пленками, изготовленными стандартным способом, связана с технологическими особенностями изготовления волокнитов. Для объяснения низкой удельной электропроводности волокнитов, обусловленной особенностями молекулярной структуры волокнита, природой заряженных центров, а также механизмом генерации носителей заряда, использовалась полиэлектролитная модель полимера. С помощью ИК-спектроскопии была проведена идентификация заряженных центров в кристаллической фазе полимера.*

**Ключевые слова:** полиэтилен, полипропилен, волокниты, инфракрасная спектроскопия, электропроводность полимеров, электрет.

*L. Aniskina, A. Viktorovich, M. Galikhanov, D. Temnov*

## **POLY-ELECTROLYTIC MODEL OF FIBER POLYMERS ON THE BASIS OF POLYETHYLENE AND POLYPROPYLENE**

*It is argued that higher electrets state stability of fiber polymers on the basis of polyethylene and polypropylene than that of the films produced in a standard way depends on the technology of the fiber polymers production. The polymer poly-electrolytic model was used to account for low electrical conductivity of the fiber polymers caused by the peculiarities of their molecular structure, by the nature of charged centers as well as by the charge carriers' generation mechanism. Using the IR spectroscopy the identification of charged centers in a crystalline phase of a polymer was carried out.*

**Keywords:** polyethylene, polypropylene, fiber polymer, infrared spectroscopy, electroconductivity of polymer, electret.

Волокниты — моноэлектреты с плотностью избыточного отрицательного заряда  $1 \cdot 10^{-4}$  Кл/м<sup>2</sup>. Нами установлено, что волокниты, изготовленные по технологии melt — blowing, обладают более высокой плотностью и степенью кристалличности, нежели пленки, изготовленные из гранул. В данной работе с применением метода ИК-спектроскопии выполнено сравнительное исследование пленок полиэтилена и полипропилена, изготовленных из волокнитов (ПЭВ и ППВ соответственно) и из гранул (ПЭГ и ППГ соответственно), с целью уточнения особенностей молекулярной структуры волокнитов, природы заряженных центров и механизма генерации свободных носителей заряда с участием катализатора — молекул воды.

Были изготовлены образцы, пригодные для оптического исследования из волокнитов полиэтилена (ПЭВ) и полипропилена (ППВ) с диаметром волокон 5 мкм. В случае ПЭ метод ИК-спектроскопии позволяет надежно отличить полиэтилен низкой плотности (ПЭНП) (разветвленный) от ПЭ высокой плотности (ПЭВП) (линейный). На рис. 1 и 2 приведены ИК-спектры пропускания пленок ПЭВ и ПЭГ.

Эти спектры существенно отличаются друг от друга. При этом спектры ПЭГ являются типичными для ПЭНП, а спектры ПЭВ — типичными для линейного ПЭВП. Так, в спектре ПЭГ характерными являются полосы  $1377\text{ см}^{-1}$  (симметричные деформационные колебания концевых групп  $-\text{CH}_3$ ) и  $888\text{ см}^{-1}$  (внеплоскостные деформационные колебания СН в алкильных группах), а также полосы  $1368\text{ см}^{-1}$ ,  $1352\text{ см}^{-1}$  и  $1300\text{ см}^{-1}$  (верные колебания групп  $\text{CH}_2$  в аморфной фазе, связанные с гош-конформациями). В спектре ПЭВ полосы  $1377\text{ см}^{-1}$  и  $888\text{ см}^{-1}$  не присутствуют, и сильно ослаблены полосы, связанные с аморфной фазой. Следует отметить, что в спектре ПЭВ присутствует полоса  $908\text{ см}^{-1}$  (внеплоскостные деформационные колебания в группе  $\text{CH}_2$  в характерной для ПЭВП концевой винильной группе  $-\text{CH}_2 = \text{CH}_2$ ). Из сравнения спектров, приведенных на рис. 1 и 2, можно сделать вывод о том, что пленка ПЭ, изготовленная из гранул, является разветвленным ПЭНП, а пленка, изготовленная из волокнитов, является типичным ПЭВП, несмотря на то, что и волокниты и ПЭГ изготовлены из одних и тех же гранул ПЭВД.

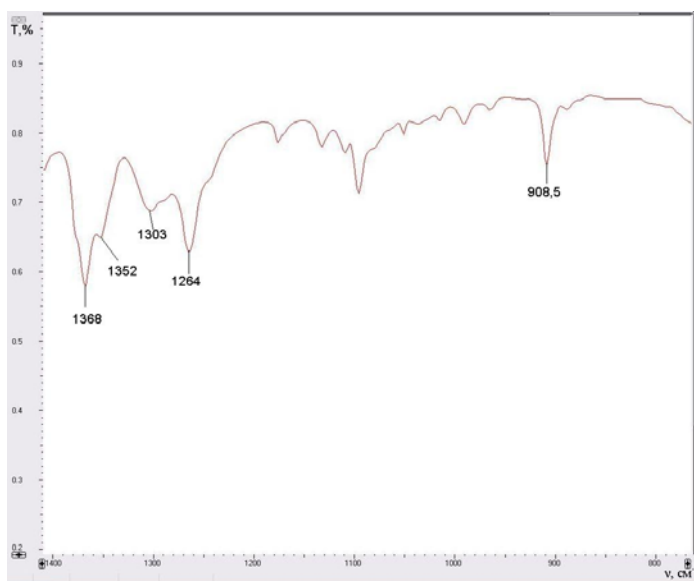
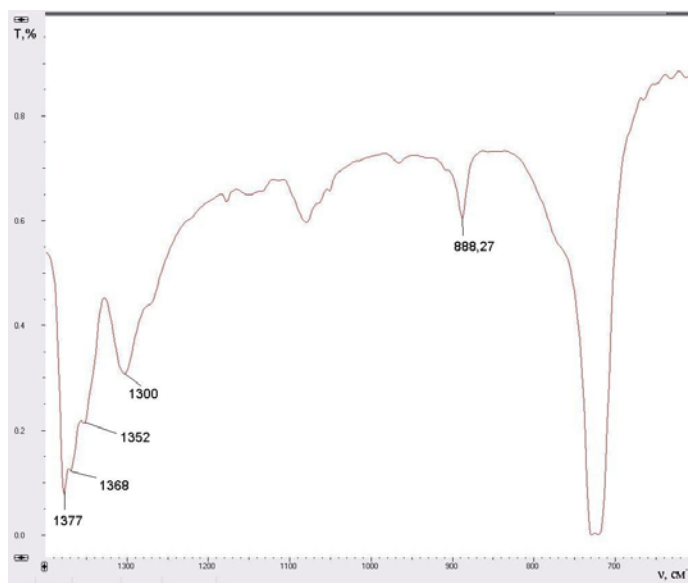


Рис. 1. ИК-спектр пленки ПЭВ толщиной 120 мкм, диаметр волокон 5 мкм

Рис. 2. ИК-спектр пленки ПЭГ толщиной 145 мкм



В спектре ПЭВ появляется новая слабая полоса  $1264,3 \text{ см}^{-1}$ , являющаяся отпечатком пальцев волокнитов, которая отсутствует в спектре пленки ПЭГ (рис. 2) и отсутствует в спектре стандартного ПЭВП [19]. Таким образом, полоса  $1264,3 \text{ см}^{-1}$  является отпечатком пальца ПЭВ, содержащего избыточный отрицательный заряд [2].

Разработчики волокнитов относили полосу  $1264 \text{ см}^{-1}$  к колебаниям эфирного кислорода, возникающего вследствие частичной деструкции при изготовлении волокнита. Однако исследование колебаний эфирного кислорода в различных соединениях, в частности в аэросиле ( $\text{SiO}_2$ ) [5], полиэтиленоксиде, лавсане и др. [10], указывает на наличие *очень сильных* полос, связанных с колебаниями кислорода в области вблизи  $1000 \text{ см}^{-1}$ , которые отсутствуют в спектрах наших образцов. С другой стороны, полосы вблизи  $1264 \text{ см}^{-1}$  обнаруживаются, например, в поливинилхлориде и в других полимерах, содержащих связи  $\text{C} - \text{C}$  [10]. На основании этих данных, а также из факта отсутствия полосы  $1264,3 \text{ см}^{-1}$  в ИК-спектрах пропускания пленок ПЭВП, изготовленных стандартным способом, делаем вывод, что полоса  $1264,3 \text{ см}^{-1}$  связана с отрицательными заряженными центрами в волокнитах ПЭ с диаметром волокна 5 мкм.

С целью проверки этого предположения было проведено сравнение ИК-спектра пропускания пленки ПЭ, изготовленной из волокнита с диаметром волокна 5 мкм, со спектрами алмаза [17] и фуллерена [18]. И в ПЭ, и в структуре алмаза имеет место одна и та же  $sp^3$  гибридизация углерода, длина связи  $\text{C} - \text{C}$  одинакова (0,154 нм), углы  $\text{C} - \text{C} - \text{C}$  близки друг к другу ( $109,4^\circ$  — в алмазе,  $110,045^\circ$  — в ПЭ) [2]. Частоты валентных колебаний  $\text{C} - \text{C}$ , активных в области комбинационного рассеяния, также близки ( $1332 \text{ см}^{-1}$  — алмаз,  $1330 \text{ см}^{-1}$  — ПП и  $1295 \text{ см}^{-1}$  — ПЭ [10]). Однако когда алмаз легирован (природный алмаз — бором (*p*-тип), искусственный алмаз — бором или азотом (*n*-тип)), появляются ИК-полосы поглощения в области  $1260\text{--}1300 \text{ см}^{-1}$  [17]. ИК-полоса, связанная с

валентными колебаниями C – C, проявляется вследствие резонанса вынужденного колебания заряженного центра в поле световой волны с колебаниями C – C в соседних звеньях. Согласно предложенному механизму, частота полосы колебания C – C слабо зависит от знака заряженного центра, что и наблюдается как в приведенных примерах, так и в полимерах. В то же время в полимере полоса  $1264\text{ см}^{-1}$  присутствует только при наличии **избыточного** отрицательного заряда, что имеет место в волокнитах и отсутствует в стандартном ПЭВП. Присутствие этой полосы в алмазе связано с тем, что алмазы — полупроводники, компенсированные лишь частично. Рекомбинация же (коллапс), например, карбокатиона  $C^+$  (связанная дырка) с ионом  $V^-$  (акцептор) невозможна в принципе.

На рис. 3 и 4 приведены ИК-спектры пропускания пленки ППГ и пленки ППВ. Следует отметить, что спектры пленок ППГ и ППВ являются типичными для изотактического ПП. Однако имеется существенное различие.

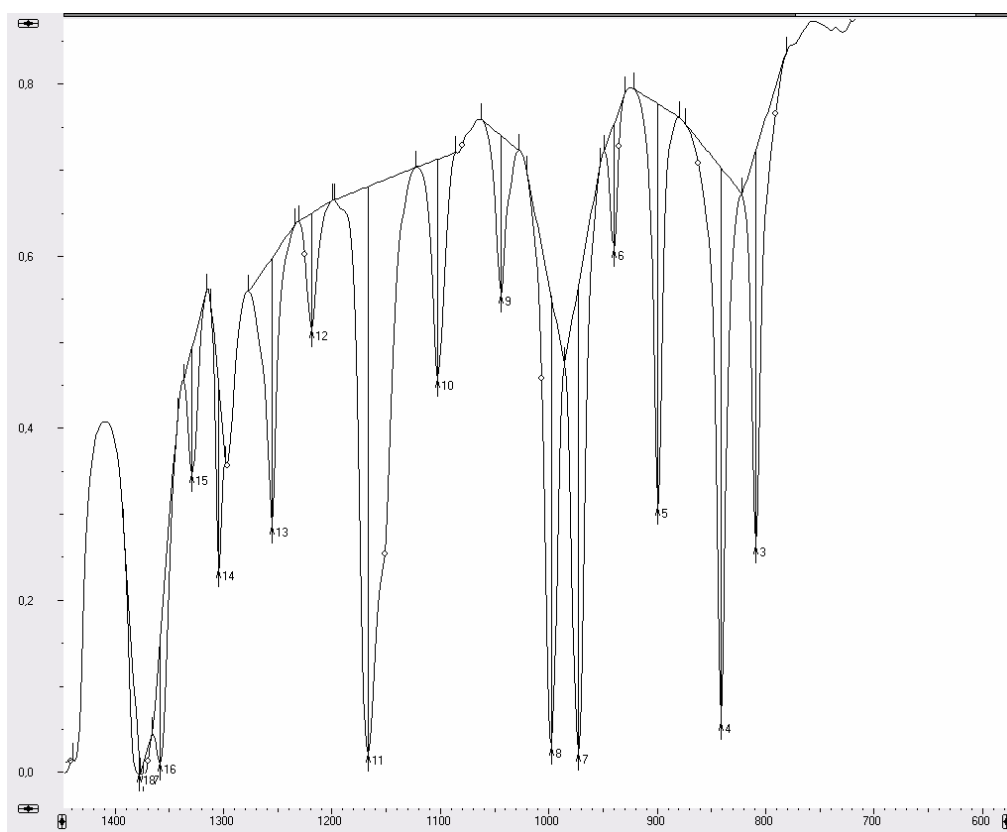


Рис. 3. ИК-спектр пленки ППГ толщиной 200 мкм  
Ось абсцисс — частоты,  $\text{см}^{-1}$ , ось ординат — пропускание, %

Частоты пиков поглощения для пленки ППГ, см<sup>-1</sup>

№	Начало	Максимум	Конец	Ордината	Высота	Ширина
1	428,17	459,19	505,32	0,61257	-0,27707	11,698
2	507,25	528	551,61	0,8052	-0,07872	13,401
3	781,13	809,02	821,63	0,26351	-0,45997	9,6224
4	821,63	840,88	873,7	0,058029	-0,6443	9,8528
5	879,49	899,32	921,92	0,30854	-0,4684	9,2394
6	929,64	940,06	948,92	0,60789	-0,14547	6,9677
7	952,78	972,86	985,57	0,022568	-0,54235	12,541
8	985,57	997,8	1020,3	0,028782	-0,52482	12,266
9	1028	1044,1	1062,7	0,55474	-0,18549	9,2863
10	1085,9	1102,4	1122,5	0,45662	-0,25613	11,751
11	1122,5	1167	1197,7	0,020606	-0,66024	27,344
12	1199,7	1219	1230,5	0,51417	-0,13548	9,8988
13	1234,4	1255,6	1276,8	0,28679	-0,31112	9,856
14	1298	1304,2	1311,5	0,23538	-0,20874	6,0924
15	1315,4	1329	1336,6	0,34655	-0,14729	9,0239
16	1342,4	1359	1365,5	0,010547	-0,13906	12,526
17	1365,5	1374,1	1377,1	-0,002251	-0,013046	7,7046
18	1377,1	1378,2	1392,5	-0,0017571	-0,02115	12,237
19	1438,8	1457,7	1463,9	-0,0043125	-0,0066402	18,37
20	1463,9	1465,3	1490,9	-0,0027749	-0,02508	21,201
21	1614,3	1630,3	1631,7	0,7334	-0,0012305	13,461

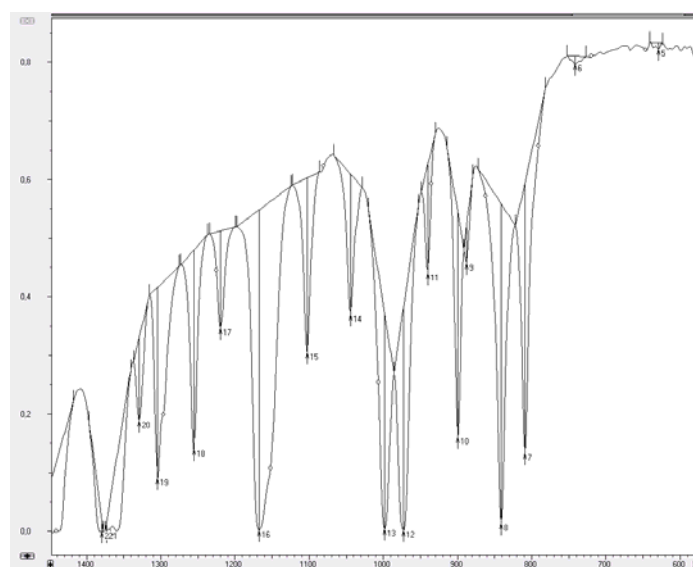


Рис. 4. ИК-спектр пленки ППВ толщиной 190 мкм, диаметр волокон 5 мкм  
Ось абсцисс — частоты, см<sup>-1</sup>, ось ординат — пропускание, %

Таблица 2

Частоты пиков поглощения для пленки ППВ, см<sup>-1</sup>

№	Начало	Максимум	Конец	Ордината	Высота	Ширина
1	451,4	459,23	472,62	0,45192	-0,2286	8,3831
2	503,48	528,41	542,06	0,70124	-0,1052	11,763
3	542,06	545,4	549,78	0,79032	-0,016565	4,4965
4	557,5	562,58	567,14	0,7969	-0,019666	5,3046
5	623,08	628,99	640,44	0,82197	-0,01061	11,328
6	727,25	741,62	752,33	0,79673	-0,013943	15,199
7	781,27	809,17	821,78	0,13254	-0,46119	10,54
8	821,78	841,02	871,93	0,012651	-0,54581	12,915
9	879,65	887,92	891,22	0,45686	-0,059504	5,9271
10	891,22	899,53	914,37	0,16103	-0,38217	8,5023
11	929,8	940,27	949,09	0,43993	-0,18464	7,0452
12	952,95	973,14	985,74	0,0010909	-0,37841	15,625
13	985,74	998,14	1020,5	0,0032879	-0,3666	15,532
14	1028,2	1044,3	1066,8	0,36951	-0,23991	9,5358
15	1086,1	1102,9	1122,7	0,30493	-0,29777	10,509
16	1124,6	1167,5	1197,9	0,0018955	-0,54623	32,835
17	1199,9	1219,4	1234,6	0,3465	-0,16568	10,076
18	1236,5	1255,7	1273,2	0,14004	-0,33924	9,7185
19	1275,1	1304,3	1315,6	0,090687	-0,32584	16,116
20	1315,6	1329,2	1336,8	0,1885	-0,14191	9,4656
21	1340,7	1373,6	1375,4	-0,0014458	-0,014971	31,806
22	1377,3	1379,6	1396,6	-0,0013178	-0,02237	15,102
23	1417,9	1457,8	1468	-0,0028754	-0,046589	38,595
24	1468	1469,1	1498,9	-0,0014996	-0,013898	21,793
25	1583,8	1649,2	1668,6	0,56717	-0,080654	30,332

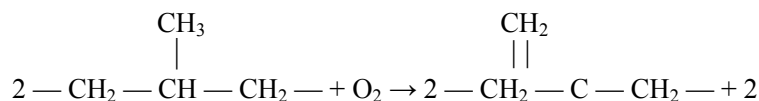
В табл. 3 приведены частоты характерных полос для данной области спектра.

Таблица 3

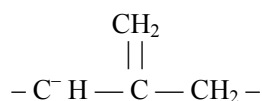
υ, см <sup>-1</sup> для пленки ПП, изготовленной из гранул	υ, см <sup>-1</sup> для пленки ПП, изготовленной из волокнитов
808,13	808,13
840,92	840,92
—	<b>887,21</b>
898,78	898,78
939,28	939,28
972,07	972,07
997,14	997,14

1043,4	1043,4
1103,2	1103,2
1166,9	1166,9
1218,9	1218,9
1255,6	<b>1255,6</b>
1303,8	1303,8
1328,9	1328,9
13,75,2	13,75,2

Из рис. 3 и 4 и из табл. 3 видно, что в спектре ППВ присутствует полоса  $887,21 \text{ см}^{-1}$ , которой нет в спектре ППГ и в спектрах пленок ПП, изготовленных стандартными методами [7]. Таким образом, данная полоса является характерной для пленки ППВ, изготовленной из волокнита, содержащего избыточный отрицательный заряд. Слабая полоса  $1255,6 \text{ см}^{-1}$  присутствует как в ППВ, так и в ППГ. Однако интенсивность этой полосы в ППВ заметно выше. Присутствие этой полосы в пленках ППГ связано с тем, что в цепи ПП дипольный момент связи  $C_2 - C_3$  (между двоичными и третичными углеродами) не равен нулю: отрицательный заряд  $\delta^-$  на атоме  $C_3$  выше, чем на атоме  $C_2$ . В случае ПП отпечаток пальцев волокнита (полоса  $887,21 \text{ см}^{-1}$ ), связанный с наличием избыточного отрицательного заряда в волокните, можно интерпретировать следующим образом. Слабая полоса  $898,78 \text{ см}^{-1}$  является характерной полосой винилиденовой группы [7, 16], в случае ПП такие группы возникают при окислении пропилена:

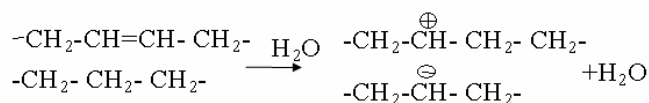


Снижение частоты винилиденовой группы (внеплоскостные деформационные колебания  $-\text{CH}_2$ ) является следствием частичного перекрытия электронной плотности отрицательного заряда в группе  $\text{CH}$  с антисвязывающими орбиталями  $\text{CH}_2$  в винилиденовой группе:



Таким образом, эта полоса возникает только при наличии избыточного отрицательного заряда, локализованного по соседству с винилиденовой группой.

При объяснении экспериментальных данных, полученных нами оптическими методами, работоспособной оказалась предложенная нами модель полимерного электролита. В этой модели носителями заряда в полимере являются отрицательно и положительно заряженные вакансии водорода в цепях полимера. Такие вакансии возникают при взаимодействии физически сорбированных молекул воды, например, с ненасыщенными связями  $\text{C} = \text{C}$  в полимере. В этом случае имеем:



В этом процессе вода является катализатором.

То, что сорбция воды приводит к существенному, в ряде случаев на много порядков увеличению удельной электропроводности полимеров, надежно установлено в многочисленных работах [23, 1, 2]. В то же время экспериментально установлено, что такое повышение электропроводности связано не с непосредственным участием в переносе заряда продуктов диссоциации воды и что молекулы воды фактически являются катализаторами электропроводности полимера [23].

ПЭ и ПП — полукристаллические полимеры с ламелярной структурой кристаллов сложенных цепей (КСЦ) при толщине ламелей 10–20 нм [2]. На сегодняшний день причина ламелярной укладки цепей остается неясной, поскольку для этого требуется наличие в цепи стержневых сегментов Куна с длиной, равной толщине ламелей.

Процесс кристаллизации полимера невозможен без выпрямления цепей [7], следовательно, требуется физическая модель, объясняющая процесс выпрямления цепей. Очевидно, что в рассматриваемой проблеме выпрямление цепей связано с наличием избыточного отрицательного заряда в полимере. В данном случае наиболее близкой является полиэлектролитная модель [13, 20]. При достаточной концентрации заряда наличие одноименных зарядов в цепи может привести к выпрямлению цепи. В этих работах рассмотрены, однако, полиэлектролиты, включающие одноименно заряженные цепи (содержащие ионы — заряженные группы цепи, от которых отщепились противоионы — примесные катионы или анионы) в сильно разбавленном растворе, например в водном. Последнее необходимо для достаточного удаления противоионов от ионов. Основной задачей, решаемой в вышеупомянутых работах, является установление взаимосвязи между процессом растворения и обратным процессом — рекомбинацией противоионов с ионами, (коллапс), а не анализ условий взаимодействия заряженных центров в самой цепи.

Особенностью данной работы является то, что в ней выполнено установление условий, приводящих к выпрямлению цепей при наличии *избыточного* отрицательного заряда в цепи волокнита.

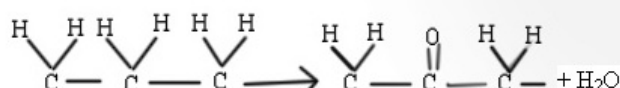
Как отмечалось, для образования стержневых фрагментов требуется наличие в цепи заряженных центров одного знака (ионов) при достаточно низкой концентрации противоионов, что возможно в сильно разбавленном растворе полимера (полиэлектролите). Слабым местом при применении модели электролита для объяснения ламелярной структуры полимера является электрическая нейтральность раствора, приводящая к возможности коллапса ионов и противоионов, и очевидно, что для возникновения затравочных ламелярных кристаллов в расплаве полимера необходимо наличие областей, содержащих *избыточные* ионы одного знака.

Электреты нового типа (отрицательно заряженные моноэлектреты — волокниты) разработаны в последние годы в Беларуси [9]. В волокнитах на основе



ПЭ и ПП при диаметре волокон, равном 5 мкм или меньше 5 мкм, получена плотность избыточного отрицательного заряда около  $2 \cdot 10^{-4}$  Кл/м<sup>2</sup> при времени релаксации заряда порядка 20 лет [6].

Очевидно, что высокая стабильность электретенного состояния волокнитов по сравнению со стандартными пленками является следствием технологических особенностей процесса изготовления волокнитов. В этой технологии расплавленный ПЭ проходит через фильеру при 370–390 °С и вылетает под давлением около 3 атм. В районе сопла происходит частичная деструктуризация ПЭ в результате окисления (аналогично для ПП):



Выбрасывание расплавленного полимера через фильеру диаметром 0,4 мм со скоростью 50 м/с происходит при 380 °С. При прохождении через фильеру полимер приобретает отрицательный заряд с плотностью  $\sigma \approx 10^{-3}$  Кл/м<sup>2</sup> [4].

Итогом окисления является появление в цепи карбонильной группы (что подтверждается усилением на ИК-спектре полосы поглощения 1725 см<sup>-1</sup>) и образование воды. Аналогично в ПП происходит образование винилиденных групп и молекул воды. В ППВ отсутствует полоса 1725 см<sup>-1</sup>, но происходит усиление полосы 1255,6 см<sup>-1</sup> и появляется полоса 887,21 см<sup>-1</sup>. Молекула воды при такой температуре диссоциирует на Н<sup>+</sup> и ОН<sup>-</sup>. Согласно предложенной альтернативной полиэлектролитной модели полимера, протоны диффундируют к металлу, где и нейтрализуются, а ионы ОН<sup>-</sup> (очень реакционноактивные) вырывают из цепей протоны, в результате происходит образование отрицательно заряженных фрагментов цепи (вакансии гидридионов) с регенерацией самой молекулы воды. Таким образом, в рассматриваемом процессе образования избыточного отрицательного заряда в полимере на границе полимер — металл в роли катализатора выступает вода, являющаяся продуктом окисления.

Представляет интерес вопрос о том, достаточна ли концентрации этих центров для реализации механизма кристаллизации полимера благодаря выпрямлению цепей вследствие электростатического взаимодействия одноименных зарядов в цепи. Необходимым условием для обеспечения выпрямления цепи вследствие электростатического расталкивания одноименных зарядов в цепи является соотношение [20, 15]:

$$W = \frac{e^2}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r} \geq kT.$$

Отсюда мы находим максимально допустимое расстояние между заряженными центрами в пределах одной цепи, которое в научной литературе известно как «длина Ландау» [8]:

$$r = \frac{e^2}{4\pi\epsilon\epsilon_0 kT} = \frac{1.67 \cdot 10^{-5}}{\epsilon T}, \text{ м.}$$

Диэлектрическая проницаемость ПЭ и ПП  $\epsilon = 2,3$ ,  $T = 390$  °С = 663К — температура волокнита в процессе его изготовления. Тогда  $r = 110$  Å.

Область отрицательного объемного заряда в полимере на границе с металлом в фильере диаметром 0,4 мм характеризуется толщиной Дебая  $\lambda_d$  [12]:

$$\lambda_d = \sqrt{\frac{\varepsilon\varepsilon_0 kT}{n \cdot e^2}} = 69,0 \cdot \sqrt{\frac{\varepsilon T}{n}}, \text{ м}, \quad (1)$$

где  $n$  — концентрация заряженных звеньев.

Для нахождения численного значения  $n$  воспользуемся экспериментально измеренной в [12] величиной поверхностной плотности отрицательного заряда  $\sigma \approx 10^{-3}$  Кл/м<sup>2</sup>.

В цилиндрической фильере диаметром  $D$  и длиной  $L$ :

$$\sigma = \frac{neV}{S},$$

где  $V = \pi D \lambda_d L$  — объем цилиндрического заряженного слоя толщиной  $\lambda_d$ , а  $S$  — площадь поверхности этого слоя:

$$S = \pi DL,$$

тогда

$$\sigma = ne\lambda_d. \quad (2)$$

Решая совместно равенства (1) и (2), находим, что  $n = 1,4 \cdot 10^{25}$  м<sup>-3</sup> и расстояние между заряженными центрами:

$$r = \frac{1}{\sqrt[3]{n}}$$

$r = 41 \text{ \AA}$ , которое существенно меньше критического.

Приведенный анализ показывает, что вблизи поверхности реализуются условия, достаточные для формирования затравочных кристаллов. Далее необходимо, чтобы затравочные кристаллы проросли на значительную глубину в объем волокна. Это означает, что наиболее эффективные электреты — волокниты, состоящие из тонких волокон (у которых толщина волокна  $\leq 5$  мкм).

Необходимым условием кристаллизации является пространственное разделение положительных и отрицательных зарядов, которое осуществляется в расплавленном волокните в электрическом поле отрицательной короны. И очевидно, что это может произойти при не слишком большой толщине волокна. Таким образом, мы получили полиэлектролитную модель полимера. Она включает в себя положительные и отрицательные вакансии в цепях с избыточным отрицательным зарядом, сформированным в фильере при температуре 390 °С и при пространственном разделении положительных и отрицательных зарядов в электрическом поле отрицательной короны, обеспечивающим затравочную кристаллизацию полимера с увеличением его кристалличности и, следовательно, увеличением его удельного сопротивления. Эта модель позволяет объяснить физическую природу формирования и длительного сохранения во времени электретного состояния волокнистого электрета.

Полиэлектролитная модель полимера позволяет объяснить происхождение особенностей молекулярной структуры волокнитов, обеспечивающей сверхниз-

кую удельную электропроводность ( $\sigma \leq 3,3 \cdot 10^{-20} \text{ (Ом}\cdot\text{м)}^{-1}$  при времени релаксации  $\tau = \epsilon_0 \epsilon / \sigma \approx 20 \text{ лет} = 20 \cdot 3,16 \cdot 10^7 \text{ с}$ ).

В заключение отметим следующее. Экспериментальные данные, подтверждающие жидкокристаллическое состояние в расплавах линейных полимеров, в том числе ПЭ и ПП, ранее обсуждались в [22, 14]. Однако, в этих работах непосредственная связь жидкокристаллического состояния с наличием нескомпенсированного избыточного заряда в цепях расплавленного полимера осталась незамеченной. С другой стороны, экспериментальные данные, непосредственно подтверждающие наличие отрицательных зарядов в слоях расплавленных полимеров (ПЭ, ПП и др.), прилегающих к металлу [4, 11], не были увязаны с идеями скейлинга в полимерах [13, 20], приводящими к неизбежному формированию нанодисперсной жидкокристаллической структуры в заряженных областях полимерных расплавов. Последнее, видимо, обусловлено тем, что идеи скейлинга были развиты применительно к сильно разбавленным растворам (не расплавам) полимеров.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Блайт Э. Р., Блур Д.* Электрические свойства полимеров / Пер. с англ. М.: Физматлит, 2008. 376 с.
2. *Вундерлих Б.* Физика макромолекул: В 3 т. Т. 1. Кристаллическая структура, морфология, дефекты / Пер. с англ. М.: Мир, 1976. 623 с.
3. *Гольдаде В. А., Макаревич А. В., Панчук Л. С., Сиканевич А. В., Чернорубашин А. И.* Полимерные волокниты MELT-BLOWN материалы Гомель: ИММПС НАНБ им. В. А. Белого, 2000. 260 с.
4. *Гольдаде В. А., Пинчук Л. С.* Электретные пластмассы: физика и материаловедение / Под ред. В. А. Белого. М.: Наука и техника, 1987. 231 с.
5. *Гороховатский Ю. А., Гороховатский И. Ю., Гулякова А. А., Бурда В. В.* Исследование стабильности электретного состояния в композитных пленках ПЭВД с наноразмерными включениями азросила // Физика диэлектриков (Диэлектрики-2008): Материалы XI Международной конференции, Санкт-Петербург, 2008 г. Т. 2. СПб.: Изд-во РГПУ им. А. И. Герцена, 2008. С. 347–351.
6. *Зотов С. В.* Волокнистые электретные фильтроматериалы на основе полиолефинов для средств индивидуальной защиты органов дыхания: Автореф. дис. ... канд. тех. наук. Минск, 2006. 14 с.
7. *Инфракрасная спектроскопия полимеров* / Под ред. И. Деханта. ГДР, 1972.
8. *Клеммод Ф., Доуэрти Дж.* Электродинамика частиц и плазмы / Пер. с англ. Н. Н. Сотникова; Под ред. А. А. Рухидзе. М.: Мир, 1996. 525 с.
9. *Кравцов А. Г., Гольдаде В. А., Зотов С. В.* Полимерные электретные фильтроматериалы для защиты органов дыхания / Под ред. Л. С. Пинчука. Гомель, 2003. 199 с.
10. *Купцов А. Х., Жижин Г. Н.* Фурье-КР и Фурье-ИК спектры полимеров: Справочник. М.: Физматлит, 2001. 656 с.
11. *Луцкейкин Г. А.* Полимерные электреты. М.: Химия, 1976. С. 29–32.
12. *Митчнер М., Кругер Ч.* Частично поляризованные газы / Пер. с англ. М.: Мир, 1976. 496 с.
13. *П. де Жен.* Идеи скейлинга в физике полимеров. М.: Мир, 1982. 368 с.
14. *Платэ П. А., Шибеев В. П.* Гребнеобразные полимеры и жидкие кристаллы. М.: Химия, 1980. С. 203–206.
15. *Семчиков Ю. Д.* Высокомолекулярные соединения. 2-е изд., стереотипное. М.: Академия, 2005г. 368 с.
16. *Тарутина Л. И., Позднякова Ф. О.* Спектральный анализ полимеров. Л.: Химия, 1986. 268 с.

17. Физические свойства алмаза: Справочник. Киев: Наукова думка, 1887. 188 с.
18. Фуллерены: Учеб. пособие / Л. Н. Сидоров, М. А. Юровская. М.: Изд-во «Экзамен», 2005. 688 с.
19. *Hart V., Kenig Дж.* Изучение переходов в полиэтилене методом инфракрасной Фурье-спектроскопии // Новейшие инструментальные методы исследования структуры полимеров / Под ред. Дж. Кенига. М.: Мир, 1982. Гл. 8. С. 109–147.
20. *Хохлов А. Р., Кучанов С. И.* Лекции по физической химии полимеров. М.: Мир, 2000. 192 с.
21. Электрические свойства полимеров / Под ред. Б. И. Сажина. 3-е изд. Перераб. Л., 1986. С. 191–219.
22. *Smit P.* Koll-Z. u. Z. Polymere, 1972. B. 250. S. 27–39.
23. *Tyczkowski J., Kryszewski M., J. Appl. Polym. Sci., Appl. Polim. Sym.* 1984. V. 38. P. 149.

## REFERENCES

1. *Blajt JE. R., Blur D.* JElektricheskie svojstva polimerov / Per. s angl. M.: Fizmatlit, 2008. 376 s.
2. *Vunderlih B.* Fizika makromolekul: V 3 t. T. 1. Kristallicheskaja struktura, morfologija, defekty / Per. s angl. M.: Mir, 1976. 623 s.
3. *Gol'dade V. A., Makarevich A. V., Panchuk L. S., Sikanevich A. V., CHernorubashkin A. I.* Polimernye voloknity MELT-BLOWN materially. Gomel': IMMPS NANB im. V. A. Belogo, 2000. 260 s.
4. *Gol'dade V. A., Pinchuk L. S.* JElektretneye plastmassy: fizika i materialovedenie / Pod red. V. A. Belogo. M.: Nauka i tehnika, 1987. 231 s.
5. *Gorohovatskij Ju. A., Gorohovatskij I. Ju., Guljakova A. A., Burda V. V.* Issledovanie stabil'nosti jelektretного sostojanija v kompozitnyh plenkah PJEVD s nanorazmernymi vkljucheni-jami ajerosila // Fizika dijelektrikov (Dijelektriki-2008): Materialy XI Mezhdunarodnoj konferencii, Sankt-Peterburg, 2008 g. T. 2. SPb.: Izd-vo RGPU im. A. I. Gercena, 2008. S. 347–351.
6. *Zotov S. V.* Voloknistye jelektretneye fil'tromaterialy na osnove poliolefinov dlja sredstv individual'noj zavity organov dyhanija: Avtoref. dis. ... kand. t. nauk. Minsk, 2006 14 s.
7. Инфракрасная спектроскопия полимеров / Под ред. Дежана. I. GDR, 1972.
8. *Klemmod F., Doujerti Dzh.* JElektrodinamika chastic i plazmy / Per. s angl. d-r f.-m. n. N. N. Sotnikova; Pod red. A. A. Ruhidze. M.: Mir, 1996. 525 s.
9. *Kravcov A. G., Gol'dade V. A., Zotov S. V.* Polimernye jelektretneye fil'tromaterialy dlja zavity organov dyhanija / Pod red. L. S. Pinchuka Gomel', 2003. 199 s.
10. *Kupcov A. H., ZHizhin G. N.* Fur'e-KR i Fur'e-IK spektry polimerov. Spravochnik. M.: Fizmatlit, 2001. 656 s.
11. *Luwejkin G. A.* Polimernye jelektrety. M.: Himija, 1976. S. 29–32.
12. *Mitchner M., Kruger CH.* Chastichno poljarizovannye gazy / Per. s angl. M.: Mir, 1976. 496 s.
13. *P. de Zhen.* Idei skejlinga v fizike polimerov. M.: Mir, 1982. 368 s.
14. *Platje P. A., Shibaev V. P.* Grebneoboaznye polimery i zhidkie kristally. M.: Himija, 1980. S. 203–206.
15. *Semchikov JU. D.* Vysokomolekuljarnye soedinenija. 2-e izd., stereotipnoe, M.: Akademija, 2005. 368 s.
16. *Tarutina L. I., Pozdnjakova F. O.* Spektral'nyj analiz polimerov. L.: Himija, 1986. 268 s.
17. Физические свойства алмаза: Справочник. Киев: Наукова думка, 1887. 188 с.
18. Фуллерены: Учеб. пособие / Сидоров Л. Н., Юровская М. А. М.: Изд-во «Экзамен», 2005. 688 с.
19. *Hart V., Kenig Dzh.* Изучение переходов в полиэтилене методом инфракрасной Фурье-спектроскопии // Новейшие инструментальные методы исследования структуры полимеров / Под ред. Дж. Кенига. М.: Мир, 1982. Гл. 8. С. 109–147.

## ФИЗИКА

---

20. *Hohlov A. R., Kuchanov S .I.* Lekcii po fizicheskoj himii polimerov. M.: Mir, 2000. 192 s.
21. Jelektricheskie svojstva polimerov / Pod red. B. I. Sazhina. 3-e izd., pererabotannoe. L., 1986. S. 191–219.
22. *Smit P.* Koll.-Z. u. Z. Polymere, 1972. B. 250. S. 27–39.
23. *Tyczkowski J., Kryszewski M., J. Appl. Polym. Sci., Appl. Polim. Sym.* 1984. V. 38. P. 149.