

УДК 541.64:537.3

ВЛИЯНИЕ ЗАРЯДА ПОЛИМЕРНОГО ЭЛЕКТРЕТА НА РАСТЕКАНИЕ ЖИДКОСТИ

© 1995 г. В. Г. Плевачук, И. М. Вертячих, В. А. Гольдаде, Л. С. Пинчук

Институт механики металлокомпозитных систем Академии наук Беларусь
246652 Гомель, ул. Кирова, 32а

Поступила в редакцию 05.08.94 г.

Исследовано растекание диэтиленгликоля и глицерина по поверхности электретных пленок из пентапласта. Приведены данные о скорости растекания капли жидкости и изменении угла смачивания в зависимости от электретного заряда пленок. Предложена математическая модель, позволяющая учитывать влияние поляризационного заряда на кинетику растекания жидкостей по поверхности полимерных электретов.

В настоящее время установлены основные закономерности растекания жидкостей по поверхности твердых тел в зависимости от физико-химического взаимодействия жидкости и твердого тела (адсорбция, диффузия, растворимость и т.д.) и воздействия внешних физических полей (освещение, наложение магнитного поля, электрическая поляризация твердого тела и т.п.) [1 - 3]. Тем не менее некоторые аспекты влияния поляризации на смачивание и растекание остались за пределами внимания исследователей. Это вызвано прежде всего тем, что объектом исследования служили в основном металлы, поляризация которых неизбежно сопровождается изменением химической структуры поверхностного оксидного слоя. Процессы растекания практически не изучены для группы веществ – источников электрического поля. Ее типичным представителем являются полимерные электреты – полимерные диэлектрики, длительно сохраняющие поляризованное состояние. Такое исследование имеет самостоятельную ценность, так как полимеры составляют обширный класс конструкционных и триботехнических материалов, электрическая поляризация которых приобретает тенденцию стать распространенным технологическим процессом.

В настоящей работе изучали растекание диэтиленгликоля (ДЭГ) и глицерина по поверхности электретных пленок из пентапласта.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Эксперименты проводили с пленками толщиной 450 - 500 мкм, полученными "горячим" прессованием из порошка пентапласта (ТУ 6-05-1422-79). Пленки переводили в электретное состояние путем нагревания между стальными электродами при 150°C в течение 1 ч с наложением постоянно-

го электрического поля напряженностью $E = 10^4 - 10^6$ В/м (термоэлектреты) или поля коронного разряда (кореноэлектреты). Затем пленки охлаждали до комнатной температуры без отключения источника питания. Электрическое поле создавали с помощью источников напряжения Б5-50 и АФ-3. Поверхностную плотность заряда σ электретных пленок определяли компенсационным бесконтактным методом [4]. Образы перед поляризацией обезжиривали этиловым спиртом.

Объем капель жидкости, наносимых на положительно заряженную поверхность исследуемых пленок, дозировали с помощью микроширица. Объем капель составлял 5×10^{-10} м³ (ДЭГ) и 10⁻⁹ м³ (глицерин). Диаметр основания капли, т.е. площади касания и пленки измеряли с помощью оптического микроскопа МПСУ-1, а краевой угол – с помощью микроскопа ММИ-2, снабженного гoniометрическим окуляром.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Эксперименты проводили с контрольными (неполяризованными) и электретными пленками. Полученные результаты свидетельствуют, что поляризация пленок и увеличение заряда электрета обусловливает понижение начальной скорости растекания жидкости (табл. 1) и уменьшение площади фактического касания капли и пленки (табл. 2).

Влияние заряда электрета на растекание жидкости можно объяснить следующим образом. Движущая сила растекания f_1 действует на частицы жидкости и направлена к поверхности раздела твердое тело–жидкость. Она возрастает с увеличением сорбционной способности твердого тела, что способствует скорости растекания [1]. Интенсивность протекания сорбционных процессов в электретных пленках меньше, чем в кон-

трольных [5], поэтому растекание по ним ДЭГ происходит медленнее. По-видимому, поляризационный заряд создает энергетический барьер, на преодоление которого расходуется движущая сила растекания. Следовательно, при прочих равных условиях смачивание электретных пленок меньше, чем контрольных. Экспериментальное подтверждение этого показано в табл. 3 и на рис. 1. Зависимость, приведенная для глицерина на рис. 1, хорошо описывается уравнением

$$\cos\theta = \cos\theta_0 - 1.4 \times 10^4 \sigma - 2 \times 10^{-9} \sigma^2, \quad (1)$$

где $\cos\theta_0$ – косинус равновесного краевого угла для капли глицерина на поверхности неполяризованной пленки пентапласта.

Рассмотрим кинетические закономерности растекания жидкости по поверхности твердого тела. При растекании жидкостей с вязкостью более 0.1 Па с основное сопротивление перемещению жидкости создается силой внутреннего трения f_2 в жидкости, и растекание происходит в вязком режиме [1]. Для его описания подходит модель, согласно которой растекание начинается с образования на краю капли клиновидного слоя жидкости с малым гидродинамическим сопротивлением [6]. Силы молекулярного притяжения, действующие на жидкость со стороны твердого тела, “вытягивают” из нижней части капли плоский кольцевой слой жидкости, толщина которого не превышает радиус межмолекулярного притяжения. Последующее перемещение жидкости обуславливает утолщение этого слоя до нескольких микрон. Затем он исчезает, сливаясь с каплей.

Перемещение слоя жидкости при ограниченном смачивании осуществляется под действием силы

$$f_1 = \frac{\partial}{\partial r} (\pi r^2 \Delta W),$$

где $r = r(t)$ – радиус смоченной круговой площадки $\Delta W = W_{12} [\cos\theta - \cos\theta(t)]$ – уменьшение свободной поверхностной энергии системы пленка–капля при смачивании, W_{12} – поверхностная энергия на границе жидкость–воздух, θ и $\theta(t)$ – равновесный и динамический краевые углы. При выполнении условий квазистационарности и безынерционности [7] $f_1 = f_2$.

Чтобы получить уравнение движения растекающейся капли, надо определить зависимости силы f_2 внутреннего трения в жидкости и динамического краевого угла $\theta(t)$ от текущего радиуса r основания капли.

Если пренебречь влиянием силы тяжести по сравнению с силами поверхностного натяжения, форму капли в условиях ограниченного смачивания можно аппроксимировать сферическим сегментом с кольцевым поясом клиновидного слоя (рис. 2). Объем капли и вязкость жидкости можно считать постоянными до конца процесса растекания при отсутствии диффузии и интенсивного хи-

Таблица 1. Начальная скорость v растекания ДЭГ по поверхности пленок из пентапласта в зависимости от поверхностной плотности заряда σ пленок

Образец	$\sigma, \text{Кл/м}^2$	$v \times 10^{-4}, \text{мм/с}$
Контрольный	0	2.8
Термоэлектрет	4.96×10^{-6}	1.4
	2.78×10^{-3}	0.6
Короноэлектрет	0.36	0.4

Таблица 2. Увеличение радиуса Δr капли ДЭГ, растекающейся по поверхности пленки из пентапласта, в зависимости от времени t с момента помещения капли на пленку и от плотности заряда σ пленки

Вид образца	$\sigma, \text{Кл/м}^2$	$\Delta r^* (\text{мм})$ для t				
		2 с	6 с	8 с	10 с	12 с
Контрольный	0	0.190	0.283	0.313	0.330	0.337
Термо-электрет	1.16×10^{-5}	0.090	0.202	0.233	0.267	0.280
	2.78×10^{-3}	0.080	0.201	0.228	0.248	0.265
Короно-электрет	0.36	0.078	0.139	0.155	0.167	0.178
	0.58	0.059	0.103	0.114	0.123	0.131

* $\Delta r = r - r_0$, где r и r_0 – значения радиуса в моменты времени t и 0.

Таблица 3. Изменение во времени t угла смачивания θ жидкостями пленок из пентапласта

$t \times 10^3, \text{с}$	$\cos\theta$ для жидкостей на пленках с различными σ^*				
	ДЭГ		Глицерин		
	$\sigma = 0$	$\sigma = 4.17$	$\sigma = 0$	$\sigma = 5.04$	$\sigma = 7.24$
0.5	0.699	0.533	0.380	0.211	0.096
1.0	0.702	0.548	0.398	0.243	0.113
2.0	0.704	0.562	0.415	0.275	0.130
3.0	0.705	0.571	0.425	0.294	0.139
4.0	0.706	0.577	0.432	0.307	0.146
4.5	0.706	0.579	0.435	0.313	0.149

* $\sigma \times 10^{-6}, \text{Кл/м}^2$.

мического взаимодействия жидкости и пленки. Для капли, имеющей в начальный момент времени радиус R и высоту h , динамический краевой угол $\theta(t) = 2 \operatorname{arctg} \sqrt{h / (2R - h)}$, откуда следует

$$\operatorname{tg} \frac{3\theta(t)}{2} + 3 \operatorname{tg} \frac{\theta(t)}{2} - 4\rho^{-1} = 0, \quad (2)$$

где $\rho = r(t)/R$ – безразмерный текущий радиус основания капли. Решая кубическое относительно ρ уравнение (2) с помощью формулы Кардано–Феррари [8], получим связь краевого динами-

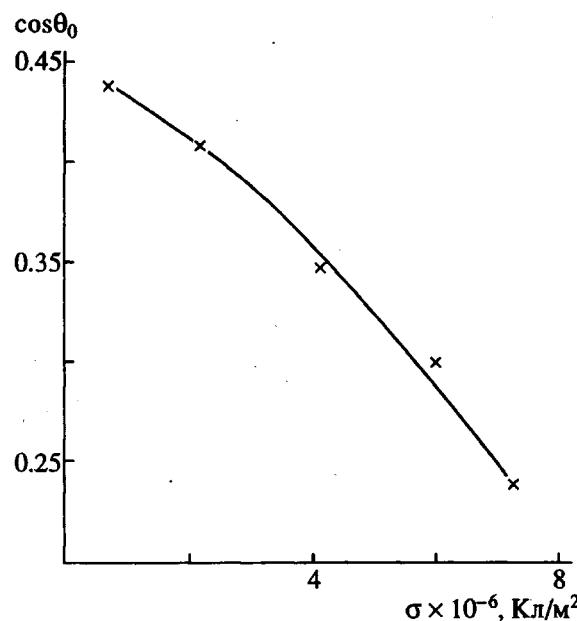


Рис. 1. Зависимость косинуса равновесного краевого угла капли глицерина от поверхностной плотности заряда пленки пентапласта.

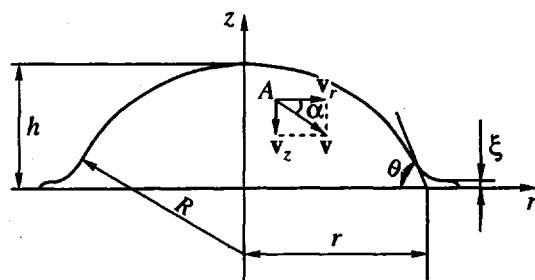


Рис. 2. Капля вязкой жидкости на поверхности твердого тела.

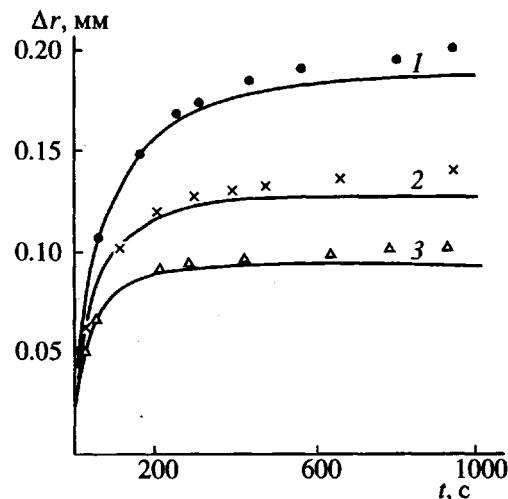


Рис. 3. Увеличение радиуса капель глицерина при растекании по поверхности поляризованных пленок из пентапласта в зависимости от времени: 1 – контрольный образец, 2 – $\sigma = 5.21 \times 10^{-6}$, 3 – $\sigma = 7.27 \times 10^{-6} \text{ Кл/м}^2$. Точки – эксперимент, кривые – расчет.

$$\theta(t) = 2 \operatorname{arctg} \left(\sqrt[3]{2\rho^{-3}} - \sqrt{1 + 4\rho^{-6}} + \sqrt[3]{2\rho^{-3} + \sqrt{1 + 4\rho^{-6}}} \right).$$

На рис. 2 показано направление течения жидкости в произвольно выбранной точке A внутри капли при растекании жидкости. Если принять, что угол α наклона линии течения пропорционален расстоянию от точки A до поверхности твердого тела, уравнение силы внутреннего трения жидкости будет иметь вид [9]

$$df_2 = -\frac{2\pi r dr}{\cos \alpha} \eta \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\mathbf{v}}{\cos \alpha} \right), \quad (3)$$

где \mathbf{v} – вектор скорости течения жидкости в точке $A(r, z)$, η – вязкость жидкости. Для несжимаемой жидкости, плотность которой постоянна при течении, справедливо уравнение неразрывности [10]

$$\operatorname{div} \mathbf{v} = \frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0, \quad (4)$$

где v_r и v_z – составляющие вектора скорости \mathbf{v} в точке $A(r, z)$.

Интегрируем уравнение (3) с учетом выражения (4) и, пренебрегая кривизной поверхности жидкости на краю капли [9], приравниваем $f_1 = f_2$. Тогда уравнение радиуса капли в зависимости от времени

$$dt = \frac{\eta}{\Delta W} \left(\frac{R\theta}{\sin \theta} \right)^2 \frac{\operatorname{ctg} \theta}{\xi} \rho d\rho \quad (5)$$

(ξ – толщина клиновидного слоя жидкости на краю капли).

Интегрируя уравнение (5) и принимая во внимание формулы (1) и (2), получим зависимость увеличения радиуса Δr капли от времени с учетом влияния заряда электрета на процесс растекания капли. Интегрирование дифференциального уравнения (5) осуществляли на ЭВМ IBM PC численным методом с автоматическим изменением шага интегрирования (метод Рунге–Кутта–Мерсона) [11]. Величины W_{12} и η для глицерина взяты из работы [12].

Сравнение расчетных кривых с полученными экспериментальными данными (рис. 3) свидетельствует о том, что модель хорошо описывает растекание капли вязкой жидкости по поверхности электретных полимерных пленок на начальном этапе растекания.

Таким образом, предложенная модель позволяет учитывать влияние заряда электрета на кинетические характеристики растекания жидкости по поверхности электретной полимерной пленки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сумм Б.Д., Горюнов Ю.В. Физико-химические основы смачивания и растекания. М.: Химия, 1976.
2. Адамсон А. Физическая химия поверхностей. М.: Мир, 1979.
3. Зимон А.Д. Адгезия жидкости и смачивание. М.: Химия, 1974.
4. Лущейкин Г.А. Методы исследования электрических свойств полимеров. М.: Химия, 1988.
5. Вертячих И.М., Гольдаде В.А., Неверов А.С., Пинчук Л.С. // Высокомолек. соед. Б. 1982. Т. 24. № 9. С. 683.
6. Вавкушевский А.А., Ароланов В.В., Степаненко В.Ю., Огарев В.В. // Коллоид. журн. 1989. Т. 51. № 3. С. 439.
7. Райд Э.А., Сумм Б.Д., Щукин Е.Д. // Докл. АН СССР. 1972. Т. 205. № 5. С. 1134.
8. Фильчаков П.В. Справочник по высшей математике. Киев: Наукова думка, 1973.
9. Вавкушевский А.А., Ароланов В.В., Огарев В.А. // Коллоид. журн. 1984. Т. 46. № 6. С. 1076.
10. Ландау Л.Д., Лившиц Е.М. Теоретическая физика. Гидродинамика. М.: Наука, 1988. Т. 6.
11. Хемминг Р.В. Численные методы. М.: Наука, 1972.
12. Химическая энциклопедия. М.: Советская энциклопедия, 1988. Т. 1.

Effect of the Charge of a Polymeric Electret on the Spreading of Liquids**V. G. Plevachuk, I. M. Vertyachikh, V. A. Gol'dade, and L. S. Pinchuk**

Abstract – The spreading of diethylene glycol and glycerol on the surface of electret films of pentoplast was studied. The data on the velocity of spreading of a liquid drop and the contact angle are presented for various values of the surface charge of electret films. A mathematical model is proposed that describes the effect of polarization charge on the kinetics of liquid spreading on the surface of polymeric electrets.