

УДК 541(64+49):532.73

## КОМПЛЕКСЫ ФУЛЛЕРЕНА $C_{60}$ С ПОЛИФЕНИЛЕНОКСИДОМ И ПОЛИ-Н-ВИНИЛПИРРОЛИДОНОМ В РАСТВОРАХ<sup>1</sup>

© 2002 г. Н. П. Евлампиева\*, П. Н. Лавренко\*\*, И. И. Зайцева\*,  
Е. Ю. Меленевская\*\*, Ю. Ф. Бирюлин\*\*\*, Л. В. Виноградова\*\*,  
Е. И. Рюмцев\*, В. Н. Згонник\*\*

\*Научно-исследовательский институт физики Санкт-Петербургского государственного университета  
198504 Санкт-Петербург, Ульяновская ул., 1

\*\*Институт высокомолекулярных соединений Российской академии наук  
199004 Санкт-Петербург, Большой пр., 31

\*\*\*Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук  
194021 Санкт-Петербург, Политехническая ул., 26

Поступила в редакцию 30.07.2001 г.  
Принята в печать 18.10.2001 г.

Путем сравнительного исследования гидродинамических и электрооптических свойств растворов комплексов донорно-акцепторного типа, которые фуллерен  $C_{60}$  образует с поли-2,6-диметил-1,4-фениленоксидом и поли-N-винилпирролидоном, и исходных полимеров установлено, что даже незначительное содержание  $C_{60}$  (от 0.5% до нескольких процентов) в составе комплекса оказывает заметное влияние на молекулярные параметры полимеров. Для комплексов, в составе которых на молекулу фуллерена приходится не более одной молекулы полимера, показано, что их эффективные гидродинамические размеры в растворе увеличены, тогда как асимметрия их формы уменьшена в сравнении с молекулами исходных полимеров.

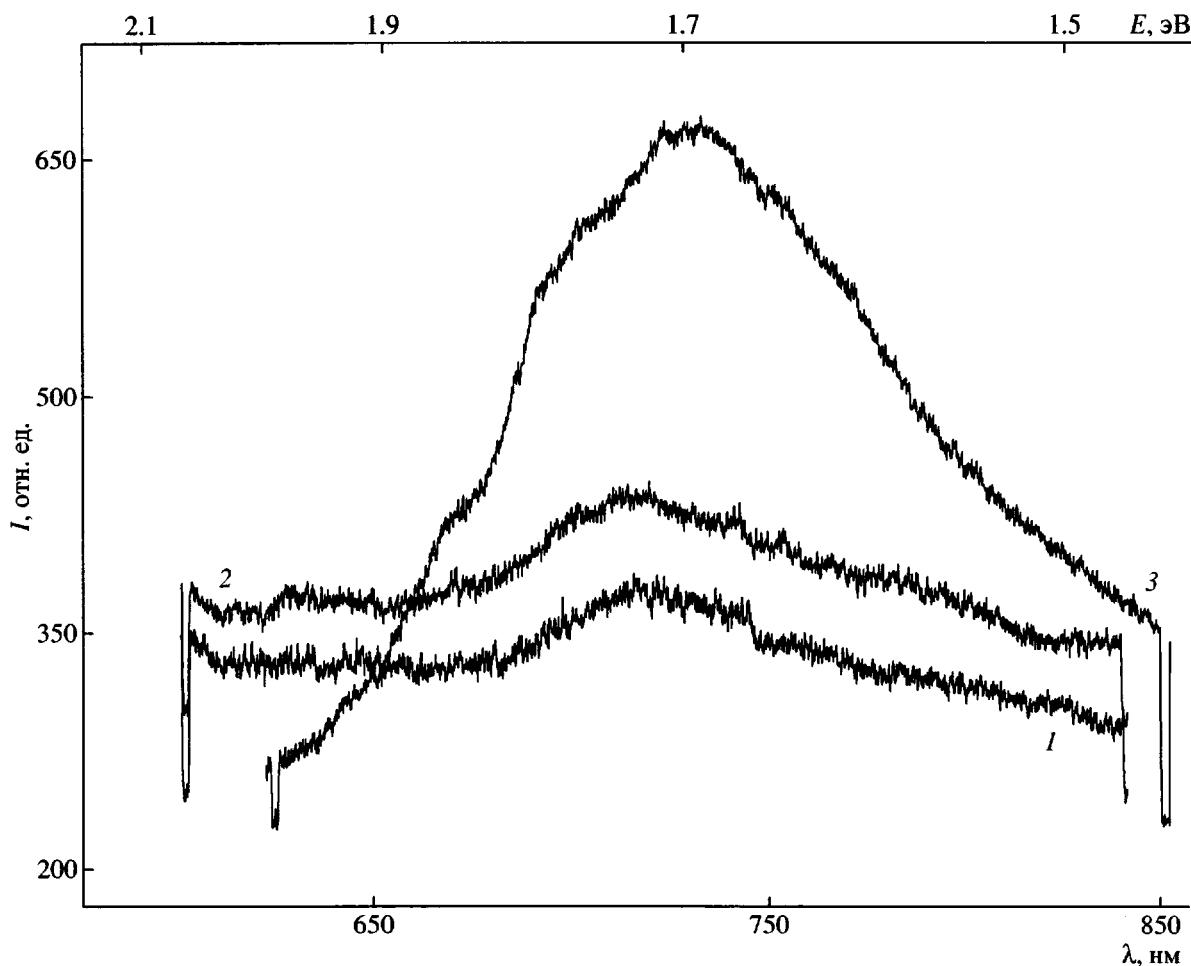
Фуллерен  $C_{60}$  обладает способностью образовывать комплексы донорно-акцепторного типа с различными соединениями, содержащими сопряженные связи [1]. К числу таких соединений относятся цикло- и гетероцикличесодержащие полимеры. Сообщения о синтезе соответствующих комплексов с фуллереном  $C_{60}$ , наряду с многочисленными сообщениями о комплексах этого фуллерена с низкомолекулярными веществами [1–4], появились в литературе в последние годы [5–7]. Отчасти это обусловлено поиском водорастворимых производных фуллеренов в связи с повышенным интересом к биологическим аспектам их применения [8]. В этом отношении полимерные донорно-акцепторные комплексы фуллеренов являются

ся весьма перспективными объектами, поскольку координационное связывание в значительно большей степени, чем ковалентное, способствует сохранению уникальных физических свойств фуллерена. Кроме того, для многих практических целей полимерный комплекс может служить матрицей, способной к удерживанию фуллерена в растворенном состоянии в средах, в которых он нерастворим (например, в воде), и выделению его в необходимых количествах в условиях специального, разрушающего комплекса воздействия.

Большинство имеющихся в литературе сообщений о полимерных комплексах фуллерена  $C_{60}$  ограничиваются лишь описанием синтеза и подтверждением состава новых соединений. Данные о молекулярных и физических свойствах полимерных комплексов с фуллеренами пока еще малочисленны и не систематизированы. Цель настоящей работы – исследование молекулярных свойств комплексов  $C_{60}$  с двумя различными циклосодержащими полимерами – поли-2,6-диметил-

<sup>1</sup> Работа выполнена при финансовой поддержке Российской исследовательской программы “Фуллерены и атомные кластеры” (проект 98076) и Федеральной программы “Интеграция” (проект 326.38).

E-mail: vevlam@paloma.spbu.ru (Евлампиева Наталья Петровна).



**Рис. 1.** Спектры фотолюминесценции пленок полимерных комплексов  $C_{60}$ -ПФО-1 (1) и  $C_{60}$ -ПФО-2 (2), полученных при 300 К, в сравнении со спектром фуллерена  $C_{60}$  в толуоле (3) при 300 К.

1,4-фениленоксидом (**ПФО**) и поли-N-винилпиролидоном (**ПВП**). С помощью традиционно используемых для оценки размеров, формы, подвижности макромолекул в растворах методов поступательной диффузии, скоростной седиментации, вискозиметрии, а также метода электрооптического эффекта Керра были установлены особенности влияния фуллерена на молекулярные характеристики исходных полимеров при образовании соответствующих комплексов.

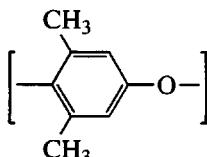
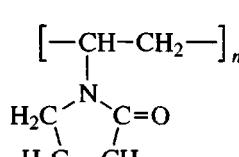
#### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Комpleксы  $C_{60}$ -ПФО при вариации ММ исходных полимеров и  $C_{60}$ -ПВП были получены путем испарения в вакууме смеси растворов  $C_{60}$  в толуоле и полимеров в хлороформе, как описано в работах [5, 9]. Данные методов УФ-спектроскопии, ЯМР  $^{13}\text{C}$  и ЯМР  $^1\text{H}$ , подтверждающие образование комплекса  $C_{60}$  с ПВП, приготовленного тем же

способом, что и в настоящей работе, были опубликованы ранее [5]. Изменение спектра фотолюминесценции пленок комплексов  $C_{60}$ -ПФО-1 и  $C_{60}$ -ПФО-2 с характерным смещением максимума спектра  $C_{60}$  [10] при вступлении его в соединение донорно-акцепторного типа, в отличие от ковалентно связанного  $C_{60}$  [11], приведено на рис. 1.

Данные о степени полимеризации исходных образцов полимеров и соотношение между числом молекул фуллерена и полимера в составе исследованных комплексов приведены в табл. 1. Для ПВП было невозможно получить соотношение 1 : 1 между числом молекул фуллерена и полимера в комплексе, выделяемом из смешанного раствора при использованном способе получения. Приведенное в табл. 1 мольное соотношение для комплексов  $C_{60}$ -ПВП было максимально возможным.

**Таблица 1.** Химическая формула повторяющегося звена, степень полимеризации  $n$  исходных полимеров ПФО и ПВП и состав их комплексов с фуллереном  $C_{60}$

Структура мономерного звена	Исходный полимер	$n$	Комплекс	Состав комплекса
 $\left[ \text{---} \begin{array}{c} \text{CH}_3 \\   \\ \text{---} \end{array} \text{---} \text{C}_6\text{H}_3\text{---} \text{O---} \right]_n$	ПФО-1	530	$C_{60}\text{-PFO-1}$	1 : 1
	ПФО-2	1500	$C_{60}\text{-PFO-2}$	1 : 1
 $\left[ \text{---} \begin{array}{c} \text{---} \text{CH---CH}_2 \text{---} \\   \\ \text{H}_2\text{C---} \text{N---} \text{C=O} \\   \\ \text{H}_2\text{C---CH}_2 \end{array} \right]_n$	ПВП-1	100	$C_{60}\text{-PVP-1}$	1 : 6
	ПВП-2	110	$C_{60}\text{-PVP-2}$	1 : 6

Электрооптические и гидродинамические свойства образцов ПФО и  $C_{60}$ -ПФО были исследованы в растворах в бензоле. Образцы ПВП и  $C_{60}$ -ПВП изучали в двух растворителях: поступательная диффузия и вязкостные характеристики ПВП-1 и его комплекса с  $C_{60}$  определяли в воде, электрооптические и вязкостные характеристики ПВП-2 и его комплекса – в хлороформе.

Электрооптический эффект Керра в растворах исходных полимеров и их комплексов исследовали в импульсном электрическом поле при длительности прямоугольного импульса 1 мс при напряжении, подаваемом на ячейку Керра, до 1 кВ. Для измерений использовали стеклянную ячейку с плоскопараллельными титановыми электродами длиной 2 см и зазором между ними 0.05 см. ДЛП раствора полимера, возникающего под действием электрического поля, регистрировали фотоэлектрическим способом с применением низкочастотной модуляции эллиптической поляризации света, согласно компенсационной методике, описанной в работе [12]. В качестве источника света использовали Не-Не-лазер ( $\lambda = 6328 \times 10^{-8}$  см), компенсатором служила тонкая слюдяная пластина с собственной разностью фаз  $0.01 \times 2\pi$ . Равновесные электрооптические свойства полимеров характеризовали величиной удельной постоянной Керра  $K$ , определяемой как

$$K = \lim_{\substack{E \rightarrow 0 \\ c \rightarrow 0}} [(\Delta n - \Delta n_0)/E^2 c] \quad (1)$$

Здесь  $\Delta n$  и  $\Delta n_0$  – разность между величиной ДЛП, возникающего под действием электрического поля в растворе исследуемого вещества и в растворителе соответственно,  $E$  – величина напряжен-

ности электрического поля,  $c$  – концентрация растворенного вещества.

Рисунок 2 демонстрирует типичные экспериментальные зависимости величины ДЛП  $\Delta n$  от квадрата напряженности электрического поля  $E^2$  для растворов ПФО-1 в бензоле и ПВП-2 в хлороформе. Как видно, электрооптический эффект в растворах исходных полимеров отличается по знаку: ПФО характеризуется положительным знаком эффекта Керра, а ПВП – отрицательным. Малая величина собственного (за вычетом вклада растворителя) эффекта исследованных полимерных образцов превосходила величину экспериментальной погрешности измерения, которая составляла ~10% от измеряемого ДЛП в выбранном концентрационном интервале растворов (рис. 2, прямые 1 и 2).

Характеристические вязкости  $[\eta]$  образцов полимеров и их комплексов с  $C_{60}$  определяли из концентрационных зависимостей по Хаггинсу [13]

$$\eta_{\text{уд}}/c = [\eta] + k'[\eta]^2 c, \quad (2)$$

где  $\eta_{\text{уд}} = (\eta - \eta_0)/\eta_0 \equiv (t - t_0)/t_0$ ,  $\eta$  и  $\eta_0$  – вязкость раствора и растворителя соответственно,  $t$  и  $t_0$  – время истечения раствора и растворителя в вискозиметре типа Оствальда,  $k'$  – постоянная Хаггинса [13]. Для измерений использовали вискозиметры со временем истечения бензола 104.0 с, хлороформа 64.8 с и воды 90.2 с при 25°C. На рис. 3 представлены концентрационные зависимости величины  $\eta_{\text{уд}}/c$  для исследованных образцов ПФО-1 и  $C_{60}$ -ПФО-1 в бензоле, а также ПВП-2 и  $C_{60}$ -ПВП-2 в хлороформе. Экспериментально определенные значения  $[\eta]$  исследованных образцов приведены в табл. 2.

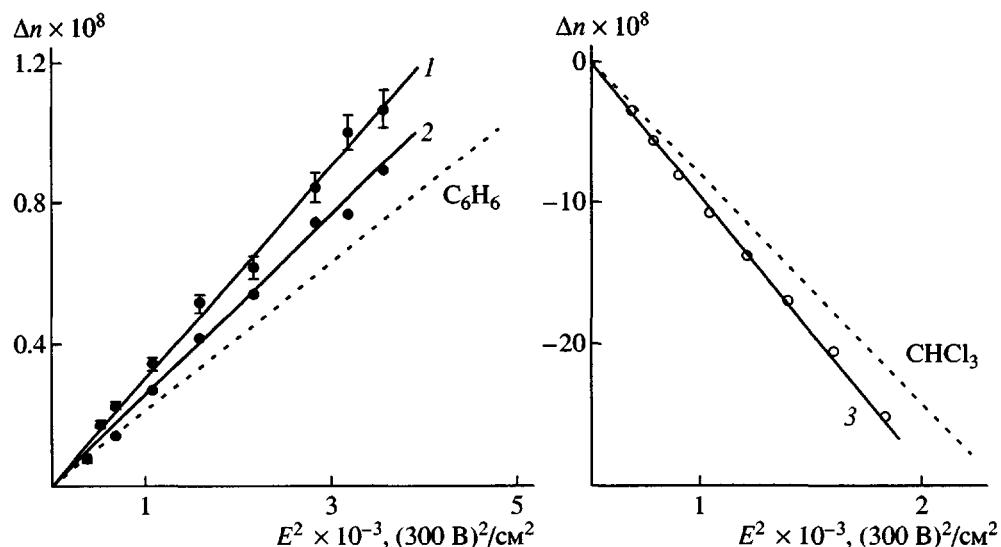


Рис. 2. Типичные зависимости величины ДЛП  $\Delta n$  от квадрата напряженности электрического поля  $E^2$  для ПФО-1 в бензole при концентрациях растворов  $4.685$  (1) и  $1.873 \times 10^{-2}$  г/см $^3$  (2) и для ПВП-2 в хлороформе при концентрации  $1.495 \times 10^{-2}$  г/см $^3$  (3); штриховые прямые относятся к растворителям.

Поступательную диффузию изучали традиционным методом образования границы между раствором полимера и растворителем в диффузометре конструкции Цветкова при  $25^\circ\text{C}$  [13]. Использовали обычный алгоритм расчета коэффициентов диффузии  $D$  по расплыванию диффузионной границы со временем [13, 14]. На рис. 4 представлены экспериментальные зависимости удвоенной дисперсии  $2\sigma^2$  диффузионных кривых от продолжительности опыта для растворов ПВП-1 и C<sub>60</sub>-ПВП-1 в воде, по наклону которых вычисляли коэффициенты диффузии  $D = (1/2)(d\sigma^2/dt)$ . Полученные значения  $D$  экстраполировали к нулевой концентрации растворов для определения величин  $D_0 = \lim_{c \rightarrow 0} D$ , которые приведены в табл. 2.

Скоростную седиментацию изучали в аналитической ультракентрифуге МОМ 3180 (Венгрия) в двухсекторной кювете при частоте вращения ротора  $n = 50 \times 10^3$  об/мин. Подробное описание методики регистрации седиментационной границы, как и описание метода измерения поступательной диффузии, содержатся в работах [13, 14]. Коэффициенты седиментации  $S$  рассчитывали по смещению концентрационной границы во времени. Полученные значения  $S$  также экстраполировали к нулевой концентрации, определяя  $S_0 = \lim_{c \rightarrow 0} S$ .

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Электрооптический эффект Керра в растворах полимеров является весьма чувствительным

методом к любым изменениям внутримолекулярных взаимодействий в макромолекулярных цепях [12]. Величина двойного лучепреломления, возникающего в растворе полимера под действием внешнего электрического поля, непосредственно зависит от дипольного момента макромолекул, их поляризуемости и, следовательно, от конформации и

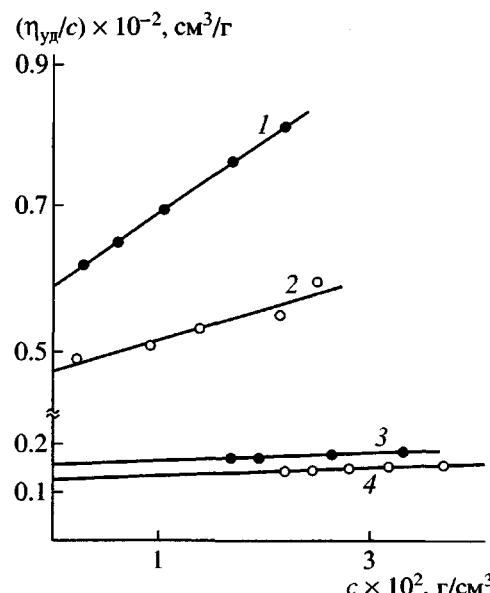


Рис. 3. Концентрационная зависимость удельной вязкости  $\eta_{\text{уд}}/c$  для ПФО-1 (1), его комплекса с C<sub>60</sub> (2) в бензole, для образцов ПВП-2 (3) и C<sub>60</sub>-ПВП-2 (4) в хлороформе.

**Таблица 2.** Характеристическая вязкость  $[\eta]$ , коэффициенты диффузии  $D_0$  и седиментации  $S_0$ , молекулярная масса  $M$ , инкремент показателя преломления  $dn/dc$ , значения эффективного гидродинамического объема  $V$  и функции асимметрии формы эквивалентного сфероида  $f(p)$  молекул исходных образцов полимеров и их комплексов с фуллереном  $C_{60}$  в растворах при 25°C

Образец	Раство- ритель	$[\eta]$ , см <sup>3</sup> /г	$D_0 \times 10^7$ , см <sup>2</sup> /с	$S_0 \times 10^{13}$ , с	$M^* \times 10^{-3}$	$dn/dc$ , см <sup>3</sup> /г	$V \times 10^{20}$ , см <sup>3</sup>	$f(p)$
ПФО-1	Бензол	$59 \pm 1$	$6.1 \pm 0.5$	—	$30 \pm 5$	0.1	88	3.3
$C_{60}$ -ПФО-1		$47 \pm 2$	$6.0 \pm 0.4$	—	$37 \pm 5$	0.09	93	3.1
ПФО-2	Бензол	$99 \pm 2$	$3.0 \pm 0.3$	$4.0 \pm 0.1$	$140 \pm 40$	0.1	720	3.2
$C_{60}$ -ПФО-2		$86 \pm 1$	$2.5 \pm 0.5$	$3.8 \pm 0.2$	$160 \pm 20$	0.09	1250	2.0
ПВП-1	$H_2O$	$12 \pm 1$	$8.9 \pm 0.5$	—	$12 \pm 2$	0.16	6.0	4.0
$C_{60}$ -ПВП-1		$9.5 \pm 0.5$	$8.1 \pm 0.5$	—	$12 \pm 2$	0.15	8.0	2.4
ПВП-2	$CHCl_3$	$15 \pm 1$	—	—	12	—	—	—
$C_{60}$ -ПВП-2		$12.5 \pm 0.8$	—	—	—	—	—	—

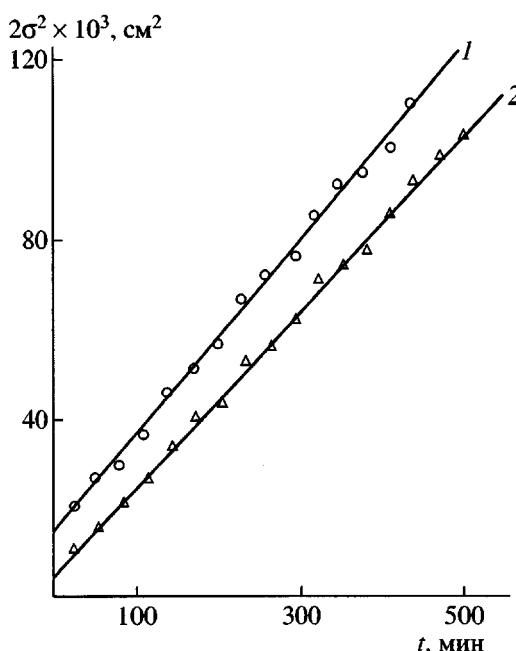
\*  $M$  образцов ПФО-2 и  $C_{60}$ -ПФО-2 рассчитаны из уравнения Сведберга [13]  $M_{SD} = [RT/(1 - \nu\rho_0)](S_0/D_0)$  при значении фактора плавучести  $(1 - \nu\rho_0) = 0.24$  [9];  $M$  образцов ПФО-1,  $C_{60}$ -ПФО-1, ПВП-1 и  $C_{60}$ -ПВП-1 вычислены, согласно соотношению  $M_{D\eta} = (A_0 T / \eta_0 D)^{3/2} / [\eta]$  [13] при значении гидродинамического инварианта  $A_0 = 3.2 \times 10^{-10}$  г см<sup>2</sup>/град моль<sup>1/3</sup>;  $M$  образца ПВП-2 — характеристика фирмы-производителя "Serva".

гибкости цепей макромолекул. Образование молекулами полимера комплексов с небольшим числом молекул  $C_{60}$ , когда массовая доля полимера в комплексе является преобладающей (что верно для исследуемых комплексов, как это следует из табл. 1), также можно рассматривать как фактор, изменя-

ющий характер внутримолекулярных взаимодействий в ПФО и ПВП. Поэтому изменение электрооптических свойств комплексов  $C_{60}$ -ПВП и  $C_{60}$ -ПФО в сравнении с исходными полимерами было ожидаемым результатом, но то, что эти изменения будут сходными для столь разных по своей структуре и электрооптическим свойствам полимерных объектов, оказалось неожиданным явлением.

На рис. 5 показаны концентрационные зависимости постоянной Керра  $K$ , полученные для комплексов и для исходных полимерных образцов. Как видно, и для ПФО, и для ПВП координационное включение  $C_{60}$  в их состав приводит к снижению абсолютной величины электрооптической постоянной. Близкие значения  $K$  для комплексов  $C_{60}$  с образцами ПФО существенно разной ММ, но при равном соотношении молекул фуллерена и полимера в комплексе (табл. 1), могут свидетельствовать о том, что  $C_{60}$  взаимодействует с определенным числом мономерных звеньев ПФО, поскольку электрооптические свойства исходных ПФО-1 и ПФО-2 идентичны.

С чем конкретно связано снижение величины  $K$  для полимерных комплексов, только из данных по равновесному эффекту Керра сказать однозначно невозможно. Вероятнее всего, это обусловлено изменением степени свободы ориентации мономерных звеньев гибкоцепных ПФО и ПВП при комплексообразовании с  $C_{60}$ . Но заметного изменения во временах нарастания и спада эффекта при включении и выключении электрического



**Рис. 4.** Зависимости удвоенной величины дисперсии  $2\sigma^2$  диффузионной границы от продолжительности опыта  $t$  для растворов ПВП-1 (1) и  $C_{60}$ -ПВП-1 (2) в воде при  $c = 0.08 \times 10^{-2}$  г/см<sup>3</sup>.

поля мы не наблюдали даже для самого высокомолекулярного образца C<sub>60</sub>-ПФО-2 в сравнении с ПФО-2, что, впрочем, не удивительно, поскольку массовая доля фуллерена в этом комплексе слишком мала (~0.5% от массы полимера в комплексе), чтобы зафиксировать такое влияние. Также вероятно, что координационное взаимодействие C<sub>60</sub> с отдельными группами полимерной молекулы изменяет их полярность и оптическую анизотропию, что может проявляться в снижении суммарной величины эффекта Керра в растворах комплексов. Оба указанных фактора взаимозависимы при наблюдении оптической анизотропии раствора, вызванной ориентацией макромолекул под действием электрического поля. Поэтому мы предприняли исследование гидродинамических характеристик молекул полимерных комплексов с целью определения изменений их размеров и формы в сравнении с исходными полимерами.

Изучение поступательной диффузии показало, что гидродинамические размеры диффундирующих частиц увеличиваются при вступлении ПФО и ПВП в комплекс с C<sub>60</sub>. В табл. 2 приведены данные по изменению объема эквивалентных сфер V, моделирующих макромолекулярные клубки в растворе. Величину V рассчитывали с использованием экспериментальных значений коэффициентов диффузии D<sub>0</sub>, согласно соотношению Стокса–Эйнштейна для расчета диаметра эквивалентных гидродинамических сфер  $a = kT/3\pi\eta_0D_0$ , принимая  $V = \pi a^3/6$ .

Сравнительный диффузионно-седиментационный анализ растворов ПФО-2 и C<sub>60</sub>-ПФО-2 в бензоле, проделанный работе [9], показал, что значительного изменения молекулярной массы M и трансляционной подвижности комплекса молекулы ПФО с одной молекулой фуллерена для этого полимера не наблюдается. Этот вывод подтверждают проведенные и в данной работе исследования диффузии растворов ПФО-1, ПФО-2, ПВП-1 и их комплексов с C<sub>60</sub> (табл. 2, значения D<sub>0</sub>, S<sub>0</sub> и M), что однозначно указывает на отсутствие больших агрегатов в растворах полимерных комплексов и свидетельствует о том, что для ПВП, как и для ПФО, характерно вступление в комплекс с C<sub>60</sub> не более одной молекулы полимера при использовании способа приготовления комплексов. Несмотря на близость полученных гидродинамических характеристик для всех исследованных пар исходный полимер–полимерный комплекс, приведенных в табл. 2, методы диффузии и седиментации однозначно фиксируют тенденцию к росту гидродинамических разме-

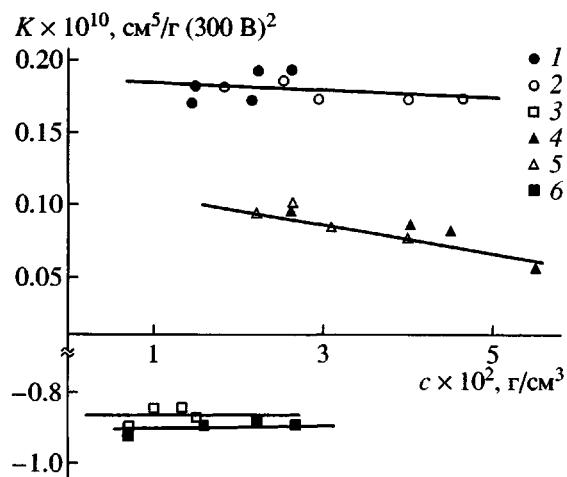


Рис. 5. Концентрационные зависимости удельной постоянной Керра K для исходных полимеров, ПФО-2 (1) и ПФО-1 (2) в бензоле, ПВП-2 в хлороформе (3), а также их комплексов с C<sub>60</sub> в тех же растворителях (4–6 соответственно).

ров макромолекул комплексов ПВП и ПФО с C<sub>60</sub> в сравнении с исходными полимерами.

Различие в молекулярных свойствах ПФО, ПВП и их комплексов с фуллереном выявили и вискозиметрические измерения. При том, что эффективный размер комплекса V увеличивается в сравнении с молекулой исходного образца полимера, характеристическая вязкость  $[\eta]$  полимерных комплексов с C<sub>60</sub> демонстрирует обратную тенденцию (см. соответствующий столбец в табл. 2). Хорошо известно, что характеристическая вязкость зависит от вращательной подвижности частиц и непосредственно связана с их формой. Поэтому, исходя из общего соотношения для величины  $[\eta]$  сплошных недеформируемых сфероидальных частиц с асимметрией формы эквивалентного сфероида  $p$  ( $p$  есть отношение длины продольной и поперечной осей сфероида)  $[\eta] = N_A V f(p)/M$  ( $N_A$  – число Авогадро,  $f(p)$  – функция асимметрии формы сфероида [13]), можно заключить, что исходные полимеры и их комплексы с фуллереном различаются асимметрией формы в растворе. При этом полимерные комплексы, очевидно, более симметричны по форме, поскольку для C<sub>60</sub>-ПФО и C<sub>60</sub>-ПВП величина  $f(p)$  уменьшается в сравнении с исходными образцами ПФО и ПВП (последний столбец в табл. 2). Такой результат качественно объясняет наблюдаемое экспериментально снижение абсолютной величины электрооптического эффекта в растворах полимерных комплексов, поскольку более симметричное распределение элементов цепей должно приводить к снижению

суммарной оптической анизотропии и полярности макромолекулярного клубка.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Конарев Д.В., Любовская Р. Н. // Успехи химии. 1999. Т. 68. № 1. С. 23.
2. Masin F., Grell A.-S., Messari I., Gusman G. // Solid State Commun. 1998. V. 106. № 1. P. 59.
3. Du Ch., Li Yu., Wang Sh., Shi Zh., Xiao Sh., Zhu D. // Synt. Met. 2001. V. 124. № 2/3. P. 287.
4. Biryulin Yu. F., Yevlampieva N.P., Melenevskaya E.Yu., Bocharov V.N., Zgonnik V.N., Rjumtsev E. I. // Techn. Phys. Lett. 2000. V. 26. № 8. P. 662.
5. Виноградова Л.В., Меленевская Е.Ю., Хачатуров А.С., Кевер Е.Е., Литвинова Л.С., Новокрещенова А.В., Сушко М.А., Кленин С.И., Згонник В.Н. // Высокомолек. соед. А. 1998. Т. 40. № 11. С. 1854.
6. Torok G., Lebedev V.T., Cser L., Zgonnik V.N., Vinogradova L.V., Melenevskaya E.Yu., Orlova D. N., Evmenenko G.A., Sibilev A.I., Budtov V.P. // Book of Abstrs 4 Biennal Int. Workshop "Fullerenes and Atomic Clusters". St. Petersburg, 1999. P. 59.
7. Hawker C. J., Wooley K.L. // J. Chem. Soc., Chem. Commun. 1994. P. 925.
8. Tsuchiya T., Oguri I., Yamakoshi Y.N., Miyata N. // Fullerene Sci. and Technol. 1996. V. 4. № 5. P. 989.
9. Лавренко П.Н., Евлампиева Н.П., Волохова Д.М., Виноградова Л.В., Меленевская Е.Ю., Згонник В.Н. // Высокомолек. соед. А. 2002. Т. 44. № 2. С. 289.
10. Friedman B., Harigaya K. // Phys. Rev. B. 1993. V. 47. P. 3975.
11. Aleshin A.N., Biruylin Yu. F., Mironkov N.B., Sharanova L.V., Fadeeva E.N., Zgonnik V.N. // Fullerene Sci. and Technol. 1998. V. 6. № 3. P. 545.
12. Цветков В.Н. Жесткоцепные полимерные молекулы. Л.: Наука, 1986.
13. Цветков В.Н., Эскин В.Е., Френкель С.Я. Структура макромолекул в растворах. М.: Наука, 1964.
14. Нефедов П.П., Лавренко П.Н. Транспортные методы в аналитической химии полимеров. Л.: Химия, 1979.

### Fullerene C<sub>60</sub> Complexes with Poly(phenylene oxide) and Poly(N-vinylpyrrolidone) in Solutions

N. P. Evlampieva\*, P. N. Lavrenko\*\*, I. I. Zaitseva\*, E. Yu. Melenevskaya\*\*,  
Yu. F. Biryulin\*\*\*, L. V. Vinogradova\*\*, E. I. Ryumtsev\*, and V. N. Zgonnik\*\*

\*Research Institute of Physics, St. Petersburg State University,  
ul. Ul'yanovskaya 1, Petrodvorets, 198504 Russia

\*\*Institute of Macromolecular Compounds, Russian Academy of Sciences,  
Bol'shoi pr. 31, St. Petersburg, 199004 Russia

\*\*\*Ioffe Physicotechnical Institute, Russian Academy of Sciences,  
Politekhnicheskaya ul. 26, St. Petersburg, 194021 Russia

**Abstract**—A comparative study of hydrodynamic and electrooptical properties of solutions of donor–acceptor complexes formed between C<sub>60</sub> and poly(2,6-dimethyl-1,4-phenylene oxide) and poly(N-vinylpyrrolidone) with those of the individual polymers showed that even insignificant amount of C<sub>60</sub> (from 0.5% to several percent) incorporated into the complex shows a strong effect on the molecular parameters of polymers. It was demonstrated that for complexes containing no more than one polymer molecule per fullerene molecule, the effective hydrodynamic sizes in solution are increased, whereas their shape asymmetry is reduced compared to the molecules of original polymers.