

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ СУПРАМОЛЕКУЛЯРНОЙ ХИМИИ В ХИМИЧЕСКИХ КУРСАХ ПЕДВУЗОВ

¹Волкова С.А., ²Рогатых С.В.

¹Государственный университет просвещения, Москва;

²Камчатский государственный университет имени Витуса Беринга

DOI 10.55959/MSU012444-6-2026-22-165-177

Введение

В настоящее время одной из ключевых проблем отечественного образования становится проблема систематического обновления содержания обучения «...с учётом современных достижений науки и технологий, изменений запросов обучающихся и общества, ориентированности на применение знаний, умений и навыков в реальных жизненных ситуациях» [1]. Это касается и высшей школы, в том числе, подготовки учителей химии в педагогических вузах. Стандарт высшего образования многие преподаватели вузов воспринимают как догму, норматив, который задаёт жёсткие требования к результатам обучения, регламентирует содержание и который категорически запрещено менять. Однако наука, имея свойства масштабности, фундаментальности, междисциплинарности, ориентированности на практику, быстро развивается. Одним из междисциплинарных направлений развития современной науки является супрамолекулярная химия.

Целью данной статьи является рассмотрение основных понятий новой бурно развивающейся науки – супрамолекулярной химии, которые необходимо освещать в химических курсах педагогических вузов.

Супрамолекулярная химия как наука своими корнями уходит в середину XVIII века – время зарождения современной химии. Началом новой науки – супрамолекулярной химии считают 1810 год, когда

Г. Дэви открыл гидрат хлора, а в 1823 году М. Фарадей определил его формулу. В 1893 году А. Вернер создал теорию координационных соединений. В 1894 году Э. Фишер разработал концепцию «ключ – замок» (молекулярное распознавание). В 1906 П. Эрлих ввёл в науку понятие «рецептор» (селективное связывание). В 1937 году К. Вольф для описания образований, возникающих при объединении координационно насыщенных частиц, ввёл термин «супермолекула». В 1961 году Н. Куртис получил первое макроциклическое основание Шиффа из ацетона и этилендиамина. В 1964 году В. Буш и В.-Г. Егер получили другие макроциклические основания Шиффа. Этап накопления фактов продолжился: в 1967 году Ч. Педерсен осуществил синтез краун-эфиров. В 1978 году Ж.-М. Лен ввёл в науку понятие «супрамолекулярная химия» и определил её как «химию молекулярных ансамблей и межмолекулярных связей» [2, 3]. Ж.-М. Лен в 2002 году писал: «Supramolecular chemistry aim at development highly complex chemistry systems from components interacting by non-covalent intermolecular forces» («Супрамолекулярная химия направлена на создание высокосложных химических систем из компонентов, взаимодействующих посредством нековалентных межмолекулярных связей») [2].

В 1983 году Д. Крам синтезировал сферанды и кавитанды. В 1987 году французскому учёному Жан-Мари Лёну и американцам Чарльзу Педерсену и Дональду Краму была присуждена Нобелевская премия по химии «за определяющий вклад в развитие химии макрогетероциклических соединений, способных избирательно образовывать молекулярные комплексы типа «хозяин – гость».

Предмет супрамолекулярной химии как междисциплинарной области знания. Супрамолекулярная химия началась с изучения селективного связывания катионов щелочных металлов природными и синтетическими макроциклическими и макрополициклическими лигандами, краун-эфирами и криптандами. Область исследований расширялась, что привело к осознанию молекулярного распознавания как новой области химических исследований, которая, поставив в центр внимания межмолекулярные взаимодействия и процессы в общем,

распространившись на целый спектр смежных областей, выросла в супрамолекулярную химию. Химия молекулярного распознавания создаёт также ядро химии систем «гость – хозяин» [4–7].

Таким образом, супрамолекулярная химия является химией межмолекулярной связи. Подобно тому как существует область молекулярной химии, основанной на ковалентных связях, существует и область супрамолекулярной химии, химии молекулярных ансамблей и межмолекулярных связей [8].

Супрамолекулярная химия изучает:

– *молекулы в составе коллективов*, а именно синтез ансамблей молекул, межмолекулярные взаимодействия, свойства молекул в коллективе, свойства коллектива как целого, а также анализирует и описание структуры коллектива, занимается созданием устройств на основе молекулярных коллективов (молекулярная электроника), имитацией и изучением биологических процессов, исследует влияние условий на коллективы молекул [8].

Согласно Ж.-М. Лену, супрамолекулярную химию можно разделить на две широкие, частично налагающиеся друг на друга области:

– *химию супермолекул* – чётко обозначенных олигомолекулярных частиц, возникающих в результате межмолекулярной ассоциации нескольких компонентов – рецептора и его субстрата (хозяина и гостя – по другой терминологии), строящихся по принципу молекулярного распознавания;

– *химию молекулярных ансамблей* – *полимолекулярных систем*, которые образуются в результате спонтанной ассоциации неопределённого числа компонентов с переходом в специфическую фазу, имеющую более или менее чётко обозначенную микроскопическую организацию и зависимость от её природы характеристики (например, клатраты, мембраны, везикулы, мицеллы) [9, 10].

Сравнение диапазонов молекулярной и супрамолекулярной химии. Классическая химия исследует структуру, свойства и превращения отдельных молекул и имеет дело в основном с реакциями, в ко-

торых происходят разрыв и образование валентных связей. В супрамолекулярной химии молекула играет роль, аналогичную той, которую атом выполняет в химии традиционной, то есть является как бы неделимой частицей в надмолекулярных процессах.

Объектом изучения супрамолекулярной химии служат почти исключительно невалентные взаимодействия: водородная связь, электростатические взаимодействия, силы Ван-дер-Ваальса и т. д.

Энергия невалентных взаимодействий на один-два порядка ниже энергии валентных связей, однако для невалентных взаимодействий характерно образование множественных связей и прочных, но гибко изменяющих свою структуру ассоциатов. Именно сочетание прочности и способности к быстрым и обратимым изменениям – важнейшее свойство всех биологических молекулярных структур: белков, ферментов, нуклеиновых кислот [11, 12].

Супрамолекулярная химия находит широкое применение в жизни человека. К её приложениям относятся применение в аналитической химии и технике супрамолекулярных соединений в технологических процессах, связанных с выделением и очисткой солей щелочных и щёлочноземельных металлов; в органической химии применяют межфазный катализ. Например, применение технологии молекулярного распознавания позволяет разработать катализаторы на основе макроциклических каликсареновых платформ.

Особый прогресс следует ожидать в области создания новых суперкомпьютеров. На примере искусственно созданных более простых молекул супрамолекулярная химия объясняет природу и механизм многих биологических процессов, протекающих в живых организмах. Применение катенанов и ротаксанов имеет большие перспективы при создании и конструировании сложных молекулярных приборов – супрамолекулярных устройств и молекулярных машин. Одна из самых интересных молекулярных машин – робот на основе ротаксанов, способный захватывать аминокислоты и связывать их друг с другом, имитируя синтез белка на рибосоме [13, 14]. Ж.- М. Лен пишет: «Самоорганизация, саморегуляция и способность к репликации (самовос-

производству) супрамолекулярных систем приближает их к биологическим молекулам... Не исключено, что однажды в лаборатории будет создана жизнь, основанная на других принципах, чем созданная природой. Воистину супрамолекулярная химия имеет фантастические перспективы!» [3, 5]. Эти приложения активно обсуждаются в новостях науки и техники, научно-популярных материалах, но они практически отсутствуют в рабочих программах педагогических вузов по химии.

Методическое обоснование места понятий о супрамолекулярной химии в системе подготовки учителя химии. Для чего будущему учителю химии изучать основы супрамолекулярной химии в вузе? Ответ на этот вопрос очевиден – чтобы дать обучающимся представление о новом направлении в науке. В школьном учебнике химии для 11 класса углублённого уровня [15] (авторы: В.В. Ерёмин, Н.Е. Кузьменко, А.А. Дроздов, В.В. Лунин, 2020) параграф 56 посвящён межмолекулярным взаимодействиям. На с. 262 вводится понятие о супрамолекулярных структурах – комплексах «хозяин – гость». На химических олимпиадах, в том числе Зональном этапе Всероссийской химической олимпиады, школьникам предлагают задачи, связанные с химией супермолекул.

Планируемые результаты обучения по модулю «Супрамолекулярная химия» таковы: обучающийся, освоивший модуль, должен обладать следующими *компетенциями*: ПК – 1 (Способен использовать полученные знания теоретических основ фундаментальных разделов химии при решении профессиональных задач). Обучающийся, освоивший модуль «Супрамолекулярная химия» должен *знать*: предмет супрамолекулярной химии; условия образования супермолекул и молекулярных ансамблей; современные концепции теоретической супрамолекулярной химии, в том числе концепции молекулярного распознавания, процессов адаптации и эволюции супрамолекулярных систем; принципы конструирования синтетических рецепторов; классификацию синтетических рецепторов (поданды, коронанды, криптан-ды, гемисферанды, циклофаны, халофаны и т. д.); должен *уметь*: об-

суждать физико-химические и биохимические аспекты применения синтетических рецепторов («хозяев», супрамолекулярных рецепторов, переносчиков, катализаторов); ориентироваться в современной литературе и вести дискуссию по супрамолекулярной химии; самостоятельно ставить задачи по созданию или практическому применению синтетических рецепторов. Должен *владеть*: навыками планирования и организации исследовательской деятельности обучающихся в учебных учреждениях.

Супрамолекулярная (надмолекулярная) химия – междисциплинарная область знания, синтезирующая достижения и терминологию целого ряда естественнонаучных дисциплин, таких как материаловедение, физическая химия конденсированных сред, химия координационных соединений, органическая химия, молекулярная биология и т. д. Уже этот неполный перечень дисциплин, лежащих в основе супрамолекулярной химии, говорит о том, что её обязательно нужно изучать в педагогическом вузе.

Химическая наука за последние десятилетия претерпела существенные изменения и далеко ушла от тех знаний, которые излагаются в школьных и вузовских учебниках. Новые тенденции в науке должны быть отражены в содержании вузовского образования, поскольку в становлении современной целостной картины мира очевидна особая роль супрамолекулярной химии в научно-техническом прогрессе на современном этапе и взаимосвязанных с ними явлениях. Например, в раздел, посвящённый химическим процессам, необходимо включить «сведения о некоторых достижениях в области супрамолекулярной химии, связанных с синтезом молекул и молекулярных ансамблей, способных к самоорганизации (подобно тому, как это происходит в живой природе), нековалентными взаимодействиями» [16–18]. Перед учёными-дидактами стоит далеко непростая задача обновления содержания вузовского обучения химии с учётом достижений супрамолекулярной химии.

Основные понятия и термины супрамолекулярной химии, которые необходимо включить как в основные, так и в специаль-

ные курсы химических дисциплин в педвузах. Для определения места супрамолекулярной химии в учебных планах и рабочих программах педагогических вузов мы учитываем отечественный и мировой опыт педагогической практики, а также многолетнюю экспериментальную работу авторов в качестве преподавателей химии. Полагаем, что включение основных идей и понятий супрамолекулярной химии в содержание вузовских курсов химии возможно в трёх направлениях:

1) Интеграция знаний о современных исследованиях и достижениях супрамолекулярной химии в содержание основных вузовских курсов химии (интегрированное образование).

2) Решение задач обновления содержания обучения с учётом достижений супрамолекулярной химии в системе дополнительного образования (факультативное образование).

3) Введение специального учебного предмета – супрамолекулярной химии (специальное образование). Такой опыт реализуется в некоторых вузах. Например, на химическом факультете МГУ им. М.В. Ломоносова аспиранты изучают дисциплину «Супрамолекулярная химия светочувствительных систем» (<https://www.chem.msu.ru/rus/aspirantura/educ-02-00-03/supramol.pdf>). В Казанском (Приволжском) федеральном университете в химическом институте им. А.М. Бутлерова эта дисциплина (модуль) включена в раздел «Б1.В.ДВ.10.02 Дисциплины (модули)» основной профессиональной образовательной программы 04.05.01 «Фундаментальная и прикладная химия (Физическая химия)» и относится к дисциплинам по выбору (<https://kpfu.ru/pdf/portal/oop2/472517.pdf>).

Мы проанализировали учебные планы и рабочие программы химических дисциплин двух вузов, в которых работаем преподавателями – Государственный университет просвещения (г. Москва) и Камчатский государственный университет имени Витуса Беринга, в которых реализуется программа бакалавриата по направлению 44.03.05 «Педагогическое образование» (с двумя профилями подго-

товки – биология и химия). Дисциплина «Супрамолекулярная химия» в рабочих программах дисциплин данных вузов отсутствует.

В рамках учебного плана в предметно-методическом модуле (по второму профилю «химия») читаются следующие дисциплины:

- на первом и втором курсах – общая и неорганическая химия,
- на втором и третьем – органическая химия,
- на третьем – химия окружающей среды,
- на третьем и четвёртом – аналитическая химия, методика преподавания химии, физическая химия,
- на четвёртом – коллоидная химия, прикладная химия и биохимия.

Изучение основ и включение основных понятий супрамолекулярной химии в вузе следует начать уже на первом курсе в дисциплине «Общая и неорганическая химия» при изучении типов химической связи, в частности понятия «координационная связь» и «водородная связь», а особенно – при изучении комплексных соединений. На втором курсе (дисциплина «Органическая химия») и четвёртом курсе (дисциплина «Биохимия») при изучении строения белков и нуклеиновых кислот химическую связь в них следует рассматривать с точки зрения супрамолекулярной химии.

Важно проследить логические связи между классическими и новыми направлениями химической науки. С этой целью в рамках Программы развития НИУ – НГУ (г. Новосибирск) разработан электронно-лекционный курс супрамолекулярной химии [8] (авторы: В.К. Хлёткин, Е.В. Болдырева, А.А. Малыгин).

Таблица

Примеры включения основных идей и понятий супрамолекулярной химии в содержание вузовских курсов химии

№	Название блока содержания по супрамолекулярной химии	Раздел в рабочей программе химической дисциплины педагогического вуза
1	Введение. От молекулярной к супрамолекулярной химии	<i>Общая и неорганическая химия.</i> Сравнение химии и биологии по отношению к двум параметрам: сложности

№	Название блока содержания по супрамолекулярной химии	Раздел в рабочей программе химической дисциплины педагогического вуза
		и разнообразию систем. Предмет супрамолекулярной химии. Молекулярная химия. Связь супрамолекулярной химии с молекулярной химией. Супрамолекулы и надмолекулярные системы. Рецептор, субстрат, хозяин, гость, лиганд. Основные свойства супрамолекулы: молекулярное распознавание, превращение и перенос
2	Основные понятия. Язык супрамолекулярной химии	<i>Общая и неорганическая химия. Биохимия.</i> Три ключевых понятия супрамолекулярной химии: селективное связывание (П. Эрлих, 1906), распознавание (Э. Фишер, 1894) и координация (А. Вернер, 1893). Нековалентные взаимодействия, молекулярное распознавание, селективное связывание, предорганизация, комплементарность, множественность связей
3	Природа супрамолекулярных взаимодействий	<i>Общая и неорганическая химия. Органическая химия.</i> Супрамолекулярные взаимодействия и их энергия связи (по Дж. В. Стиду и Дж. Л. Этвуду): • водородные связи 4–120 кДж/моль; • силы Ван-дер-Ваальса менее 5 кДж/моль; • катион π -взаимодействия 5–80 кДж/моль; • ион-ионные взаимодействия 100–350 кДж/моль; • π - π -стэкинг-взаимодействия 0–50 кДж/моль; • ион-дипольные взаимодействия 50–200 кДж/моль.

№	Название блока содержания по супрамолекулярной химии	Раздел в рабочей программе химической дисциплины педагогического вуза
4	Свойства краун-эфиров. Комплексообразование. Межфазный катализ	<i>Физическая и коллоидная химия.</i> <i>Общая и неорганическая химия.</i> Растворимость. Поведение растворов. Краун-эфир. Процесс комплексообразования «хозяин-гость». Катионное комплексообразование рецепторов: гетеро-краун-эфиров, подандов, криптандов, сферандов
5	Физико-химические методы исследования. Самосборка органических супрамолекулярных структур	<i>Физическая и коллоидная химия.</i> <i>Органическая химия.</i> <i>Биохимия.</i> Самосборка органических супрамолекулярных структур. Самосборка с помощью водородного связывания. Молекулярное распознавание – управление структурой органической фазы. Изменения фазового состояния при самоорганизации систем. Физико-химические методы исследования. Самораспознавание
6	Краун-эфир, содержащие только гетероатомы кислородного цикла	<i>Аналитическая химия</i> Применение в технологических процессах, связанных с выделением и очисткой солей щелочных и щелочноземельных металлов
7	Супрамолекулярная химия биологических систем	<i>Физическая химия.</i> <i>Органическая химия.</i> <i>Биохимия.</i> Супрамолекулярные взаимодействия, превращения, репликация. Саморепликация. Супрамолекулярная хиральность и самосборка. Молекулярные ансамбли, изменяющие структуру под внешним воздействием. Понятия аллостерия, кооперативность и саморепликация. Селективность и эффективность связывания субстрата рецептором

Заключение

Изучение основных понятий, терминов и принципов супрамолекулярной химии как нового направления в науке должно быть включено в содержание программ как базовых, так и специальных курсов химии для подготовки выпускников педагогических вузов.

При разработке рабочих программ химических дисциплин вузов необходимо учитывать логические связи между классическими и новыми направлениями в науке. При этом важно руководствоваться дидактическим принципом минимизации содержания, что означает рассмотрение нового содержания на наиболее типичных примерах, но путём их всестороннего анализа с применением мультидисциплинарных комплексов дидактических средств и технологий.

Процесс открытия нового знания при изучении основных понятий и терминов супрамолекулярной химии будет эффективным, если кроме лекционного курса будет предусмотрен лабораторный практикум в сочетании с цифровыми образовательными ресурсами и мультимедиа.

Важно обозначить требования к промежуточной и итоговой аттестации студентов, среди которых предусмотреть выполнение проектов и их защиту по тематике супрамолекулярной химии. В качестве итоговой аттестации должен быть зачёт по содержанию курса.

Полагаем, что для освоения основ супрамолекулярной химии студентам можно рекомендовать литературные источники [3, 9–14, 16–18].

ЛИТЕРАТУРА

1. Заседание Госсовета по вопросам совершенствования системы общего образования. 23 декабря 2015 года, 15:15, Москва, Кремль. – URL: http://doy31.edu5gor.ru/documents/profsouz/zasedanie_gossoveta_23.12.2015.pdf.
2. J.-M. Lehn «Supramolecular chemistry – From molecular recognition towards self-organization». Proceedings of the Robert A. Welch Foundation, p. 11-19, 1995.
3. Лен Жан-Мари. Супрамолекулярная химия. Концепции и перспективы. – Новосибирск: Наука. Сиб. предприятие РАН, 1998. – 334 с.

4. *Стид Дж.В.* Супрамолекулярная химия: в 2 кн. / Дж.В. Стид, Дж.Л. Этвуд. – М.: Академкнига, 2007. – URL: <http://lib.dvfu.ru:8080/lib/item?id=chamo:266019&theme=FEFU>. – 480 с.
5. *Лен Ж.-М.* Супрамолекулярная химия – масштабы и перспективы. Молекулы – супермолекулы – молекулярные устройства: нобелевская лекция. // Новое в жизни, науке и технике. Подписная научно-популярная серия. – М.: Знание, 1989. № 2. С. 3–36.
6. *Крам Д.Дж.* Получение молекулярных комплексов типа «хозяин-гость»: нобелевская лекция // Новое в жизни, науке и технике. Подписная научно-популярная серия. – М.: Знание, 1989. № 1. С. 13–28.
7. *Педерсен Ч.* Открытие краун-эфиров: нобелевская лекция // Новое в жизни, науке и технике. Подписная научно-популярная серия. – М.: Знание, 1989. № 1. С. 3–13.
8. *Хлёткин В.К., Болдырева Е.В., Малыгин А.А.* Супрамолекулярная химия. Электронно-лекционный курс. Разработан в рамках Программы развития НИУ – НГУ.
9. *Зоркий П.М., Лубнина И.Е.* Супрамолекулярная химия: возникновение, развитие, перспективы // Вестн. Моск. ун-та. Серия 2. Химия. 1999. Т.40. № 5.
10. *Акимова Т.И.* Основы супрамолекулярной химии: учебное пособие. В двух частях. Часть 1. – Владивосток: Издательство Дальневосточного федерального университета, 2021. – URL: <https://www.dvfu.ru/science/publishing-activities/catalogue-of-books-fefu/>.
11. *Фёдорова О.А.* Супрамолекулярная химия: учеб. пособие. – М.: РХТУ им. Д. И. Менделеева, 2010. – 204 с.– URL: www.twirpx.com/file/1320563.
12. *Порозова С.Е.* Введение в супрамолекулярную химию. – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2012. – 124 с.
13. *Пожарский А.Ф.* Супрамолекулярная химия // Соросовский образовательный журнал. 1997. № 9. С. 32–47.
14. *Волкова С.А., Паришутина Л.А.* Супрамолекулярная химия как источник обновления содержания школьного естественнонаучного образования // Педагогический журнал Башкортостана. 2018. № 2(75). С. 15–23.
15. *Ерёмин В.В., Кузьменко Н.Е., Дроздов А.А., Лунин В.В.* Химия: Углублённый уровень: 11 класс: учебник / Под ред. В.В. Лунина. – М.: Дрофа, 2020. – 477 с.
16. *Волкова С.А.* Дидактические аспекты проектирования школьного учебника химии // Отечественная и зарубежная педагогика, № 2, 2016. С. 33–47.
17. *Волкова С.А., Ивченко Т.В., Лисовская Л.П.* Зелёные растения – лаборатория фотосинтеза // Химия в школе, №8, 2008. С. 9–17.

18. Волкова С.А, Парицкина Л.А. Обновление содержания школьного естественнонаучного образования с учётом достижений супрамолекулярной химии // Теоретические и методологические проблемы современного образования: Материалы XXXIV Международной научно-практической конференции, Москва, 04–05 октября 2017 года. – Москва: Научно-информационный издательский центр «Институт стратегических исследований», 2017. С. 21–26.