

О НЕКОТОРЫХ ПЕРСПЕКТИВНЫХ НАПРАВЛЕНИЯХ СОВРЕМЕННОЙ НАУКИ О ПОЛИМЕРАХ

Химия и физика полимеров представляют собой сегодня не только обширную самостоятельную область естествознания, часто выступающую под названием «наука о полимерах», но и важный фундамент современной технологии, обеспечивающей производство пластмасс, каучуков, волокон, лаков, клеев, а также перспективных композиционных материалов. О месте полимерной науки в современной химии можно судить, например, по тому, что количество публикаций в научных журналах, посвященных полимерам, как, впрочем, и число самих этих журналов, международных конференций и симпозиумов, стало вполне соизмеримым с таковым для органической химии, превышая его для неорганической химии и уступая лишь такой гигантской области, как физическая химия.

В начале 90-х годов полезно представить себе, какие достижения в науке о полимерах определяют ее лицо и какие направления представляются перспективными на ближайшие 5–10 лет. При попытке нарисовать такую картину следует иметь в виду, что она неизбежно будет фрагментарной и субъективной, ибо видение этой картины, конечно же, различно в зависимости от авторов¹.

Современная полимерная наука достигла высокого уровня мультидисциплинарности и интеграции и поэтому плохо укладывается в традиционные структурные схемы естественных наук. Тем не менее для удобства изложения какая-то классификация необходима, и мы будем придерживаться предложенной ниже, понимая ее условность и ограниченность.

Предлагаемые читателю идеи будут сформулированы в рамках следующих трех разделов.

- I. Фундаментальные проблемы науки о полимерах.
- II. Актуальные научные проблемы полимерного материаловедения.
- III. Перспективы применения новых методов эксперимента.

Особенность современного этапа — активные исследования структуры и динамики сложных полимерных систем с целью построения концептуально более широкой картины современной физики твердого тела, в которой макромолекулярные системы и объекты занимают соответствующее им место в общей картине природы. Никогда в предшествующие десятилетия полимерными веществами не занималось столь много классических физиков, и это начинает приносить свои плоды.

Сказанное не значит, конечно, что забыты собственно макромолекулярные аспекты проблемы. Последние также активно развиваются, внося существенный вклад в современную естественно-научную картину мира.

Другая четко просматриваемая сегодня тенденция — это внимание ко всему комплексу вопросов синтетический полимер — живой организм, моделирование отдельных функций организма с помощью биомиметических подходов и создание новых биоматериалов, а также активное вторжение полимерных веществ в фармакологию и медицину.

И, наконец, ключевой проблемой современной химии и физики полимеров продолжает оставаться проблема структура — свойство, для решения которой еще многое предстоит сделать. В последние годы заметные

¹ Статья написана редактором журнала на основе заметок, представленных всеми членами редколлегии.

успехи в этом направлении в значительной степени достигнуты благодаря развитию теории полимеров, включая статистическую физику макромолекул и компьютерное моделирование сложных макромолекулярных систем.

I. ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ НАУКИ О ПОЛИМЕРАХ

Синтез макромолекул и химические реакции в полимерах. В процессе синтеза макромолекул вовлекаются все более и более сложные соединения (мономеры). Однако ряд принципиальных вопросов может быть решен на достаточно простых мономерах. Так, Г. Марк отметил недавно отсутствие в арсенале полимерной химии таких сравнительно простых макромолекул, как линейные, но полностью 1,1,2,2-замещенные полиолефины, например политетрацетилен, поли-2,3-диметил-2-бутен, полидиметилмалеонитрил, а также полимеров дважды замещенных диазосоединений (диазопропана или дифенилдиазометана), соответствующих кетенов (диметил- и дифенил-) и т. п. Можно надеяться, что эти и другие высокомолекулярные продукты подобного типа с жесткими цепями неароматической природы будут обладать интересными свойствами. Для синтеза таких полимеров прежде всего следует опробовать катализаторы типа Циглера — Натта или катализаторы, действующие по механизму «переноса группы», поскольку именно они обладают в максимальной степени способностью к стереорегулированию.

Область ионной полимеризации вошла в новый важный этап своего развития, когда богатейший арсенал структурных представлений и механизмов стал реально использоваться в современной макромолекулярной инженерии. Синтез полимеров со строго заданными молекулярными характеристиками, реакционноспособных и функциональных полимеров (телефеликов, макромономеров), блок- и привитых (гибридных) сополимеров, соединяющих в себе существенно разные синтетические и природные макромолекулярные фрагменты, — вот далеко не полный перечень возможностей, доступных методам ионной полимеризации и обогативших препаративную полимерную химию.

Развитие этой области в настоящее время принципиально важно для разработки новых полимеров и их композиций (ударопрочные, термоэластопласти и т. п.), объемной и поверхностной модификации традиционных материалов, стабилизации полимерных смесей, создания материалов и изделий биомедицинского назначения.

В ионно-координационной стереоспецифической полимеризации диенов широкое использование каталитических систем на основе соединений редкоземельных элементов позволило получить полибутидан и полизопрен с исключительно высокой стереорегулярностью. К актуальным задачам здесь следует отнести исследование механизмов действия этих систем и индивидуальных органических производных редкоземельных металлов как катализаторов полимеризации.

Поиск новых эффективных катализаторов является важной задачей и в поликонденсации, где ее решение позволит не только значительно ускорить процессы, но и существенно расширить их возможности с точки зрения молекулярного дизайна. Интересные перспективы может открыть использование ферментативного катализа. Своего решения ждут проблемы стереоспецифической поликонденсации.

В области полимеризации олефинов и винильных мономеров важным направлением представляется углубленное исследование высокоэффективных алюмоксановых катализаторов Каминского и их аналогов, синтез новых стереорегулярных полиолефинов с использованием гомогенных координационных катализаторов.

В области полимеризации циклоолефинов с раскрытием цикла под влиянием катализаторов метатезиса наиболее интересно, по-видимому, открытие индивидуальных металлацилобутанов и карбеновых комплексов, катализирующих полимеризацию циклоолефинов по механизму живых цепей. Исследование механизмов этих процессов и расширение круга мономеров следует отнести к задачам ближайшего времени.

Заметный прогресс наблюдается в синтезе металлоорганических полимеров. Кроме работ по таким полимерам, в которые вводили металлы в виде солей или комплексов ионного типа, в последнее время все больше внимания уделяют металлоорганическим комплексам, в которых металлы связаны с органической частью макромолекул σ - и π -связями. Получаемые на этом пути системы могут обладать катализитическими свойствами, фотооптической активностью, проводимостью и т. д.

Зарождается новая смежная с органическими и элементоорганическими полимерами область — полимеры со связью металл — металл в основной цепи. Уже есть публикации по таким «олигомерным» системам с несколькими атомами металла в основной цепи и органическим обрамлением. В свою очередь эта область тесно связана с бурно развивающимися исследованиями по макромолекулярным кластерам. Не менее интересны работы по синтезу линейных систем олигомерного типа, где атомы металла организуются в цепь через альтернирующую «прослойку» циклических лигантов (так называемые полидайкеры).

Оформилось и интенсивно развивается направление, которое можно назвать химией самоорганизующихся систем или «надмолекулярной» химией. Типичными самоорганизующимися системами являются молекулы с мезогенными группами либо поверхностно-активные и липидоподобные вещества. Последние, как известно, образуют мицеллы, ориентированные моно- и полислои, липосомы, которые представляют собой высокоорганизованные надмолекулярные системы коллоидных размеров, структурно подобные биологическим мембранам. Можно прогнозировать дальнейшее развитие исследований в области молекулярной архитектуры таких систем и особенно химических реакций в них.

К настоящему времени синтезирован широкий круг поверхностно-активных мономеров с различной структурой гидрофильной и гидрофобной частей молекул и различной локализацией реакционноспособных групп по цепи. На этом пути можно надеяться получить ультратонкие пленки на поверхности разных субстратов.

Следует отметить, что развитие синтетических автоматизированных методик получения макромолекул по Меррефилду открывает уникальные возможности синтеза сополимеров и блок-сополимеров строго регулярного строения и, кроме того, монодисперсных. Такие системы могут быть очень интересными моделями для изучения их физических и физико-химических свойств. Нельзя исключить и возможное практическое применение таких полимеров, например, в оптических системах, микроэлектронике и т. п.

Представляются перспективными работы, направленные на развитие биотехнологических методов синтеза полимеров. Речь идет не только о таких водорастворимых полимерах, как полисахариды и полифосфаты, но и о полимерах, которые могут быть использованы в качестве конструкционных материалов, например полимеры производных β -пропиолактона. Английская фирма ICI уже пропагандирует работающую биотехнологию получения этого полимера. Такие полимеры относятся, к тому же, к экологически чистым системам, поскольку подвержены биодеструкции, катализируемой ферментами микроорганизмов.

В этой связи вообще вырисовывается новая и крайне интересная тенденция в химии мономеров и полимеров — построение смешанных химических и биотехнологических путей синтеза функционализированных веществ. Суть заключается в том, что некоторые стадии многоступенчатого процесса синтеза (например, окисление, ацилирование, аминирование и др.) осуществляют микроорганизмы или ферменты, выделяемые из них, а дальше включаются обычные катализитические процессы синтетической макромолекулярной химии. Такой комбинированный подход весьма привлекателен и, конечно, сулит много практических результатов, требуя, однако, глубоких фундаментальных проработок в инженерной энзимологии и органической и макромолекулярной химии.

В 80-х годах начала бурно развиваться еще одна область химии полимеров — синтетические макромолекулы как реагенты и промежуточные вещества, в органическом синтезе. Речь идет не только о функционализи-

рованных полимерных системах (полиэлектролитах, реакционноспособных олигомерах и т. п.), но и о линейных или спиральных системах, которые способны осуществлять (или катализировать) реакции тонкого органического синтеза (конденсацию, восстановление, алкилирование, аминирование и т. п.) с большей скоростью и селективностью, чем это делают аналогичные по строению низкомолекулярные реагенты. Классические примеры — синтез полипептидов и аналогов нуклеиновых кислот по Меррефилду, а также моделирование каталазного, оксидазного, протолитического и других процессов на синтетических моделях ферментов.

Фактически речь должна идти о широкой разработке области полимерных катализаторов и реагентов, которые могли бы служить для целей органического синтеза и в гетерофазных процессах в проточном и колонном режиме, сохраняя свою активность длительное время. Создается впечатление, что это направление может стать доминирующим в общей проблеме тонкого органического синтеза к началу XXI века.

Дальнейшего развития требуют вопросы химических реакций между макромолекулами. Следует обратить больше внимания на диффузионно-контролируемые процессы в полимерных расплавах, где существенную роль играет совместное протекание химических реакций и процессов физической релаксации. Последнее особенно существенно при поликонденсации в блоке, когда происходит быстрое нарастание молекулярной массы и химическое застекловывание системы, приводящее к резкому замедлению релаксационных процессов.

Химические реакции в концентрированных высоковязких полимерных системах весьма сложны для изучения, и здесь можно надеяться на успех с привлечением методов компьютерного моделирования реакций и соответствующих им процессов структурной перестройки в реагирующих средах.

Несомненный и неослабевающий фундаментальный интерес представляет изучение кооперативных интерполимерных взаимодействий в связи с развитием и созданием теории реакций, в которых в качестве кинетических единиц выступают макромолекулы. В этой связи интерес представляют подход, позволяющий влиять на направление и кинетику таких процессов. В значительной степени ключ к пониманию направленного транспорта макромолекул и явлений «узнавания» в биологических системах дают именно исследования такого рода.

Серьезные химические задачи возникают сегодня в связи с экологическими проблемами из-за быстро возрастающего объема отходов полимерных материалов. Пожалуй, важнейшим научным и технологическим направлением в решении этой проблемы в грядущие десятилетия стала разработка биологически разлагаемых макромолекул и материалов на их основе. Среди важных задач, решение которых требует серьезных усилий ученых: микробиологический синтез биоразлагаемых пластмасс и комбинации обычного и микробиологического синтезов; разработка биоразлагаемых материалов на основе природных полимеров.

На этом пути могут возникнуть еще практические неразработанные вопросы влияния микроорганизмов и их метаболизма на свойства, в первую очередь долговременные, полимерных материалов.

Физика полимеров. К ключевым проблемам современной статистической физики макромолекул, для успешного решения которых сегодня создан значительный задел, можно отнести следующие.

1. Взаимосвязь условий синтеза и свойств конечного продукта. Для продвижения в этом направлении уже можно использовать весь спектр разработанных методов статистической физики макромолекул и химической кинетики реакций полимеризации, образования полимерных сеток и т. д.

2. Динамические свойства концентрированных полимерных систем (концентрированных растворов, расплавов, сеток, стекол, кристаллов). Сюда относятся как исследования по реологии полимерных систем с топологическими ограничениями, так и разработка теории локальной подвижности и конформационных перестроек в различных агрегатных состояниях (вязкотекучем, высокоэластическом, стеклообразном, частично кристалли-

ческом), а также в переходных областях. Здесь фундаментальные представления уже достаточно хорошо разработаны (например, теория релаксации), и проблема заключается в приложении этих представлений к конкретным полимерным системам. Существенный интерес представляют проблемы подвижности и конформационных перестроек в условиях пластического течения твердых кристаллических и стеклообразных полимеров.

3. Применение методов численного моделирования (молекулярная динамика, броуновская динамика, метод Монте-Карло) для исследования молекулярных движений в сложных конкретных полимерных системах, а также проблема визуализации этих движений. Эта задача особенно важна применительно к макромолекулам белков-ферментов, поскольку исследование функционирования конкретных белков чисто теоретическими методами, по-видимому, не эффективно. Теоретическое и программное обеспечение этих работ находится на высоком уровне, что позволяет широко использовать возможности современных компьютеров.

4. Разработка теоретических представлений о свойствах синтетических моделей биополимеров (синтетических гетерополимеров со специальной первичной структурой, полиэлектролитов и т. д.), а также о поведении синтетических полимеров (и комплексов синтетический полимер+биополимер) в биологических системах. Важным представляется здесь моделирование биомембран с целью изучения их организации и функционирования компонентов (рецепторов) и локальных структур (ионных каналов) в них.

Структура и свойства гидрофильных (в пределе водорастворимых) полимеров также входят в этот круг задач. Поверхностно-активные свойства таких полимеров и связанная с этим способность адсорбироваться на межфазных границах представляют фундаментальный интерес. Научные разработки в этом направлении должны помочь в решении практических задач в связи с применением таких веществ в качестве флокулянтов и стабилизаторов коллоидных систем.

Особое место среди полимеров этого класса занимают полиэлектролиты. Здесь помимо классических задач адекватного описания коллигативных свойств их растворов и конформационного поведения в связи с влиянием электростатических взаимодействий большой интерес вызывают исследования, связанные со способностью макромолекул кооперативно взаимодействовать с ионами металлов и сложными органическими ионами, в том числе, поверхностно-активных веществ. Помимо общенаучного интереса эти проблемы непосредственно связаны с применением таких полимеров в биологии, медицине, энзимологии и в решении экологических задач.

Полимерные сетки на основе водорастворимых полиэлектролитов представляют несомненный интерес в связи с их способностью к колоссальным по объему набуханиям (в 1000 раз и более) и уникальными свойствами. В связи с этим в последнее время заметно прогрессировали работы по гидрогелям разных типов, особенно супернабухающим, которые привлекательны с разных точек зрения. Фундаментальные исследования по физике гидрогелей, особенностям их набухания (например, явлениям неустойчивости формы), закономерностям коллапса таких систем, теоретическому описанию их поведения в зависимости от всего комплекса внешних воздействий (механических, электрических и др.) заслуживают несомненного внимания. Практические аспекты еще больше усиливают интерес к этим системам, которые весьма перспективны, например, для повышения влагоемкости почв, создания организованных водных систем, консервации жидких отходов.

В физике полимеров актуальными остаются вопросы, связанные со структурой полимеров, в первую очередь стеклообразных и аморфно-кристаллических смесей полимеров и систем, образующих мезофазы. Сюда тесно примыкают кинетические проблемы структурирования и микроструктурирования. В настоящее время имеются предпосылки для успешного изучения кинетики различных фазовых переходов в полимерных системах (фазового разделения и спинодального распада, переходов клубок — глобула, жидкокристаллического упорядочения, образования частично крис-

таллической фазы, стеклования, микрофазного расслоения), а также для изучения влияния условий, при которых происходит фазовый переход, на свойства конечного продукта. К этому кругу вопросов тесно примыкает изучение структуры межфазных границ, а также особенностей структуры наполненных и армированных полимеров.

Проблема стеклования и кинетики релаксации в стеклах представляет особый интерес. Сейчас стало ясно, что важнейшие особенности кинетики стеклования являются общими для любых стекол и слабо зависят от химической природы составляющих стекло частиц (атомов, молекул, макромолекул). Поэтому экспериментальные и теоретические исследования стеклования полимеров имеют общенаучное значение и тесно смыкаются с бурно развивающейся физикой неупорядоченных систем. В то же время макромолекулярные объекты имеют свои специфические особенности при стекловании, и идентификация этих особенностей, выяснение их роли в процессах стеклования твердых тел — предмет растущего интереса. Еще меньше сегодня ясно строение и поведение стеклообразных микрофаз в полимерных смесях, особенно в условиях частичной растворимости компонентов на границе раздела фаз.

Недавно синтезированы макромолекулы восьмилучевых полимерных звезд. Такие макромолекулярные образования организуются в высокосимметричную структуру — двойную алмазную решетку, в которой тетраэдры служат элементами кубической решетки. Продолжается поиск других необычных морфологических структур на основе, например, полисилоксанов, поликластеров и т. д. Сейчас трудно предсказать, какими новыми свойствами могут обладать необычные морфологические макромолекулярные образования, однако ясно, что такой научный поиск необходим.

В последние годы появляется все большее число макромолекул, образующих мезофазы. К их числу относятся даже некоторые весьма гибкие макромолекулы, такие как полидизтил- и полидипропилсилоксаны. Причины, порождающие образование мезофаз из сравнительно простых и гибких макромолекул, представляют значительный интерес.

Остается актуальной проблема структуры и динамики аморфной фазы в кристаллизующихся полимерах, границ полимерных кристаллов. Ее решение особенно важно сегодня в связи с появлением новых частично кристаллических инженерных пластиков.

Много нерешенных проблем в физикомеханике полимеров. Теоретические расчеты и экспериментальные измерения упругих констант полимерных кристаллов достигли сегодня высокой степени совершенства. Однако остается нерешенной проблема теоретической оценки механических свойств поликристаллов.

Другим важным аспектом проблемы является выяснение природы ударной прочности и вязкости, многоцикловой усталости конструкционных полимерных материалов, а также природы пластичности стеклообразных и частично кристаллических полимеров.

В физике полупроводников в последние годы большое внимание уделяют исследованиям суперрешеток — принципиально нового, не созданного природой, типа полупроводниковых веществ. Выращивая последовательно друг на друге тонкие кристаллы одинаковой толщины (10–100 Å) различных полупроводников (двух и более), в итоге получают материал, существенно отличный от составляющих его компонентов. Электроны в таких системах движутся двумерно и несимметрично, что приводит, например, к необычным эффектам типа падения электрического сопротивления с ростом приложенного напряжения.

Уместно вспомнить, что смеси полимеров, в первую очередь, дублок- и триблок-сополимеры, способны образовывать суперрешетки самопроизвольно. Можно надеяться использовать эту способность регулярного фазообразования полимеров для образования суперрешеток из ди- или триблок-сополимеров, блоки которых обладают различными полупроводниковыми свойствами. Синтез таких сополимеров, процессы образования суперрешеток из них и исследование электрических свойств полимерных суперрешеток могут привести к новым, неожиданным эффектам.

Изучение электрических свойств полимеров привело недавно к новым результатам — детектированию в слегка окисленном атактическом полипропилене выше его T_c очень низкого (близкого к нулевому) электросопротивления в некоторых локальных точках образца. Существование эффекта было подтверждено работами различных групп исследователей. Возникают даже идеи о существовании высокотемпературной сверхпроводимости в полимерных системах. Однако природа явления остается пока неясной, и проведение дальнейших исследований в этом направлении и расширение круга объектов представляет несомненный научный интерес.

II. АКТУАЛЬНЫЕ НАУЧНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ПОЛИМЕРНОГО МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЯ

Движущей силой многих современных направлений в химии и физике ВМС является стремление к созданию полимерных материалов с уникальным комплексом свойств для использования либо в экстремальных условиях, либо для нетрадиционных областей применения. Все без исключения крупнейшие международные и национальные программы развития человеческой цивилизации — энергетическая и продовольственная, освоение океана и ближнего космоса, противостояние людей надвигающейся экологической катастрофе, борьба с эпидемиями и многие другие проблемы не могут быть решены без создания новых материалов, среди которых полимерные играют огромную и систематически возрастающую роль. Современное полимерное материаловедение перешло сегодня в качественно новый этап развития, для которого характерно возрастание в общем объеме производства и потребления полимерных материалов доли наукоемких так называемых «высокоинтеллектуальных» материалов, требующих повышенного уровня знаний и квалификации разработчиков на всех стадиях создания материала. Примерами наукоемких материалов сегодня могут служить современные конструкционные и ударопрочные пластики.

Полимерное материаловедение все в большей мере становится органической частью общего материаловедения, интегрируясь с ним и черпая из него. Отсюда характерное увлечение представителей классических материаловедческих направлений, например металлофизиков, проблемами полимерных материалов. Этот плодотворный процесс привнес в науку о полимерных материалах новые методы, идеи и представления.

Возрастает интерес к сложным, комбинированным материалам, состоящим из компонентов различной природы. Типичными представителями таких материалов являются многослойные пленки и мембранны, включающие в свою микроконструкцию органические полимеры, металлы, керамику. К этому же классу систем относятся современные армированные пластики (*advanced composites*), синтетические пены и материалы, заменяющие кости, сосуды, сердечные клапаны в организме человека и многие другие.

Попытаемся рассмотреть некоторые из материаловедческих задач, стоящих сегодня перед полимерной наукой.

Химические задачи полимерного материаловедения. Синтез макромолекул нового химического строения продолжает оставаться краеугольным камнем в развитии полимерного материаловедения. Ведущие фирмы мира продолжают поиск новых химических структур несмотря на то, что все меньшая доля вновь синтезированных объектов становится в последующем реальным материалом промышленного масштаба.

Синтез макромолекул остается необходимым, но определенно недостаточным компонентом в полимерном материаловедении. Вновь синтезированные структуры должны обладать рядом новых целевых свойств (механических, электрических и др.), достаточной теплостойкостью, перерабатываемостью и т. п. Только такая комбинация структуры и свойств новых полимеров имеет перспективу в острой конкурентной борьбе за новые области применения.

В ближайшее десятилетие несомненно будет продолжаться рост объемов и расширение номенклатуры пластмасс (прежде всего теплостойких), а также специальных полимеров. Поэтому поиск новых мономеров и усо-

вершенствование существующих процессов получения полимеров, улучшение качества продуктов (ММ, ММР, структурная регулярность и т. д.) будут оставаться важными в работе синтетиков и технологов.

Перспективным материаловедческим направлением несомненно остается создание полимерных оптических волноводов. Сегодня волокна из ПММА по оптическим характеристикам уступают кварцевым волокнам. Это, несомненно, связано со множеством молекулярных дефектов в ПММА, что в большой мере обусловлено свободно-радикальной природой процесса полимеризации. Однако не следует исключать возможность получения ПММА ультравысокого оптического качества методом полимеризации с переносом группы. Уже сейчас ясно, что оптические волноводы из ПММА или других органических полимеров при некотором улучшении их прозрачности будут заметно дешевле и выгоднее для оптических сетей небольшой протяженности.

Сохраняют, по-видимому свое научное значение химические проблемы крупнотоннажных полимеров.

В связи с развитием новейших отраслей современной техники по-прежнему актуальной является разработка более совершенных методов синтеза элементоорганических и неорганических олигомеров и полимеров — полисилоксанов, полисилазанов, полидиорганосиланов и элементосодержащих кремнийорганических полимеров с линейным, циклическим, спироциклическим и циклоценным (лестничным) строением повторяющихся звеньев. Такие олигомеры и полимеры находят все возрастающее применение в качестве связующих для термостойких композиционных материалов, клеев, покрытий.

С развитием современной техники, со стремлением к микроминиатюризации ориентированные системы на основе ПАВ стали рассматриваться как перспективные материалы и функциональные элементы для микроэлектроники, информатики, медицины и биологии, для создания сенсоров, солнечных батарей и т. д. Очевидно, что в этих областях наряду с высокой степенью структурной организации нужна достаточно высокая термическая и химическая стабильность, которую можно достичь с помощью специально построенных полимерных систем, создаваемых, например, на основе поверхностно-активных мономеров (ПАМ).

К настоящему времени синтезирован широкий круг ПАМ с различной структурой гидрофильной и гидрофобной части молекул и различной локализацией полимеризующихся или вступающих в поликонденсацию групп, что позволяет получать ультратонкие полимерные пленки. Областями практического применения ультратонких полимерных систем на основе ПАМ могут быть: покрытия на различных материалах, полученные как путем адсорбционного нанесения ПАМ, так и методом Лэнгмюра — Блодже с последующей полимеризацией. При этом возникают возможности модификации поверхностных свойств материалов (гидрофильности, несмачиваемости и т. д.), создания ультратонких функциональных слоев (резистов для изготовления интегральных микроэлектронных схем, полевых транзисторов, миниатюрных сенсоров, фотодиодов, мембранных электродов и др.).

Одним из перспективных процессов в материаловедении является также химическое или реакционное формование. Это в сущности современный вариант изготовления изделий из реакционноспособных олигомеров, и он находит применение в промышленности пластмасс, особенно для получения массивных и крупногабаритных изделий, изготовления покрытий и оболочек, а в последнее время и в промышленности резин вплоть до изготовления шин.

Среди других проблем, связанных с развитием этого направления можно выделить изучение особенностей неизотермических реакций, включая условия, близкие к тепловому взрыву; разработку физических моделей, позволяющих оценивать качество изделий, в частности эволюцию внутренних напряжений при синтезе и получении изделий; изучение реологии полимеризующихся систем как основы для анализа технологических операций смешения и формования изделий сложных конфигураций.

Упомянутое ранее открытие новых катализаторов метатезиса для полимеризации циклоолефинов может дать новые возможности получения блок-сополимеров, в том числе содержащих электропроводящие блоки. С другой стороны, это может позволить полимеризовать циклоолефины, содержащие гетероатомы в циклической структуре, например получать полимеры 7-оксанорборнена, которые представляют интерес как линейные аналоги краун-эфиров.

Представляют интерес исследования направленного пиролиза элементоорганических (прежде всего кремнийорганических) олигомеров и полимеров, а также высоконаполненных систем на их основе с целью создания высокопрочных, нехрупких керамических материалов.

Композиты, конструкционные (инженерные) пластики, смеси и сплавы. Создание полимерных композиционных материалов (ПКМ) является важным сегодня и еще более существенным направлением в химии, физике и технологии полимеров в будущем. ПКМ – это класс веществ, состоящих из различных двух- и многофазных систем, где одной из непрерывных фаз является органический полимер (матрица). Специфика химического строения полимерной матрицы в ПКМ, особенности ее структуры и свойств, химии и технологии получения и методов исследования позволяют рассматривать материаловедение ПКМ как новую область, получившую развитие на основе существующих представлений и методов науки о полимерах, химии и физики поверхности, химии и технологии волокон и ряда других.

Важным направлением в химии матриц для ПКМ является синтез полимеров в присутствии наполнителя. Наполнитель в таком процессе может играть роль регулятора скорости химической реакции, влиять на ММ, ММР и микроструктуру образующегося полимера и в конечном счете на характеристики матрицы ПКМ. Успехи в этом направлении сулят упрощение технологии получения ПКМ, повышение их качества и помочь в решении экологических проблем.

Существующие сегодня направления работ в области ПКМ следуют рассматривать в двух аспектах. Первый – достижение рекордных характеристик материала (максимальной удельной прочности, жесткости, теплостойкости и пр.). Развитие этого направления требуется главным образом для специальных отраслей техники. Прогресс здесь непосредственно связан с улучшением качества ПКМ за счет повышения модуля упругости волокон, статической и динамической прочности, вязкости разрушения, вибростойкости ПКМ при низкой плотности изделий и т. д. Второй аспект связан с задачами резкого снижения стоимости изделий из ПКМ за счет применения дешевого, недифицитного сырья и усовершенствованных технологий.

Современная специальная техника немыслима без конструкционных высокопрочных ПКМ, армированных стеклянными, углеродными, керамическими и полимерными органическими волокнами.

Перспективным классом армирующих материалов является круг углеродных волокон, лент и тканей из них. Задача ближайшего будущего – достижение прочности для таких волокон порядка 10 000 МПа и модуля упругости 1000 ГПа. Другое направление – разработка дешевых пековых и полимерно-пековых углеродных волокон, в том числе и из мезофазных систем со средним уровнем механических свойств. Можно ожидать достижения для волокон из жесткоцепных органических полимеров прочностей 7–10 ГПа и модулей упругости 300–450 ГПа при плотности $\sim 1,4$ г/см³; а для ПЭ-волокон – прочности 10 ГПа при модуле упругости около 200 ГПа и плотности < 1 г/см³.

К материаловедению ПКМ тесно примыкает задача использования угольных волокон не для механического усиления КМ, а для проведения в них (или на их поверхности) некоторых процессов высокотемпературной химии. Многие реакции высокотемпературной химии сегодня проводятся в графитовых тиглях. Осуществление реакций в (на) волокне, в принципе, позволяет получать конечные продукты сразу в виде проволоки или волокна, т. е. избежать трудной стадии формования таких материалов. Получение, например, сверхпроводящих сплавов (через соответствующие кар-

биды металлов) в форме волокна сулит интересные технические перспективы. Этот путь предложен американским ученым Дж. Экономи и может стать важной частью технологии будущего.

Важным направлением научного поиска является разработка новых эффективных путей получения других типов неорганических волокон (карбида кремния, окислов металлов и пр.) из полимерного и органического сырья. Здесь, по-видимому, перспективны процессы формирования макромолекул и волокон из растворимых низкомолекулярных металлоорганических соединений, т. е. использование технологии органических волокон для получения неорганических.

Хорошо известно, что высокая динамическая прочность, стойкость к удару и распространению трещин достигнута для ПКМ на основе органических жесткоцепных волокон (ароматических ПА, полиэфиров и пр.), а также на основе некоторых гибкоцепных (полиэтилен) полимеров. В этой области уже достигнуты большие успехи в лабораторном масштабе. Эти результаты и экономические соображения привели исследователей к идею комбинирования в одном материале или конструкции волокон различного типа — разработке так называемых гибридных ПКМ. В перспективе интерес представляет возможность широкого варьирования различных видов волокон в материале, а также создания деталей и конструкций с переменными в пространстве механическими свойствами; необходимы также работы по оптимизации полей напряжений и деформаций в изделии.

Нуждаются в дальнейшей разработке вопросы теории упрочнения и разрушения дисперсно-наполненных ПКМ. Сложность структуры ПКМ, недостаточная воспроизводимость условий их приготовления часто приводят к неоднозначности получаемых результатов. Попытки достичь высокой жесткости ПКМ в сочетании с прочностью и ударной вязкостью привели к изобретению новых технологических приемов. К их числу относятся инкапсулирование наполнителей в эластомерные оболочки, химическая прививка, применение сложных аппретирующих систем или, наоборот, дезаппретирующих добавок и др.

Переработка отходов — одно из новых направлений в ПКМ. Использование полимерных отходов для наполнения, иногда армирования или модификации матриц ПКМ позволяет одновременно решать ряд проблем материаловедения и экономики. Однако здесь сделаны лишь первые шаги, и можно предположить, что разработка технологических процессов получения ПКМ, включающих отходы, будет наиболее трудной стадией на этом пути.

В области конструкционных полимерных материалов в последнее десятилетие особенно бурно возросло применение полимерных смесей и сплавов. Научные исследования и технология развивались параллельно и большинство современных конструкционных пластиков представляют собой смеси и сплавы.

Научные задачи, возникающие в этой области, весьма разнообразны. Проблемы взаимной растворимости компонентов и анализа фазовых диаграмм к настоящему моменту достаточно хорошо разработаны. Определенные успехи достигнуты в анализе кинетики фазового разделения. Однако влияние морфологии гетерогенных смесей на их механическое поведение, в первую очередь пластичность, ударные и усталостные характеристики остаются весьма актуальными. Не менее важны вопросы адгезионной связи на границе раздела фаз. Умение измерить прочность адгезионной связи и оптимизировать ее, умение управлять фазовой морфологией гетерогенных смесей — крайне актуальные задачи ближайшего будущего.

Гетерогенность — необходимое условие достижения стойкости к удару полимерных смесей. Однако для многих применений требуются оптически (и зачастую механически) гомогенные смеси полимеров. И в этой связи улучшение совместимости различных полимеров и разработка приемов, препятствующих микрофазовому расслоению — актуальные проблемы полимерного материаловедения.

Еще совсем недавно считалось, что полимеры должны образовывать в основном несовместимые смеси. Однако сегодня уже существуют сотни

совместимых или частично совместимых смесей, и можно прогнозировать стремительный рост их количества в общем потоке исследуемых и уже применяемых на практике полимерных смесей.

Идея получения совместимых смесей основана на «включении» сильных, часто специфических взаимодействий, таких как водородные связи или поликомплексы, например, между смешиваемыми макромолекулами, за счет введения в последние соответствующих химических группировок. Поиск и организация наиболее эффективных взаимодействий между сегментами макромолекул смеси, количественный анализ этих взаимодействий, предсказание взаиморастворимости, синтез макромолекул с нужными группами и изучение свойств взаиморастворимых смесей — новое, бурно развивающееся направление современной полимерной науки.

ЖК-полимеры. Среди активно развивающихся направлений в области физикохимии полимеров стремительное развитие получили исследования, связанные с созданием и изучением ЖК-полимеров. Несмотря на то что первые шаги в этой области были предприняты в 30—40-х годах, когда в работах Оизагера и Флори впервые теоретически была отмечена возможность формирования лиотропных полимерных ЖК-систем, составленных из макромолекул, имеющих форму стержней, наиболее активные экспериментальные усилия были предприняты значительно позже. В 70-х годах в связи с успехами синтеза разнообразных ароматических ПА была обнаружена способность этих ВМС переходить в ЖК-состояние. Использование анизотропии ЖК-состояния позволило получить высокопрочные высокомодульные термостойкие волокна типа Кевлар на основе поли-*n*-бензамида и поли-*n*-фенилентерефталамида.

Одновременно с работами в области лиотропных систем быстрыми темпами развиваются исследования и в области термотропных полимеров, одним из стимулов развития которых явились успехи в области синтеза и практического использования низкомолекулярных жидких кристаллов в устройствах отображения информации и в электронике.

Предложенный впервые в СССР в 1973—74 годах метод создания термотропных, гребнеобразных полимеров, основанный на введении молекул низкомолекулярных жидких кристаллов или их фрагментов (мезогенных групп) в состав боковых цепей, а также способ введения мезогенных групп в состав основных цепей молекул, реализованный в 1974 г. итальянскими учеными, вызвали лавинообразный поток научных публикаций, описывающих самые разнообразные способы сочетания в макромолекулах гибких фрагментов и мезогенных групп в виде стержней, дисков, крестообразных мезогенных фрагментов, соединенных различным образом и охватывающими практически все известные классы химических соединений. Число синтезированных термотропных ЖК-полимеров и сополимеров уже достигает тысячи. Работы по синтезу ЖК-полимеров в настоящее время значительно опережают исследования их структуры и физико-механических свойств.

Полимеры, состоящие из макромолекул с мезогенными группами в основной цепи, интересны как для получения новых волокон, так и в качестве конструкционных полимеров и самоармирующихся пластиков. Последние уже заявили о себе в виде весьма перспективного набора ароматических полиэфиров, из которых уже созданы высокопрочные материалы Бектра и Ксидар, характеризующиеся прочностью 210 МПа, модулем упругости до 11 ГПа и очень низким коэффициентом линейного расширения (10^{-6} К $^{-1}$). Здесь уместно также упомянуть волокна из полифенилбензо-*bis*-тиазолов, имеющих модуль упругости 45 ГПа.

Актуальны исследования ЖК-полимеров по установлению закономерностей формирования нематической, смектической и холестерической мезофаз в зависимости от молекулярного и химического строения цепей, изучение их структуры с целью построения молекулярной и надмолекулярной модели ЖК-полимеров с мезогенными группами в основной цепи и боковых ответвлениях. Важны также выявление специфики ЖК-упорядочения в полимерных веществах, теоретическая и экспериментальная разработка вопросов, связанных с описанием деформационного поведения ЖК-

эластомеров, изучение кинетики и механизма структурных превращений ЖК-полимеров под действием внешних механических, электрических и магнитных полей.

Самостоятельной проблемой сегодня является создание и управление технологией переработки обычных термопластов с добавками ЖК-полимеров. Уже ясно, что в ряде случаев удается благоприятно изменить реологическое поведение термопластов и одновременно получать армированные полимерные композиты.

Круг ЖК- и других мезофазных полимеров охватывает сейчас и элементоорганические макромолекулы, например полифосфазены, полисилоксаны и полисилианы. Это показывает, что ЖК-состояние широко распространено и много неожиданного здесь еще ждет исследователей.

Что касается гребнеобразных ЖК-полимеров, то научный и практический интерес к их исследованиям диктуется возможностью создания качественно новых функциональных полимерных материалов, таких как управляемые и пассивные оптические элементы, спектрозональные фильтры и отражатели, циркулярные и линейные поляризаторы, фазовые линзы, термочувствительные и фотохромные индикаторы, преобразователи изображений и управляемые транспаранты, ЖК-сегнетоэлектрики и пьезоэлектрики, управляемые мембранные и системы записи и считывания информации. Полимерные жидкые кристаллы при определенной структуре мезофазы представляют интерес и как материалы для нелинейной оптики.

Обладая всем комплексом чисто полимерных свойств, в частности способностью образовывать пленки, жидкые кристаллы одновременно способны возбуждать вторую и третью гармоники оптических колебаний. Это делает их перспективными для целей голограммии и родният с полисопряженными системами, которые тоже пытаются сегодня использовать для регистрации и считывания оптической информации. В этой области, как нигде, тесно переплетаются проблемы молекулярного дизайна, физики и структуры твердых полимерных тел, оптики и оптоэлектроники.

Полимеры с сопряженными связями. Область переживает сейчас второе рождение в связи с синтезом высокомолекулярного полиацетилена и его производных с хорошо охарактеризованной структурой, а также поли-пиррола, полианилина, политиофена и других систем. В настоящее время не представляет принципиальных трудностей получение в лаборатории полимерных волокон и пленок (некоторые из них уже реализованы в промышленном масштабе) с проводимостью после допирования на уровне меди и серебра. Нет сомнений, что эта область науки о полимерах будет продолжать привлекать внимание исследователей многих лабораторий практически во всех промышленно развитых странах.

Несколько менее однозначно выглядит область полимерных ферромагнетиков. После сенсационных публикаций середины 80-х годов советских ученых об обнаружении ферромагнетизма у производных полидиацетиленов со стабильными свободными радикалами, во многих лабораториях пытались повторить эти результаты, но пока надежных данных получить так и не удалось. Поиск путей синтеза полимерных ферромагнетиков продолжается, и остается надеяться, что в конце концов он приведет к успеху.

Создание жидких кристаллов электропроводящих и других функциональных полимеров для разнообразных применений в технике представляют собой пример молекулярного дизайна цепей. Сегодня все активнее реализуются подходы, в которых тонкую структуру системы, начиная с первичной структуры макромолекулы и, далее, вторичную и третичную структуры пытаются построить, исходя из конечной прикладной функции. Заслуживают внимания в этой связи не только полимерные сенсоры, но и преобразователи энергии, элементы солнечных батарей, а также попытки построить элементы молекулярной памяти для компьютеров шестого и седьмого поколений.

Синтетические молекулярные системы, использующие запись и считывание информации на молекулярном уровне (подобно тому, как это происходит с макромолекулами ДНК и РНК), когда они будут созданы, будут означать качественно новый прорыв в информатике. Молекулярная запись

информации в виде последовательности атомов и их групп на материальной цепочке диаметром в несколько ангстрем, по-видимому, самое совершенное, что могло бы быть достигнуто, и наиболее смелые химики-дизайнеры приступили к решению такой задачи.

Медико-биологические полимерные материалы. К новым областям макромолекулярного дизайна относится бурно развивающиеся исследования в области медико-биологических полимеров. Сегодня это прочно утверждшее себя научное направление на стыке органической и макромолекулярной химии, биохимии, биофизики, фармакологии и медицины. Это разработка макромолекулярных лекарственных препаратов с целевым транспортом в мишень организма, обладающих пролонгированным действием и менее токсичных, чем их низкомолекулярные аналогии. Макромолекулярные терапевтические системы с контролируемым введением активного начала — это, по-видимому, один из магистральных путей фармакологии и лекарственной терапии XXI века. Полимерные носители и регуляторы здесь могут иметь очень важное значение; поскольку позволяют снизить общую концентрацию химиотерапевтических веществ в организме, способствуя тем самым задаче экологического очищения внутренней среды организма в условиях, когда человек сегодня до предела сенсибилизирован различными химическими препаратами. Наиболее впечатляющие успехи последнего десятилетия здесь — это первые успешные попытки создания искусственных вакцин, разработка биоспецифических полимерных сорбентов для детоксикации организма, создание высокоспецифических полимерных матриц и покрытий для разделения иммуноактивных клеток, специальных полимеров и покрытий, совместимых с кровью и тканями живого организма, разработка систем дозирования лекарственных препаратов, работающих с обратной связью (полимерные дозаторы инсулина, чувствительные к уровню сахара в крови). Мировое производство полимерных материалов и изделий для биомедицинского применения занимает сейчас одно из высоких мест после полимерной тары и упаковки и электротехнических применений.

Химия покрытий и пленок. Это традиционная область технологии полимерных материалов. И здесь за последние годы начало формироваться новое направление — химия и физика тонких и сверхтонких полимерных слоев на подложках. Речь идет о бурном развитии плазмохимической технологии нанесения тонких слоев с регулируемой структурой и функциональными группами. Структура и свойства поверхностных слоев в ряде случаев радикально отличаются от структуры и свойств того же материала в блоке. Переход к плазмонполимеризованным органическим и металлоорганическим полимерным слоям дает совершенно новые возможности для микрозлектроники и гетерогенного катализа.

Здесь же следует упомянуть интенсивно развивающуюся в последние три — пять лет физическую химию тонких пленок Лэнгмюра — Блодже. Монослойные и мультислойные полимерные пленки представляют собой новые типы мембран, сенсоров, фотохимических преобразователей, катализаторов и тому подобное.

Полимерные мембранны. Мембранны для разделения газообразных и жидких сред, очистки и концентрирования тех или иных веществ — самостоятельное бурно развивающееся направление химии и технологий полимеров. Мембранный модуль в составе интегрированной технологической схемы химического или биотехнологического процесса представляется необходимой составной частью экономически чистого производства. Ключевым элементом такого модуля является селективно проницаемая мембрана — конструкция, однородная или асимметричная, однокомпонентная или многокомпонентная, выполненная в виде плоских элементов или поливолоконных модулей, но, как правило, основанная на материале макромолекулярной природы. Процессы обратного осмоса, микрофильтрации, ультрафильтрации, диализа, электродиализа и газоразделения — вот обширное поле применения разнообразных мембран. Родилось новое направление — мембранныология, и нет сегодня ни одного крупного форума полимерщиков, где бы не обсуждались проблемы разработки полимерных мембран, их струк-

туры и принципов функционирования. По некоторым оценкам в 90-х годах предполагается ежегодное мировое увеличение продажи мембранных установок на 20–25%, т. е. удвоение каждые 4 года. При этом опережающими темпами будет расти применение мембранной технологии в газоразделении, электрохимических источниках тока и в биомедицинской промышленности (искусственная почка, система сердце – легкие, искусственная кожа, системы для контролируемой подачи лекарственного начала). Главное, однако, это уникальная роль мембранной технологии для улучшения экологической обстановки и разработки современных ресурсосберегающих (извлечение ценных примесей, создание замкнутых циклов и т. п.) и энергосберегающих технологий в химической, нефтехимической, металлургической, целлюлозно-бумажной и медицинской отраслях промышленности.

Перспективной представляется разработка новых полимеров для мембран и новых комбинаций полимеров для композиционных мембран. Химическая структура самой цепи при этом выступает как элемент необходимый, но далеко не достаточный, ибо мембрана – это конструкция, в которой необходимо уметь создать нужную надмолекулярную структуру, микро- и макропористость, модифицировать поверхностные свойства, регулировать тип и характер распределения зарядов на поверхности и внутри мембраны, строить слоистые конструкции из различных полимеров или комбинировать органические и неорганические мембранны и т. д.

Если говорить о фундаментальных работах в этой области, то здесь еще далеко не выяснено, какие именно параметры молекулярной и надмолекулярной структуры связаны с высокой селективностью; какова роль свободного объема, мезофазной структуры, локальных взаимодействий, молекулярной растворимости и т. п. в сложной картине функционирования полимерной мембранны, т. е. необходимо понять механизм явлений переноса через такие мембранны.

Интерес исследователей в этой области концентрируется сегодня вокруг проблем создания композиций с участием гетерофазных и гомофазных включений в матрицу, способных к облегченному и активному транспорту определенных компонентов разделяемых смесей путем комплексообразования, в том числе за счет водородных связей. Перспективным выглядит и создание полимерных систем с функциональными фрагментами и ПКМ, компоненты которых способны менять свойства переноса под воздействием внешних полей; создание псевдожидких мембран с высокой проницаемостью и селективностью, обусловленной введением веществ – переносчиков целевого компонента смеси.

Перспективной задачей в этой области является также разработка тонкослойных, часто гидрогелевых мембранных систем, работающих по принципу мембран клеток живых организмов, для тонкого регулирования процессов ионного и молекулярного обмена в различных датчиках, сенсорах и других устройствах биомедицинского применения.

Наконец, вырисовывается и еще одно перспективное направление – создание химических реакторов мембранныго типа, т. е. таких систем, где возникла бы возможность одновременного проведения химической реакции на поверхности мембранны с последующим разделением продуктов.

III. ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ НОВЫХ МЕТОДОВ ЭКСПЕРИМЕНТА

Открытие и распространение новых экспериментальных методов исследования всегда дает мощный импульс фронту научных работ. Сегодня такими мощными новыми методами для химии и физики являются сканирующая туннельная микроскопия и микроскопия атомных сил, хроматография в критическом режиме, двумерная и находящаяся на выходе трехмерная спектроскопия ЯМР высокого разрешения для изучения динамики макромолекулярных цепей, стереокомпьютерография и конформационная визуализация с помощью быстродействующих персональных компьютеров, компьютерное моделирование структуры динамики и химических процессов в макромолекулярных системах.

Эффективным методом (Нобелевская премия по физике 1986 года) является сканирующая тунNELьная микроскопия (СТМ) и ее модификация – спектроскопия атомных сил (САС).

Оба метода представляют собой концептуально новый подход к микроскопии, и появление приборов СТМ и САС знаменует собой новую эру микроскопии.

Эти методы привлекли внимание физиков, инженеров и биологов и дали много интересной информации о структуре полимерных поверхностей.

Методом СТМ сегодня уже получены атомные картины поверхностей различных угольных волокон, электропроводящих полимеров (полипиррола, политиофена), электропроводящих комплексов графита. Использование техники тонких проводящих металлических реплик позволило получить атомную картину некоторых биологических систем, например комплексов рек А-ДНК, покрытых тонким слоем электропроводящего сплава, фосфолипидного слоя и кристалла фермента. Для биологических и ряда химических применений СТМ следует отметить возможность проведения анализа в воде и в других жидкостях, что дает, например, возможность анализа поверхности электродов в электрохимических процессах.

Методом СТМ недавно были получены картины поверхности мембран с пленкой Лэнгмюра – Блодже на поверхности.

Метод САС гораздо лучше подходит для исследования органических и биологических систем. Так, этим методом получены атомные картины за-полимеризованного монослоя *n*-(2-аминоэтил)-10,12-три-изоцианамида.

Главным действующим лицом в методах СТМ и САС является компьютер, который превращает туннельный ток или поле перемещений иглы в изображение. Лишь достаточно мощный, стабильный компьютер позволяет сегодня эффективно использовать эти новые методы. Оба метода, особенно САС, находятся на самой начальной стадии развития, и их применение будет быстро расширяться. Следует ждать также дальнейшего усовершенствования самих методов.

Некоторые мощные современные методы вряд ли можно назвать новыми, однако их применение в исследовании полимеров еще далеко не исчерпало себя. Среди них прежде всего следует отметить двумерную спектроскопию ЯМР.

Двумерная (2Д) спектроскопия ЯМР сегодня разделяется на корреляционную, *j*-спектроскопию и многоквантовую спектроскопию.

Наиболее широко 2Д-спектроскопия (в первую очередь корреляционная и *j*-спектроскопия) начинает находить применение для изучения структуры синтетических полимеров и биополимеров.

Этот метод позволяет выявлять сигналы групп ядер, между которыми существует спин-спиновое и диполь-дипольное взаимодействие и, как следствие, эффект Оверхаузера; устанавливать соответствие между химическими сдвигами различных типов ядер (например, ^1H – ^{13}C ; ^1H – ^{15}N и т. д.), которые связаны химической связью, выявлять в одном спектре синглеты, имеющие химические сдвиги, характерные для данной группы ядер, и мультиплеты, соответствующие взаимодействию данной группы ядер с другими ядрами; идентифицировать в спектре сигналы атомов, участвующих в различных динамических или обменных процессах (переходах между химически неэквивалентными положениями, перегруппировках, таутомерных превращениях, обратимых реакциях и других процессах молекулярной динамики).

Метод 2Д-спектроскопии ЯМР высокого разрешения в твердом теле наиболее перспективен для определения химического и стереохимического строения нерастворимых полимеров, при исследовании ориентации, соотношения фаз в одно- и многокомпонентных полимерных системах и молекулярных движений в твердом полимере. Последнее особенно информативно для изучения динамической ориентации в расплаве, для изучения структуры ЖК- и других мезофазных полимеров.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Нарисованная выше мозаичная картина состояния и развития науки о полимерах свидетельствует о том, что сейчас ломаются бывшие ранее устойчивыми границы между отдельными областями химии и физики полимеров. Бурно расцветают направления на стыке двух и трех областей, а сам исследователь часто начинает терять свою классическую принадлежность к сообществу синтетиков, физиков, физикохимиков, биологов или технологов. Профессионализм внутри какой-то области сегодня как никогда должен сочетаться с пониманием и проникновением в проблемы соседних областей.

Сегодня наука о полимерах, черпая из физики, биологии, классической органической и неорганической химии, а также химической технологии, не только обогащается сама, но и в значительной мере способствует развитию этих отраслей науки.

SOME PERSPECTIVE TRENDS IN MODERN POLYMER SCIENCE

Summary

The current state of the art in modern polymer science is reviewed and discussed. Some fundamental problems of chemistry and physics of macromolecules including current trends in the macromolecular synthesis and chemical reactions in polymers as well as physics of macromolecular systems are analysed. Main trends in polymeric materials are discussed also with the emphasis on properties and processing of composites, engineering plastics, liquid crystalline polymers, blends and alloys, conducting polymers, biomedical materials and polymeric membranes. The importance and usefulness of new experimental methods like scanning tunnelling microscopy, atomic force microscopy two-dimensional NMR-spectroscopy and others are stressed. The characteristic feature of the moment is that old borderlines in classical polymer science are changed rapidly and new promising frontiers are arising.