

Особенности взаимодействия в растворах полистирола и фуллерена C₇₀

У.К. Махманов^{1*}, Х. Jiang², Б.А. Аслонов¹, Э.А. Турсункулов¹

¹Институт ионно-плазменных и лазерных технологий Академии наук Республики Узбекистан,
ул. Дурмон йули, 33, Ташкент, Узбекистан

²Нанкинский университет науки и технологии, Международная китайско-белорусская научная лаборатория
по вакуумно-плазменным технологиям, ул. Сяолинвэй, 200, Нанкин, Китайская Народная Республика

АННОТАЦИЯ

Добавление нанонаполнителей в полистирольные полимеры приводит к созданию материалов с новыми уникальными характеристиками для широкого применения. В данной работе физические процессы, происходящие в бензольных растворах полистирола (ПС) и фуллерена C₇₀ при различных соотношениях компонентов, исследовались с использованием методов рефрактометрии, ареометрии, инфракрасной и Рамановской спектроскопии. Экспериментально установлено, что межмолекулярные взаимодействия между ПС и C₇₀ в растворе имеют физическую природу (электростатические и силы Ван-дер-Ваальса). Оценку взаимодействия ПС-C₇₀ проводили в присутствии (в растворе) и отсутствии (на поверхности подложки) бензола. Полученные научные результаты представляют значительный интерес для углубленного понимания механизмов самосборки в многокомпонентных системах и открывают новые перспективы для разработки нанокompозитных материалов, применяемых в различных направлениях нанотехнологий.

Ключевые слова: фуллерен C₇₀, полимер полистирол, бензольный раствор, агрегация, нанокластер, пленка полимер/фуллерен, стабильность, показатель преломления.

1. Введение

Полимерные материалы приобретают все большее значение в современных технологических процессах [1] благодаря своей легкости, прозрачности и гибкости, а также простоте и дешевизне их производства и переработки. По сравнению со сталью, цветными металлами и керамикой полимеры не только более экономичны, но и обладают рядом преимуществ по некоторым физико-химическим свойствам [2]. Возможность управления оптическими свойствами полимеров (например, показателем преломления света) обеспечивает их широкое применение в оптических приборах, линзах и защитных покрытиях [3]. Важно отметить, что создание полимерных нанокompозитов с контролируемой структурой и свойствами является одним из приоритетных направлений современного матери-

ловедения. Применение полимеров в областях оптических технологий, лазерной физики и спектроскопии предъявляет высокие требования к их показателю преломления, светопропусканию и дисперсионным характеристикам [4]. Особенно важно, что стабильность показателя преломления полимерных материалов, используемых в различных условиях, а также возможность его регулирования являются одними из ключевых факторов, определяющих эффективность оптических устройств. Обогащение полимеров углеродными наночастицами, в частности фуллеренами, значительно улучшает их физико-химические и эксплуатационные свойства. Поскольку даже при добавлении небольшого количества таких частиц в полимерную матрицу, наблюдается существенное повышение механических, оптических, электрических и других характеристик материалов. Введение углеродных наночастиц в состав полимеров рассматривается как инновационный шаг на пути создания материалов нового поколения [5-6]. Первые исследования

**Ответственный автор*
E-mail: urolmakh@gmail.com

по введению фуллеренов в полимерную матрицу были начаты в 1990 г. после получения C_{60} в массовом количестве [7]. С тех пор исследование свойств композиционных материалов на основе фуллеренов и полимеров стало одним из важных направлений химии и физики фуллеренов. Эти материалы в основном классифицируются по их свойствам электропроводности. Однако широкое применение оптической спектроскопии для изучения свойств органических и неорганических материалов, в частности, рефракционных характеристик наноструктур, способствовало формированию этого направления как самостоятельной области научных исследований. Кроме того, благодаря способности фуллеренов и других наночастиц оказывать значительное влияние на свойства полимерных материалов, процессы их интеграции с полимерами могут осуществляться различными методами. Например, предполагается, что наличие бензольных колец в полистироле способствует образованию сильного взаимодействия с молекулами фуллерена на уровне π -электронов [8-10]. Одним из первых полимеров, модифицированных фуллеренами, является именно полистирол (ПС), для которого было установлено наличие способности макромолекул взаимодействовать с C_{60} . Однако с научной и технологической точек зрения структура и физические свойства полимеров, модифицированных фуллереном C_{70} , изучены недостаточно.

В данной работе представлены результаты исследований физических процессов (межмолекулярные взаимодействия, агрегация), происходящих в растворе полистирола и фуллерена C_{70} в бензоле, с использованием методов рефрактометрии, инфракрасной и Рамановской спектроскопии, а также ареометрии. Проведен анализ наполнителя фуллереновых молекул в полимерной матрице.

2. Экспериментальная часть

В эксперименте использовались гранулы полимера марки GPPS 1551, соответствующие стандартам ASTM (чистота >99%, средняя молекулярная масса 200 000 г/моль), кристаллические порошки фуллерена C_{70} (чистота >99,8%) и растворитель бензол (чистота >99%). Реактивы фуллерен C_{70} и бензол были предоставлены производителем Sigma Aldrich (США), а полимер GPPS 1551 (далее по тексту ПС) – компанией Assalouyeh Petrochemical Company (Иран).

Для приготовления растворов с различной концентрацией на основе фуллерена C_{70} и полимера ПС предварительно на электронной весах отмеряли соответствующее количество порошка C_{70} и гранул полистирола и помещали в отдельные колбы. К ним добавляли определенное количество растворителя бензола. Полученные смеси в отдельных герметично закрытых колбах перемешивали при комнатной температуре в течение 3÷4 ч с использованием автоматической магнитной мешалки с частотой 2÷2,2 Гц до получения молекулярного раствора. Раствор фуллерена добавляли к раствору полимера ПС в определенной объемной доле и готовили смеси растворов с различной концентрацией фуллерена C_{70} :С = 4,17; 8,34; 12,51 и 16,68% (по массе). Выбранные концентрации соответствуют часто используемому в экспериментах диапазону (1-20%), а также представляют собой равномерные изменения с шагом 4,17%. Это позволяет поэтапно изучать динамику оптических, спектральных и структурных свойств системы.

Тонкие пленки на основе ПС и C_{70} , средней толщиной ~600 нм, были получены методом медленного испарения бензола из раствора ПС/ C_{70} /бензол, нанесенного на поверхность стеклянной подложки, при температуре 30 °С.

Все последующие измерения проводились при комнатной температуре ($T \approx 24 \pm 1$ °С). При этом подготовленные образцы (растворы и пленки) на определенных стадиях выдерживались в затемненной комнате при температуре 24 °С в термостате марки ТС-1/80 (Россия).

На рис. 1 изображен внешний вид растворов ПС/ C_{70} /бензол. С увеличением концентрации C_{70} можно наблюдать значительные изменения в растворе ПС/бензол. Цвет растворов становится темнее с увеличением содержания фуллерена C_{70} . Последнее означает, что с увеличением концентрации фуллерена в растворе усиливается его взаимодействие со световыми лучами (больше поглощение, увеличение интенсивности колебательных линий).

Измерения плотности проводились с помощью денситометра METTLER TOLEDO DENSITO 30PX (Япония).

Инфракрасные (ИК) спектры поглощения растворов были измерены с помощью ИК-спектрометра Фурье Cary 640 Series FTIR (Agilent Technologies) в диапазоне 500-4000 см^{-1} на оптическом элементе с окнами из кристаллов KBr толщиной 3 мм.



Рис. 1. Приготовленные растворы в бензольном растворителе: 1 – ПС/бензол; 2 – ПС/ C_{70} /бензол ($C_{70} \sim 4,17\%$); 3 – ПС/ C_{70} /бензол ($C_{70} \sim 8,34\%$); 4 – ПС/ C_{70} /бензол ($C_{70} \sim 12,51\%$); 5 – ПС/ C_{70} /бензол ($C_{70} \sim 16,68\%$); 6 – C_{70} /бензольный раствор.

Рамановские спектры растворов на основе полимера ПС и фуллерена C_{70} были измерены с использованием Раман-спектрометра InVia (Renishaw, Великобритания). В качестве источника энергии использовался лазер Cobolt CW 532 nm DPSS с длиной волны 532 нм.

Показатель преломления растворов определяли с помощью цифрового рефрактометра Atago PAL-BX/RI (погрешность измерения $<0,0001$).

3. Результаты и обсуждение

Исследование растворов смесей ПС/ C_{70} в бензоле с определением их плотности способствует более глубокому пониманию их физико-химических характеристик и позволяет определить потенциальные возможности их применения в будущем. В табл. 1 показаны изменения плотности растворов ПС/ C_{70} /бензол при различных концентрациях C_{70} . Следует отметить, что плотность раствора C_{70} /бензол составила $\sim 0,8726$ г/см³. Как видно из таблицы, увеличение доли фуллерена в растворе ПС/ C_{70} /бензол привело к изменениям его плотности. При низкой массовой доле C_{70} (4,17%) плотность раствора изначально уменьшалась по сравнению с раствором ПС/бензол.

Последнее может быть связано с диспергированием фуллерена или структурными изменениями в растворе. При массовых долях $C_{70} \sim 8,34\%$ и $\sim 12,51\%$ плотность раствора относительно увеличилась. Этот процесс можно объяснить распределением фуллерена в растворе ПС/бензол и проявлением взаимного взаимодействия. При доле $C_{70} \sim 16,68\%$ плотность раствора снизилась и стала ближе к плотности раствора ПС/бензол. Такая ситуация приводит к более плотному расположению молекул фуллерена C_{70} в цепях полимера ПС [11-12].

Таблица 1. Изменения плотности растворов ПС/ C_{70} /бензол. Температура измерения $\sim 24 \pm 0,1$ °C

Массовая доля C_{70} , %	Плотность (г/см ³)
0	0,8740
4,17	0,8727
8,34	0,8742
12,51	0,8746
16,68	0,8739

На рис. 2 показаны различия в инфракрасных (ИК) спектрах пропускания раствора ПС/ C_{70} /бензол при различных массовых долях компонентов. Эти спектры были получены в диапазоне 500-4000 см⁻¹, при этом линия поглощения бензола не вычиталась из линии поглощения раствора.

Исследование было проведено на свежеприготовленном растворе, в который добавляли различные количества раствора C_{70} /бензола к раствору ПС/бензола. Целью анализа полученных инфракрасных спектров было изучение взаимодействий между полимером ПС и фуллереном C_{70} , а также оценка изменений в колебательных частотах с увеличением концентрации фуллерена C_{70} .

C_{70} фуллерен относится к группе симметрии D_{5h} , и его 31 нормальное колебание ИК спектра классифицируются как $21E_1' + 10A_2''$ [13-15]. Основные колебательные частоты для раствора чистого C_{70} фуллерена в бензоле были зафиксированы на следующих значениях: 528 и 575 см⁻¹ – радиальные колебания, 674,41 см⁻¹ – колебания связи С-С, 708,63 см⁻¹ – колебания изгиба С-С связи, а также наблюдались колебания на частотах 797,44; 841; 905,82; 1138,44; 1173,30; 1200; 1284,2; 1428,26; 1456,23 и 1557 см⁻¹. Эти пики характерны для фуллерена C_{70} и служат основой для сравнения ИК спектров растворов ПС/ C_{70} /бензол (рис. 2).

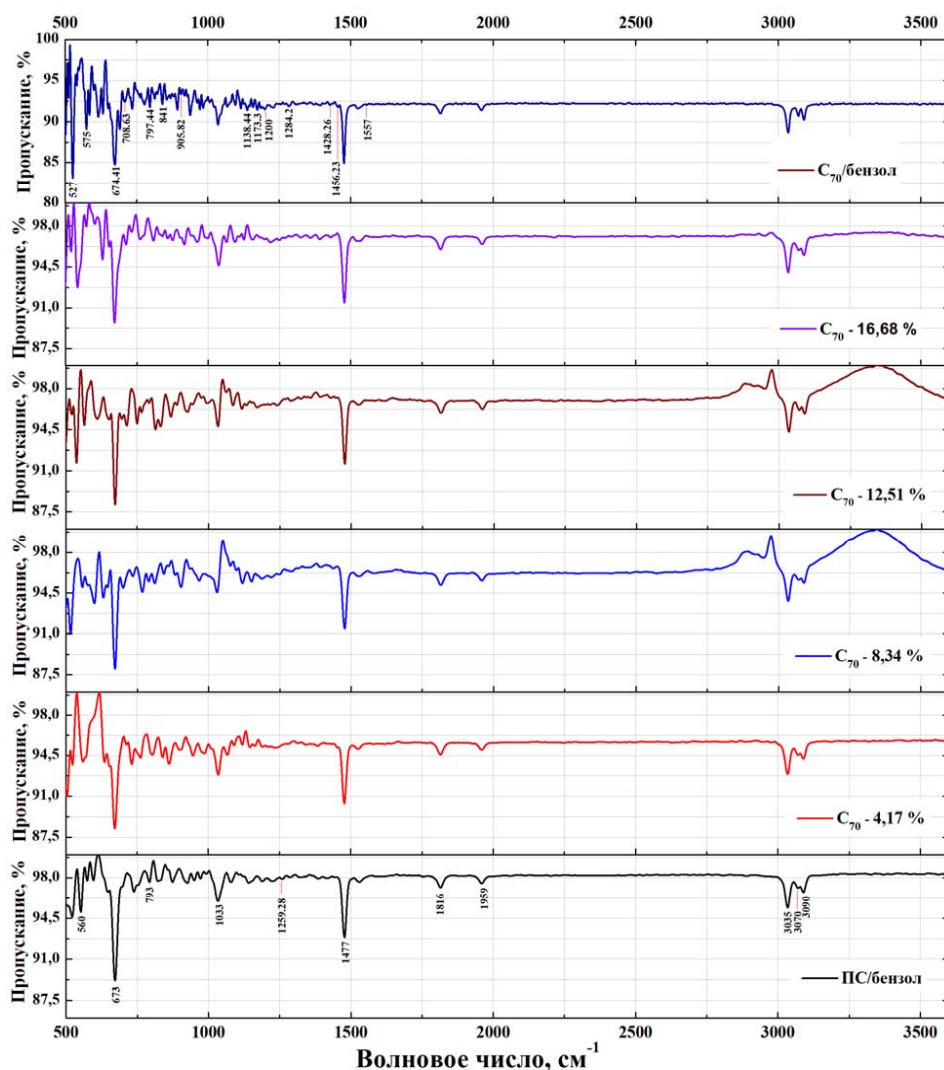


Рис. 2. Изменения инфракрасных спектров растворов ПС/ C_{70} /бензол при различных концентрациях ПС и C_{70} .

В инфракрасном спектре раствора ПС/бензол были зафиксированы следующие колебания: 793 см^{-1} – колебания изгиба, 1033 см^{-1} – валентные колебания C-H, $1259,23\text{ см}^{-1}$ – растяжение связи C=C, 3035 см^{-1} – растяжение ароматических C-H связей. Эти пики характерны для полимера ПС [16] и свидетельствуют о наличии химических связей в составе (рис. 2). Следует отметить, что в исследуемых растворах колебательные пики, соответствующие бензолу, наблюдались при 560 , 673 , 1477 , 1816 , 1959 , 3070 и 3090 см^{-1} . При добавлении раствора C_{70} фуллерена анализ ИК-спектров растворов ПС/ C_{70} /бензол показал следующие изменения (рис. 2):

- колебания, соответствующие растворителю, фуллерену C_{70} и полимеру ПС, наблюдались с небольшим сдвигом и увеличением интенсивности, а также появлялись новые колебания;
- интенсивность валентных колебаний ароматической связи C-H, характерная для ПС (3035 см^{-1}), незначительно снижается в образцах, содержащих фуллерен C_{70} .

При этом анализ инфракрасных спектров показал, что добавление C_{70} фуллерена в каждый полимерный раствор привело к увеличению поглощения и изменению ширины и сдвига пиков. Это свидетельствует о взаимодействии C_{70} фуллерена с полимерными цепочками ПС. Эти взаимодействия, в основном, входят в структуру π - π взаимодействий, что влияет на его физико-химические и механические свойства [16-17].

Исследования по модификации полимеров с использованием C_{70} фуллерена проведены в ограниченном количестве. Однако развивается направление ковалентной молекулярной модификации, но данный процесс является сложным и требует более глубоких исследований.

Раман-спектроскопия является одним из широко применяемых методов для изучения вибрационных характеристик материалов. В данном исследовании метод Раман-спектроскопии использовался для более точного описания свойств связей между полимером ПС и фуллереном C_{70} .

В ходе экспериментов в процессе изучения растворов с использованием рассеяния света было установлено, что фуллерен и полимер образуют агрегаты с координационными связями. Обычно процесс агрегации сопровождается либо уплотнением конфигурации полимерной цепи, либо, наоборот, ее разуплотнением. Результаты изменений спектров комбинационного рассеяния растворов ПС/ C_{70} /бензол представлены на рис. 3. Согласно данным научной литературы, для полистирола (ПС) характерны следующие основные вибрационные полосы: 1001,4; 1583; 1602,3 см^{-1} [18]. В нашем случае в спектре раствора ПС/бензол данные полосы зафиксированы на частотах 992, 1586 и 1605 см^{-1} . Как уже упоминалось выше, учитывая, что фуллерен C_{70} относится к группе симметрии D_{5h} , для него классифицируются 53 моды Рамана в следующем виде: $12A_1' + 22E_2' + 19E_1''$ [16]. Основные полосы колебаний, характерные для фуллерена C_{70} в растворе C_{70} /бензол, были

зафиксированы при частотах 397,17; 475; 671,12; 802; 992; 1174; 1468 и 1584 см^{-1} . Полосы колебаний, характерные для растворителя бензола, наблюдались при частотах 109; 606; 2618; 2950; 3063; 3167 и 3188 см^{-1} . Добавление раствора C_{70} /бензол в раствор ПС/бензол привело к изменению интенсивности отдельных колебательных полос в спектре Рамана раствора ПС/ C_{70} /бензол. Некоторые основные полосы, характерные для фуллерена C_{70} , усилились, некоторые исчезли, а также появились новые колебательные полосы, что свидетельствует о наличии взаимодействия между полимером ПС и фуллереном C_{70} . В частности, изменения интенсивности на частоте 1174 см^{-1} отражают степень взаимодействия между полимером ПС и фуллереном C_{70} . Эти изменения являются проявлением физических взаимодействий, таких как π - π "stacking" (взаимодействие π -электронов), Ван-Дер-Ваальсовы силы или донорно-акцепторные взаимодействия [18-20].

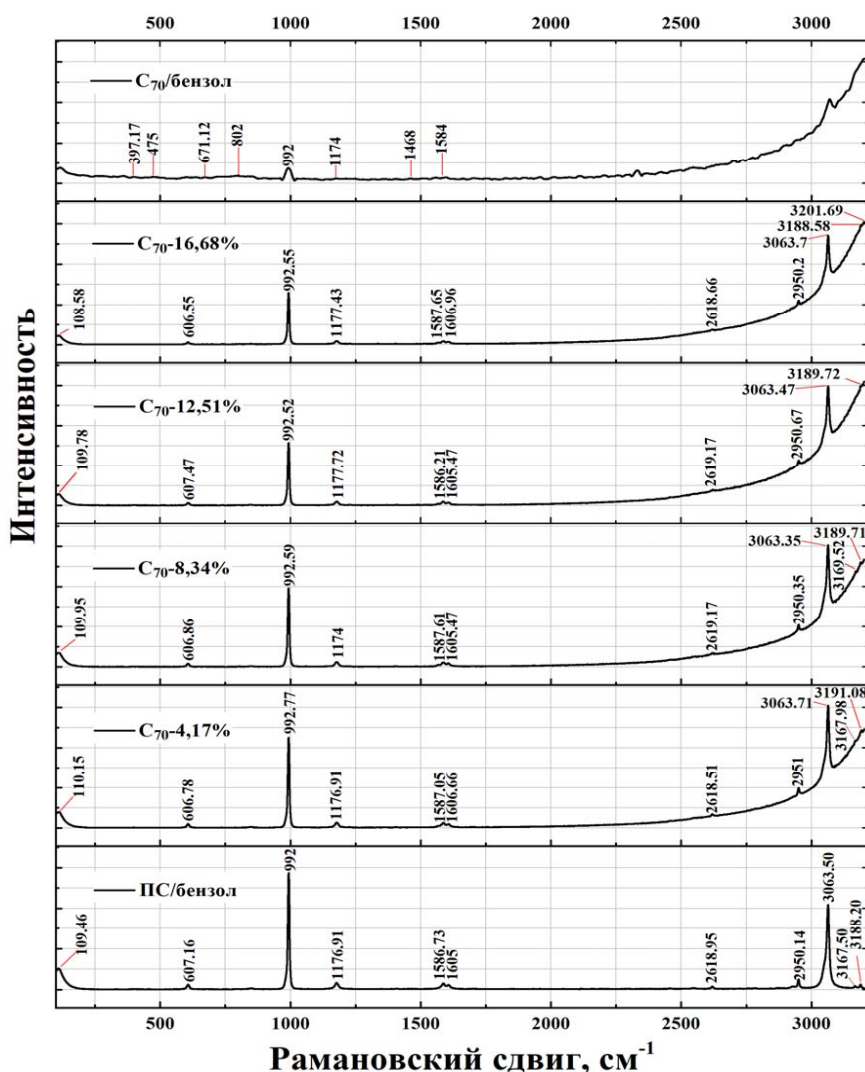


Рис. 3. Изменения спектров комбинационного рассеяния растворов ПС/ C_{70} /бензол при различных концентрациях ПС и C_{70} .

На рис. 4 приведены различия в ИК спектрах пропускания пленки ПС/ C_{70} , полученных в диапазоне 500-4000 см^{-1} . На основе спектральных изменений были определены физические взаимодействия между полимером ПС и фуллереном C_{70} .

ИК-спектр чистой пленки фуллерена C_{70} . Основные вибрационные частоты, наблюдаемые для слоя чистого фуллерена C_{70} , следующие: 706 см^{-1} – изгиб/растяжение С–С (смешанные колебания), 808 см^{-1} – растяжение С–С. Также были зафиксированы вибрации при частотах 1296; 1435; 1460; 1556 см^{-1} , соответствующие растяжению ароматических связей С=С в структуре фуллерена C_{70} . В спектрах раствора C_{70} /бензол и пленок C_{70} , полученных из этого раствора, пики, характерные для фуллерена C_{70} , сместились следующим образом: 708,63 $\rightarrow$ 706 см^{-1} , 797,44 $\rightarrow$ 808 см^{-1} , 1284,2 $\rightarrow$ 1296 см^{-1} , 1428,26 $\rightarrow$ 1435 см^{-1} , 1456,23 $\rightarrow$ 1460 см^{-1} , 1557 $\rightarrow$ 1556 см^{-1} . В научной литературе сообщается о пиках, близких к наблюдаемым в дан-

ной работе: 707, 795, 1291, 1432, 1460 и 1568 см^{-1} [14]. Эти пики наблюдаются как в растворе C_{70} /бензол, так и в слое чистого фуллерена C_{70} с незначительным смещением, что свидетельствует о том, что данные пики принадлежат молекуле фуллерена C_{70} , а не растворителю. Можно отметить, что в слоях ПС/ C_{70} изменение положения и интенсивности указанных пиков характеризует молекулярные взаимодействия между ПС и C_{70} .

ИК-спектр полимерной пленки ПС. В инфракрасном спектре пленок ПС, полученного из раствора ПС/бензол, были зафиксированы следующие основные пики: при 780 см^{-1} – внеплоскостные деформационные колебания связи С–Н, при 1025 см^{-1} – валентное колебание С–Н, при 3030 см^{-1} – растяжение ароматической связи С–Н. Кроме того, пики появляются при 714 см^{-1} – внеплоскостные деформационные колебания связи С–Н, 3060,8 см^{-1} – растяжение ароматической связи С–Н и 3447 см^{-1} – растяжение связи

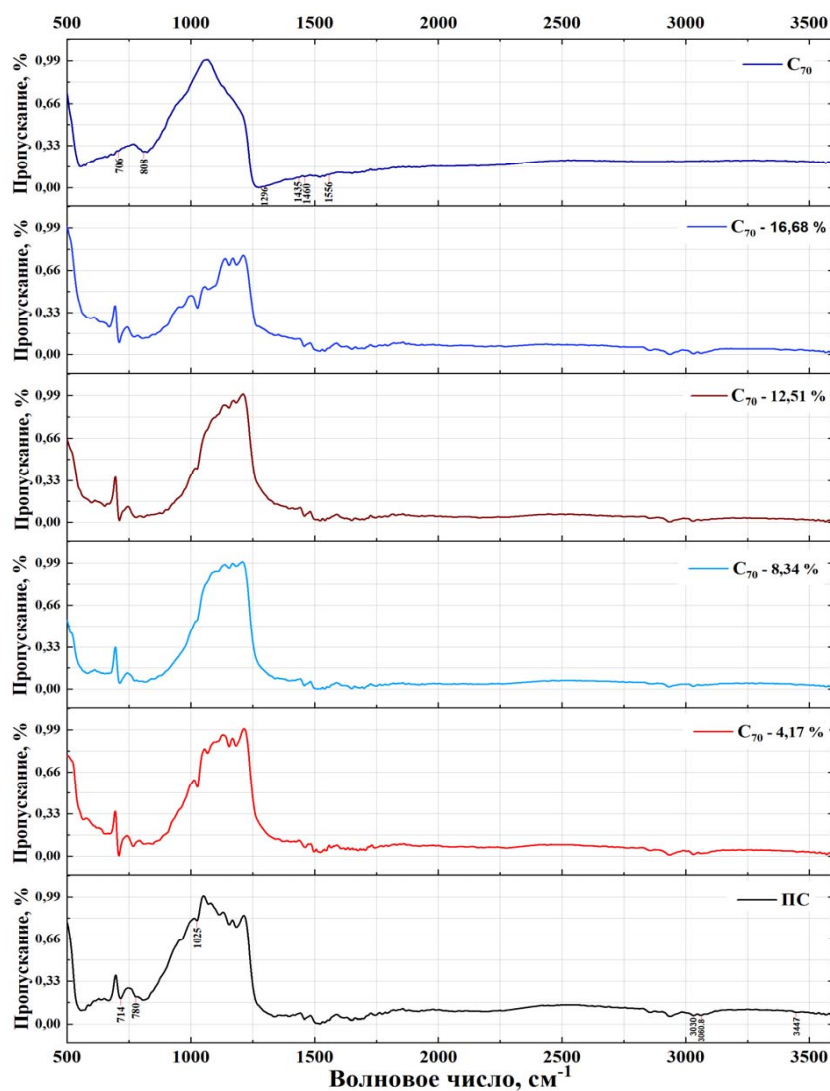


Рис. 4. Изменения ИК-спектров пленки ПС/ C_{70} при различных концентрациях ПС и C_{70} .

О–Н. Эти пики (рис. 4) являются характерными для полимера ПС и указывают на наличие химических связей в его структуре. В спектрах раствора ПС/бензол и пленок ПС, полученного из этого раствора, пики, соответствующие полимеру ПС, были симметрично смещены следующим образом: $793 \rightarrow 780,44 \text{ см}^{-1}$, $1033 \rightarrow 1025 \text{ см}^{-1}$, $3035 \rightarrow 3030 \text{ см}^{-1}$. Согласно литературным данным [21], зарегистрированы полосы, близкие к наблюдаемым в настоящем исследовании: 698, 756, 1027, 3026, 3060,8 и $3446,5 \text{ см}^{-1}$.

Спектральные изменения в тонких пленках ПС/ C_{70} . Далее были проанализированы спектры тонких пленок ПС/ C_{70} , в которых можно увидеть следующие ИК-пики, соответствующие фуллерену C_{70} и полимеру ПС, а также изменения, которые в них наблюдались (рис. 4). В тонких пленках ПС/ C_{70} наблюдались колебания, характерные как для пленок фуллерена C_{70} (671,2; 709,51; 1067; 1188,5; 1425,7; 1461,1; 1498; 1567 см^{-1}), так и для пленок полимера ПС (565; 1026,5; 1606; 2857; 2935; 3032; 3064; $3449,25 \text{ см}^{-1}$), с небольшим смещением и повышенной интенсивностью, а также появились новые колебания (565; 671,2; 1067; 1188,5; 1606; 2857; 2935 см^{-1}).

ИК-спектральный анализ этих изменений показал, что для каждого слоя ПС/ C_{70} добавление фуллерена C_{70} и увеличение его концентрации приводят к изменению ширины пиков и их смещению. Это еще раз подтверждает, что фуллерен C_{70} вступает во взаимодействие с полимерными цепочками ПС. Эти взаимодействия, в основном, происходят через π – π взаимодействие. Был проведен качественный анализ спектров, полученных для раствора ПС/ C_{70} /бензол и пленки ПС/ C_{70} . Установлено, что положения наблюдаемых вибрационных полос соответствуют характерным колебаниям фуллерена C_{70} и полимера ПС, что подтверждается данными литературных источников [22–23].

На рис. 5 показаны различия в спектрах комбинационного рассеяния света тонких пленок ПС/ C_{70} , полученных из раствора ПС/ C_{70} /бензол с различной массовой долей компонентов на стеклянной подложке. Результаты анализа спектров комбинационного рассеяния пленок ПС/ C_{70} показывают (рис. 5), что основные колебательные линии полистирола наблюдаются со следующими изменениями: 623,46; 1001,23; 1033,31; 1196,58 и $1601,64 \text{ см}^{-1}$. В научной литературе приведены пики, близкие к пикам ПС, зафиксированным в данной работе: 622; 1001; 1031; 1201,331; $1608,163 \text{ см}^{-1}$ [24–25].

Основные частоты колебаний, соответствующие фуллерену в пленках C_{70} , были зарегистрированы следующим образом: 220; 246; 382; 454; 475; 558; 783; 1095; 1268; 1305; 1353; 1367; 1375; 1443; 1451; 1470; 1504; 1555; 1591 см^{-1} . В научной литературе приведены пики, близкие к пикам C_{70} , зафиксированным в данной работе: 225; 250; 396; 455; 480; 548; 768; 1060; 1258; 1311; 1349; 1367; 1374; 1445; 1459; 1468; 1500; 1545; 1580 см^{-1} [14, 26]. Было отмечено, что с увеличением объемной доли C_{70} в составе тонкой пленки ПС/ C_{70} число пиков колебаний, соответствующих фуллерену, увеличивается и становится более выраженным. Кроме того, появились новые пики колебания, характерные для взаимодействия полимера ПС и фуллерена C_{70} . В частности, увеличение интенсивности на частоте $1566,44 \text{ см}^{-1}$ при концентрациях $C_{70} \sim 8,34$ и $\sim 16,68\%$ свидетельствует о высокой степени взаимодействия полимера ПС и фуллерена C_{70} . Эти изменения представляют собой физические взаимодействия, возникающие в результате π – π -стекинга (взаимодействия π -электронов), сил Ван-дер-Ваальса или донорно-акцепторного взаимодействия [20, 27].

Были измерены и проанализированы показатели преломления растворов ПС/ C_{70} /бензол, обогащенных частицами фуллерена C_{70} в различных концентрациях. На рис. 6 представлены зависимости средних значений показателя преломления для раствора ПС/ C_{70} /бензол с различным массовым содержанием фуллерена C_{70} . Из графика видно, что при добавлении C_{70} в диапазоне от 0 до 4,17% показатель преломления линейно увеличивался с $\sim 1,4955$ до $1,4995 \div 1,5006$. В интервале от 4,17 до 8,34% рост продолжался нелинейно, достигая значения порядка $\sim 1,5006$. В диапазоне от 8,34 до 12,51% увеличение показателя преломления замедлилось, достигнув диапазона $\sim 1,5006 \div 1,5008$. При дальнейшем увеличении концентрации C_{70} от 12,51 до 16,68% показатель преломления практически стабилизировался на уровне около 1,50084. С увеличением концентрации C_{70} показатель преломления также возрастал, однако на высоких концентрациях рост значительно замедлялся или прекращался.

Фуллерен C_{70} , обладая широкой π -электронной оболочкой, характеризуется высокой поляризуемостью. При диспергировании молекул фуллерена в полимерном растворе общая поляризуемость системы увеличивается. Это объясняется с помощью теорий Лоренца-Лоренца или Максвелла-Гарнетта. В результате может наблюдаться рост диэлектрической проницаемости

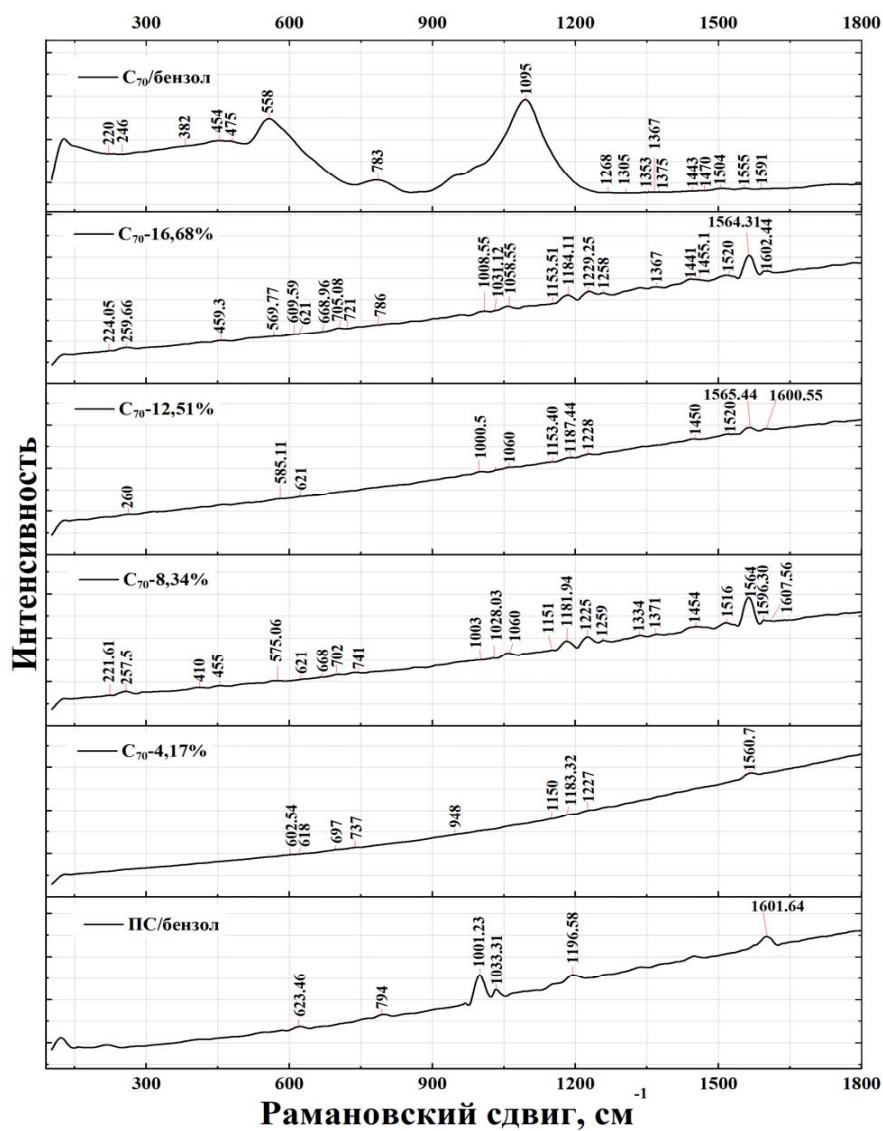


Рис. 5. Спектры комбинационного рассеяния пленок ПС/C₇₀ при различных концентрациях компонентов.

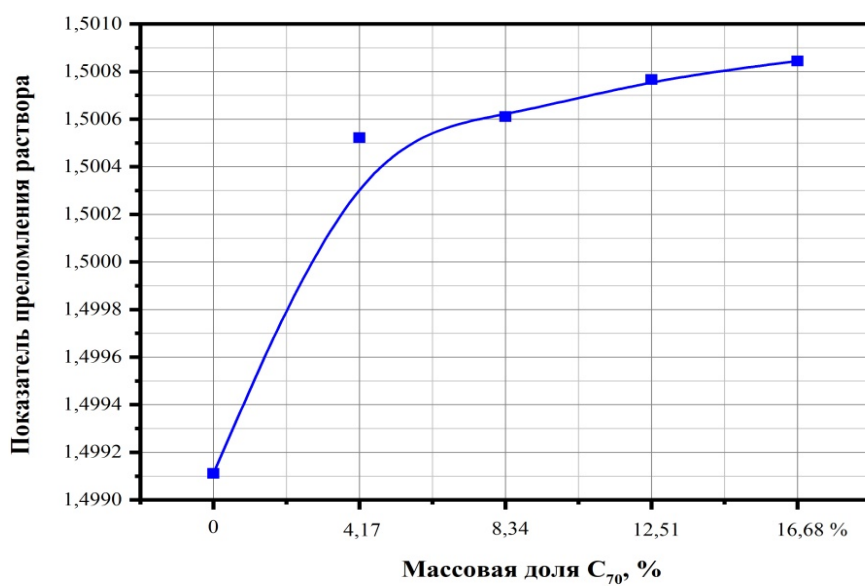


Рис. 6. Изменения показателя преломления в растворах ПС/C₇₀/бензол при различных концентрациях C₇₀.

(ϵ), что, в свою очередь, приводит к увеличению показателя преломления по формуле $n=\sqrt{\epsilon}$. Первоначальный резкий рост (от 0 до 4,17%) и линейное увеличение показателя преломления связано с тем, что молекулы фуллерена равномерно распределяются в полимерной матрице, внося значительный вклад в общую поляризуемость раствора. При низкой концентрации первые добавленные молекулы фуллерена эффективно заполняют свободные пространства между полимерными цепями. На заключительной стадии, при массовых долях 12,51÷16,68%, наблюдается замедление роста показателя преломления. Последнее может быть связано с достижением предела насыщения полимерной матрицы, когда избыток молекул C_{70} фуллерена образует агрегаты или кластеры. Кроме того, может происходить изменение соотношения бензола в растворе, в результате чего фуллерен находится в избытке. Новые добавляемые молекулы фуллерена не распределяются так же эффективно, как раньше, и вносят меньший вклад в общую молекулярную поляризуемость.

При агрегации молекулы C_{70} фуллерена начинают объединяться между собой, образуя кластеры, что приводит к неравномерному распределению в растворе. В результате рост показателя преломления может не соответствовать ожидаемому или даже слегка снижаться. Однако на графике резкого снижения не наблюдается, а только замедление роста, что может быть связано с началом процесса кластеризации или отсутствием свободного пространства в полимерной матрице [11, 28-30].

Полученные в работе экспериментальные результаты методами ИК- и Раман-спектроскопии, ареометрии и рефрактометрии могут быть использованы для анализа свойств взаимодействия молекул растворителя и растворенного вещества во многих практических областях нанофизики и нанохимии. В частности, на основе результатов оценки взаимодействия полимеров и фуллеренов, созданные на их основе наноструктурированные материалы имеют большой потенциал для использования в фармацевтике, оптических и биосенсорных технологиях, в производстве солнечных батарей, в системах хранения водорода, в качестве элементов современных электронных устройств, а также как носители лекарств в медицине.

4. Заключение

Проведенные исследования плотности раствора ПС/ C_{70} /бензол при добавлении в раствор полимера ПС в бензоле различного содержания C_{70} фуллерена показали, что с повышением концентрации C_{70} плотность раствора не увеличивается строго линейно, а изменяется с небольшими колебаниями. Постепенное увеличение доли C_{70} показывает, что характер взаимодействия компонентов в растворе зависит от распределения компонентов в растворе.

Результаты ИК-спектроскопических исследований раствора ПС/ C_{70} /бензол и пленок ПС/ C_{70} показали, что по изменениям характерных колебательных состояний составляющих компонентов системы можно сделать вывод о наличии взаимодействий между молекулами ПС и C_{70} . В частности, при добавлении молекул C_{70} фуллерена к полимеру ПС появляются новые полосы колебаний, а также наблюдаются сдвиги существующих пиков. Это подтверждает наличие молекулярного взаимодействия и свидетельствует о возможном существовании π - π стекинга и межмолекулярных взаимодействий типа Ван-Дер-Ваальса между полимером ПС и фуллереном C_{70} .

В спектре комбинационного рассеяния растворов ПС/ C_{70} /бензол и пленок ПС/ C_{70} было установлено, что с увеличением концентрации C_{70} в матрице характерные пики, относящиеся к структуре раствора, смещаются пропорционально количеству межмолекулярных связей. При высоком содержании C_{70} увеличивается интенсивность полос валентных колебаний, что подтверждает зависимость от концентрации агрегацию молекул C_{70} фуллерена.

Добавление C_{70} фуллерена в раствор полимера ПС приводит к увеличению показателя преломления раствора. При этом рост концентрации C_{70} сопровождается увеличением общей поляризуемости системы (молекулярной и агрегатной), что приводит к нелинейному изменению показателя преломления. Полученные данные по исследованию свойств растворов ПС/ C_{70} /бензол могут быть полезны не только в научных исследованиях, но и в промышленных технологиях. Эти результаты показывают эффективность метода добавления фуллерена для управления оптическими свойствами полимера.

Для более глубокого понимания фундаментальных физико-химических свойств полимерных композитов с фуллеренами, а также их эффективного применения в промышленных задачах,

целесообразно проведение систематических исследований механизмов, влияющих на поведение полимерной матрицы. Это направление представляется перспективным для дальнейших исследований.

Благодарность

Работа выполнена при поддержке проекта Министерства высшего образования, науки и инноваций Республики Узбекистан FL-8323102108 «Синтез и модификация функциональных наноматериалов на основе углерода, исследование процессов их взаимодействия с атомными частицами».

Список литературы (ГОСТ)

- [1]. Aziz S.B., Rasul H.H., Mohamme S.S., Muhammed A.W., Mahmood P.H., Omar S.Y., Hamid D.A., Salih I.L., Babakr K.A., Qader I.N., Ibrahim P.A., Omer R.A., Abdalrahman, A.A., Hamad S.M., Aspoukeh P., Hussein S.M. The role of glycerol in modulating ionic transport and electrochemical performance of PEO:NaCl solid polymer electrolytes // *Journal of Polymer Research*. – 2025. – Vol. 32. – No. 6. – P. 209.
- [2]. Tropina T.V., Avdeeva M.V., Aksenova V.L. Temperature Dependence of Structural Parameters of Thin Films of Polystyrene–Fullerene C₆₀/C₇₀ Nanocomposite According to Neutron Reflectometry Data // *Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques*. – 2024. – Vol. 18. – No. 4. – P. 765–769.
- [3]. Sadoh A., Hossain S., Ferreira S., Ravindra N.M. Optical properties of low-refractive index polymers // *Material Science & Engineering International Journal*. – 2022. – Vol. 6. – No.2. – P. 68–76.
- [4]. Akar A.Ö., Yıldız Ü.H., Tirkeş S., Tayfun Ü., Hacivelioglu F. Performance improvement of carbon fiberreinforced ABS composites by introducing fullerene nanoparticles // *Polymer International*. – 2025. – Vol. 74. – No.4. – P. 6769.
- [5]. Lim J.V., Bee S.T., Tin Sin L., Ratnam C.T., Abdul Hamid Z.A. A Review on the Synthesis, Properties, and Utilities of Functionalized Carbon Nanoparticles for Polymer Nanocomposites // *Polymers*. – 2021. – Vol. 13. – No.20. – P. 3547.
- [6]. Shao M., Bieliatynskiy A., Trachevskiy, V.V., Yang S., Ta M.. Multifunctional composites with a polymer matrix containing carbon nanotubes: a study of structural, physicochemical and operational characteristics // *Fullerenes, Nanotubes and Carbon Nanostructures*. – 2025. – Vol. 33. – No. 1. – P. 66–76.
- [7]. Peter J.F., Harris. Fullerene Polymers: A Brief Review Received // *Journal of Carbon Research*. – 2020. – Vol. 6. – No.4. – P.71.
- [8]. Hajduk B., Jarka P., Bednarski H., Godzierz M., Tański, T., Staszuk M., Nitschke P., Jarząbek B., Fijalkowski M., Mazik K. Thermal and optical properties of P3HT:PC70BM:ZnO nanoparticles composite films // *Scientific Reports*. – 2024. – Vol. 14. – No. 1 – P.66.
- [9]. Satayeva G.E., Baratova A.A., Sakipov K.E., Abdigapar A.A., Sharifov D.M, Gumilyov L.N. Optical properties of carbon containing nanocomposite films based on the polystyrene–fullerene C₆₀ system // (Online) *Eurasian Physical Technical Journal*. – 2023. – Vol.20. – No.3 (45). – P.27–34.
- [10]. Chang X., Xu Y., Von Delius M. Recent advances in supramolecular fullerene chemistry // *Chemical Society Reviews*. – 2024. – Vol. 53. – No.1 – P. 47–83.
- [11]. Makhmanov U.K., Esanov S.A., Sidigaliyev D.T., Musurmonov K.N., Aslonov B.A., and Chuliev T.A. Behavior of C₇₀ fullerene in a binary mixture of xylene and tetrahydrofuran // *Liquids*. – 2023. – Vol. 3. – No. 3. – P.385–392.
- [12]. Kausar A., Ahmad I. Nanocomposites of thermoplastic matrices with non-covalent fullerene reinforcement—Structural diversity, physical impact and potential // *Journal of Thermoplastic Composite Materials*. – 2024. – Vol. 37. – No. 11. – P. 3669–3693.
- [13]. Makhmanov U.K., Esanov S.A., Aslonov B.A., Bekmurodov Z. Musurmonov K.N., Shukurov A., Kokkhkharov A.M. Controlling the Size of C₇₀ Fullerene Whiskers by Evaporation of Solution Droplets // *International Journal of Nanoscience*. – 2023 – Vol. 68. – No. 7–8. – P. 616–616.
- [14]. Schettino V., Pagliai M., Cardini G. The Infrared and Raman Spectra of Fullerene C₇₀. DFT Calculations and Correlation with C₆₀ // *American Chemical Society Published on Web*. – 2002. – Vol.106. – No. 9. – P.1815–1823.
- [15]. Palotas J., Martens J., Berden G., Oomens J. The Infrared Spectrum of Protonated C₇₀ // *The Astrophysical Journal Letters*. – 2021. – Vol. 909. – No.2. – P.L17.
- [16]. Lee Y.C., Wu H.K., Peng Y.Z., Chen W.C. The Synthesis and Assembly Mechanism of Micro/Nano-Sized Polystyrene Spheres and Their

- Application in Subwavelength Structures. // *Micromachines*. – 2024. – Vol. 15. – No.7. – P. 841.
- [17]. Qianjin X., Xiangyun Y.L., Zhang Y., Duan A. B., Mei X. Spectrum and Physical Properties of C70 Under the External Electric Field // *Journal of Cluster Science* – 2020 – Vol. 31 – No. 5. – P. 951-960.
- [18]. Mark R. Pollard., Sparnacci K., Lars J. Wacker., Kerdoncuff H. Polymer Nanoparticle Identification and Concentration Measurement Using Fiber-Enhanced Raman Spectroscopy // *Chemosensors*. – 2020. –Vol. 8. – No. 1. – P. 21.
- [19]. Schiemenz S., Koenig R.M., Stevenson S., Avdoshenko S.M., Popov A.A. Vibrational Anatomy of C90 , C96 , and C100 Fullertubes: Probing Frankenstein’s Skeletal Structures of Fullerene Head Endcaps and Nanotube Belt Midsection // *Nanoscale*. – 2022. –Vol. 14 – No. 30 – P. 10823-10834.
- [20]. Nikolay O. Mchedlov-Petrosyan., Mykyta O. Marfunin., Nika N. Kriklya. Colloid Chemistry of Fullerene Solutions: Aggregation and Coagulation // *Liquids*. – 2024. – Vol.4. – No.1. – P. 32-72.
- [21]. Nandiyanto A.B.D., Henny K.C.A., Assaniyah S.Z, Amanah Z.S, Kaniawati I., Kurniawan T., Farobie O., Bilad M.R. Chemical Reaction Mechanism from Pyrolysis Degradation of Polystyrene Styrofoam Plastic Microparticles based on FTIR and GC-MS Completed with Bibliometric Literature Review to Support Sustainable Development Goals (SDGs) // *Moroccan Journal of Chemistry*. – 2024. – Vol. 12. – No.3. – P. 1380-1398.
- [22]. Liu M., Chen Q., Liu Y., Li J., Xu W., He Z. Enhanced performance of hollow polystyrene spheres for inertial confined fusion by noncovalent interactions // *Polymer Engineering & Science*. – 2024. – Vol. 64. – No. 3. – P. 1404-1414.
- [23]. Liu M., Chen Q., Liu Y., Li J., Xu W., He Z. Spectroscopic analysis of 1.75 MeV N5+ ions irradiated polystyrene film and the quest for the reaction mechanisms of fullerene and other products // *Radiation Physics and Chemistry*. – 2024. – Vol. 214. – P. 111300.
- [24]. Hamzah M.Q., Agam M.A., Tuama A.N., Jameel M.H. Preparation and characterization of polystyrene nanosphere // *Radiation Physics and Chemistry*. – 2024. – Vol. 2475. – No.1 – P. 090023.
- [25]. Itoh N., Hanari N. Development of a Polystyrene Reference Material for Raman Spectrometer (NMIJ RM 8158-a) // *Analytical Sciences. ANAL. SCI.* – 2021. – Vol. 37. – No.11 – P. 1533-1539.
- [26]. Shaik R., Ghosh B., Barman H.C., Rout A., Padhy P.K. Green Nanotech: A Review of Carbon-Based Nanomaterials for Tackling Environmental Pollution Challenges // *Nature Environment and Pollution Technology*. – 2021. – Vol. 23. – No.3 – P. 1783-1794.
- [27]. Kausar, A. Fullerene grafting in polymeric nanocomposite—a promising strategy // *Polymer-Plastics Technology and Materials*. – 2023. – Vol. 62. – No.7 – P. 935-948.
- [28]. Makhmanov U.K., Aslonov B.A., Esanov SH.A., Shukurov A., Chuliyev T.A. Controlled Synthesis of C70 Fullerene Micro/Nanotubes // *Romanian Journal of Physics*. – 2024. – Vol.69. – No.(7-8). – P. 615-624.
- [29]. Kamanina N. Refractive Properties of Conjugated Organic Materials Doped with Fullerenes and Other Carbon-Based Nano-Objects. // *Polymers* 2023. – 2023. – Vol.15. – No.13. – P. 2819.
- [30]. Wang S., Li X., Tu Y. A reflection on ‘Side-chain fullerene polyesters: a new class of high refractive index polymers’ // *Materials Horizons*. – 2025. – Vol.12. –No.1. – P. 15-19.

Reference

- [1]. S.B. Aziz, H.H. Rasul, S.S. Mohamme, A.W. Muhammed, P.H. Mahmood, S.Y. Omar, D.A. Ha-mid, I.L. Salih, K.A. Babakr, I.N. Qader, P.A. Ibrahim, R.A. Omer, A.A. Abdalrahman, S.M. Hamad, P. Aspoukeh, S.M. Hussein, The role of glycerol in modulating ionic transport and electrochemical performance of PEO:NaCl solid polymer electrolytes, *J. Polym. Res.*, 32 (2025) 209. <https://doi.org/10.1007/s10965-025-04441-w>
- [2]. T.V. Tropina, M.V. Avdeeva, V.L. Aksenova, Temperature dependence of structural parameters of thin films of polystyrene–fullerene C60/C70 nanocomposite according to neutron reflectometry data, *J. Surf. Investig. X-ray Synchrotron Neutron Tech.*, 18 (2024) 765-769. <https://doi.org/10.1134/S1027451024700423>
- [3]. A. Sadoh, S. Hossain, S. Ferreira, N.M. Ravindra, Optical properties of low-refractive index polymers, *Mater. Sci. Eng. Int. J.*, 6 (2022) 68-76. <https://doi.org/10.15406/mseij.2022.06.00182>
- [4]. A.Ö. Akar, Ü.H. Yıldız, S. Tirkeş, Ü. Tayfun, F. Hacivelioglu, Performance improvement of car-bon fiber-reinforced ABS composites by introducing fullerene nanoparticles, *Polym. Int.*, 74 (2025) 6769. <https://doi.org/10.1002/pi.6769>
- [5]. J.V. Lim, S.T. Bee, L. Tin Sin, C.T. Ratnam, Z.A. Abdul Hamid, A review on the synthesis, prop-erties, and utilities of functionalized carbon nanoparticles for polymer nanocomposites, *Polymers*, 13 (2021) 3547. <https://doi.org/10.3390/polym13203547>

- [6]. M. Shao, A. Bieliatynskiy, V.V. Trachevskiy, S. Yang, M. Ta, Multifunctional composites with a polymer matrix containing carbon nanotubes: a study of structural, physicochemical and operational characteristics, *Fuller. Nanotub. Carbon Nanostruct.*, 33 (2025) 66-76. <https://doi.org/10.1080/1536383X.2024.2389180>
- [7]. J.F. Peter, Fullerene polymers: a brief review, *J. Carbon Res.*, 6 (2020) 71. <https://doi.org/10.3390/c6040071>
- [8]. B. Hajduk, P. Jarka, H. Bednarski, M. Godzierz, T. Tański, M. Staszuk, P. Nitschke, B. Jarząbek, M. Fijalkowski, K. Mazik, Thermal and optical properties of P3HT:PC70BM:ZnO nanoparticles composite films, *Sci. Rep.*, 14 (2024) 66. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-47134-4>
- [9]. G.E. Satayeva, A.A. Baratova, K.E. Sakipov, A.A. Abdigapar, D.M. Sharifov, L.N. Gumilyov, Optical properties of carbon containing nanocomposite films based on the polystyrene-fullerene C60 system, *Eurasian Phys. Tech. J.*, 20 (2023) 27-34. <https://doi.org/10.31489/2023No3/27-34>
- [10]. X. Chang, Y. Xu, M. Von Delius, Recent advances in supramolecular fullerene chemistry, *Chem. Soc. Rev.*, 53 (2024) 47-83. <https://doi.org/10.1039/D2CS00937D>
- [11]. U.K. Makhmanov, S.A. Esanov, D.T. Sidigaliyev, K.N. Musurmonov, B.A. Aslonov, T.A. Chuliev, Behavior of C70 fullerene in a binary mixture of xylene and tetrahydrofuran, *Liquids*, 3 (2023) 385-392. <https://doi.org/10.3390/liquids3030023>
- [12]. A. Kausar, I. Ahmad, Nanocomposites of thermoplastic matrices with non-covalent fullerene re-inforcement-structural diversity, physical impact and potential, *J. Thermoplast. Compos. Mater.*, 37 (2024) 3669-3693. <https://doi.org/10.1177/08927057241233568>
- [13]. U.K. Makhmanov, S.A. Esanov, B.A. Aslonov, Z. Bekmurodov, K.N. Musurmonov, A. Shukurov, A.M. Kokhkharov, Controlling the size of C70 fullerene whiskers by evaporation of solution drop-lets, *Int. J. Nanosci.*, 68 (2023) 616. <https://doi.org/10.59277/RomJPhys.2023.68.616>
- [14]. V. Schettino, M. Pagliai, G. Cardini, The infrared and Raman spectra of fullerene C70. DFT calculations and correlation with C60, *J. Phys. Chem. A*, 106 (2002) 1815-1823. <https://doi.org/10.1021/jp012680d>
- [15]. J. Palotas, J. Martens, G. Berden, J. Oomens, The infrared spectrum of protonated C70, *Astro-phys. J. Lett.*, 909 (2021) L17. <https://doi.org/10.3847/2041-8213/abe874>
- [16]. Y.C. Lee, H.K. Wu, Y.Z. Peng, W.C. Chen, The synthesis and assembly mechanism of micro/nano-sized polystyrene spheres and their application in subwavelength structures, *Micromachines*, 15 (2024) 841. <https://doi.org/10.3390/mi15070841>
- [17]. X. Qianjin, Y.L. Xiangyun, Y. Zhang, A.B. Duan, X. Mei, Spectrum and physical properties of C70 under the external electric field, *J. Clust. Sci.*, 31 (2020) 951-960. <https://doi.org/10.1007/s10876-019-01700-x>
- [18]. M.R. Pollard, K. Sparnacci, L.J. Wacker, H. Kerdoncuff, Polymer nanoparticle identification and concentration measurement using fiber-enhanced Raman spectroscopy, *Chemosensors*, 8 (2020) 21. <https://doi.org/10.3390/chemosensors8010021>
- [19]. S. Schiemenz, R.M. Koenig, S. Stevenson, S.M. Avdoshenko, A.A. Popov, Vibrational anatomy of C90, C96, and C100 fullertubes: probing Frankenstein's skeletal structures of fullerene head endcaps and nanotube belt midsection, *Nanoscale*, 14 (2022) 10823-10834. <https://doi.org/10.1039/D2NR01870E>
- [20]. N.O. Mchedlov-Petrosyan, M.O. Marfunin, N.N. Kriklya, Colloid chemistry of fullerene solutions: aggregation and coagulation, *Liquids*, 4 (2024) 32-72. <https://doi.org/10.3390/liquids4010002>
- [21]. A.B.D. Nandiyanto, K.C.A. Henny, S.Z. Assaniyah, Z.S. Amanah, I. Kaniawati, T. Kurniawan, O. Farobie, M.R. Bilad, Chemical reaction mechanism from pyrolysis degradation of polystyrene styrofoam plastic microparticles based on FTIR and GC-MS completed with bibliometric literature review to support sustainable development goals (SDGs), *Moroc. J. Chem.*, 12 (2024) 1380-1398.
- [22]. M. Liu, Q. Chen, Y. Liu, J. Li, W. Xu, Z. He, Enhanced performance of hollow polystyrene spheres for inertial confined fusion by noncovalent interactions, *Polym. Eng. Sci.*, 64 (2024) 1404-1414. <https://doi.org/10.1002/pen.26625>
- [23]. M. Liu, Q. Chen, Y. Liu, J. Li, W. Xu, Z. He, Spectroscopic analysis of 1.75 MeV N⁵⁺ ions irradiated polystyrene film and the quest for the reaction mechanisms of fullerene and other products, *Radiat. Phys. Chem.*, 214 (2024) 111300. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2023.111300>
- [24]. M.Q. Hamzah, M.A. Agam, A.N. Tuama, M.H. Jameel, Preparation and characterization of polystyrene nanosphere, *Radiat. Phys. Chem.*, 2475 (2024) 090023. <https://doi.org/10.1063/5.0108228>
- [25]. N. Itoh, N. Hanari, Development of a polystyrene reference material for Raman spectrometer (NMIJ

- RM 8158-a), Anal. Sci., 37 (2021) 1533-1539. <https://doi.org/10.2116/analsci.21P054>
- [26]. R. Shaik, B. Ghosh, H.C. Barman, A. Rout, P.K. Padhy, Green nanotech: a review of carbon-based nanomaterials for tackling environmental pollution challenges, Nat. Environ. Pollut. Technol., 23 (2021) 1783-1794. <https://doi.org/10.46488/NEPT.2024.v23i03.051>
- [27]. A. Kausar, Fullerene grafting in polymeric nanocomposite-a promising strategy, Polym.-Plast. Technol. Mater., 62 (2023) 935-948. <https://doi.org/10.1080/25740881.2023.2175219>
- [28]. U.K. Makhmanov, B.A. Aslonov, Sh.A. Esanov, A. Shukurov, T.A. Chuliyev, Controlled synthesis of C70 fullerene micro/nanotubes, Rom. J. Phys., 69 (2024) 615-624.
- [29]. N. Kamanina, Refractive properties of conjugated organic materials doped with fullerenes and other carbon-based nano-objects, Polymers, 15 (2023) 2819. <https://doi.org/10.3390/polym15132819>
- [30]. S. Wang, X. Li, Y. Tu, A reflection on 'Side-chain fullerene polyesters: a new class of high refractive index polymers', Mater. Horiz., 12 (2025) 15-19. <https://doi.org/10.1039/D4MH90124J>

Peculiarities of interaction in solutions of polystyrene and fullerene C₇₀

U.K. Makhmanov^{1*}, X. Jiang², B.A. Aslonov¹, E.A. Tursunkulov¹

¹Institute of Ion-Plasma and Laser Technologies, Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan, 33 Durmon Yuli Street, Tashkent, Uzbekistan

²Nanjing University of Science and Technology, International Chinese-Belarusian Scientific Laboratory for Vacuum-Plasma Technologies, 200 Xiaolingwei Str., Nanjing, People's Republic of China

ABSTRACT

Addition of nanofillers to polystyrene polymers leads to the creation of materials with new unique characteristics for wide application. In this work, physical processes occurring in benzene solutions of polystyrene (PS) and fullerene C₇₀ at different ratios of components were studied using refractometry, areometry, infrared and Raman spectroscopy. It was experimentally established that intermolecular interactions between PS and C₇₀ in solution have a physical nature (electrostatic and Van der Waals forces). The interaction of PS-C₇₀ was assessed in the

presence (in solution) and absence (on the substrate surface) of benzene. The obtained scientific results are very important for understanding the processes of self-assembly in multicomponent systems and creating new nanocomposite materials in various fields of nanotechnology.

Keywords: fullerene C₇₀, polymer polystyrene, benzene solution, aggregation, nanocluster, polymer/fullerene film, stability, refractive index

Полистирол мен фуллерен C₇₀ ерітінділеріндегі әрекеттесу ерекшеліктері

У.К. Махманов^{1*}, Х. Jiang², Б.А. Аслонов¹, Е.А. Тұрсынқұлов¹

¹Өзбекстан Республикасы Ғылым академиясы Ион-плазма және лазерлік технологиялар институты, Өзбекстан, Ташкент қаласы, Дурмон Юли көшесі, 33

²Нанкин ғылым және технология университеті, вакуумдық-плазмалық технологиялар бойынша халықаралық Қытай-Беларусь ғылыми зертханасы, Сяолинвэй көшесі, 200, Нанкин, Китай

АҢДАТПА

Полистирол полимерлеріне нанотолтырғыштарды қосу кең қолдану үшін жаңа бірегей сипаттамалары бар материалдарды жасауға әкеледі. Бұл жұмыста рефрактометрия, гидрометрия, инфрақызыл және Раман спектроскопиясы көмегімен полистирол (ПС) және фуллерен C₇₀ бензол ерітінділерінде компоненттердің әртүрлі қатынасында болатын физикалық процестер зерттелді. Ерітіндідегі ПС және C₇₀ арасындағы молекулааралық әрекеттесулердің физикалық табиғаты (электростатикалық және Ван-дер-Ваальс күштері) болатыны тәжірибе жүзінде анықталды. ПС-C₇₀ әрекеттесуі бензолдың болуы (ерітіндіде) және жоқтығы (субстрат бетінде) кезінде бағаланды. Алынған ғылыми нәтижелер көпкомпонентті жүйелердегі өздігінен құрастыру процестерін түсіну және нанотехнологияның әртүрлі салаларында жаңа нанокөмірдік материалдарды жасау үшін өте маңызды.

Түйінді сөздер: C₇₀ фуллерен, полистирол полимері, бензол ерітіндісі, агрегация, нанокластер, полимер/фуллерен пленкасы, тұрақтылық, сыну көрсеткіші.

Сведения об авторах

У.К. Махманов — доктор физико-математических наук, профессор, заведующий лабораторией «Оптики и спектроскопии», Институт ионно-плазменных и лазерных технологий Академии наук Республики Узбекистан

E-mail: urolmakh@gmail.com

ORCID 0000-0002-7185-2812

Х. Jiang — профессор, директор Международной китайско-белорусской научной лаборатории по вакуумно-плазменным технологиям, факультет химии и химической инженерии, Нанкинский университет науки и технологий

E-mail: jiangxh24@njust.edu.cn

ORCID 0000-0002-7222-8173

Б.А. Аслонов — докторант Института ионно-плазменных и лазерных технологий Академии наук Республики Узбекистан

E-mail: aslonovbobir@mail.ru

ORCID 0000-0002-3694-3700

Э.А. Турсункулов — стажер-исследователь Института ионно-плазменных и лазерных технологий Академии наук Республики Узбекистан

E-mail: elyortursunqulov1@gmail.com

ORCID 0009-0000-7260-7897