

# НАНОТЕХНОЛОГИИ И ХИМИЧЕСКОЕ ОБРАЗОВАНИЕ В МГУ: РАЗМЫШЛЕНИЯ О НОВАЦИЯХ И ТРАДИЦИЯХ

**Фельдман В.И.**

*Химический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия*

Несколько лет назад по стране прокатилась волна создания всевозможных нанотехнологических центров, институтов, факультетов, кафедр и других структур с броскими названиями, включающими приставку «нано». Среди этих новообразований были действительно современные лаборатории и центры, но значительная часть была произведена простой сменой вывесок в ожидании «золотого дождя». МГУ не слишком спешил с откликом на новые веяния, однако в 2008 году ответ состоялся – был организован Научно-образовательный центр (НОЦ) МГУ по нанотехнологиям. Идея НОЦ, в принципе, заключалась в использовании разнообразного потенциала и мощной инфраструктуры МГУ для создания системы действительно современного междисциплинарного образования по всем направлениям, имеющим отношение к нанотехнологиям – от физики до биологии и медицины. При этом цель состояла не только в создании программы подготовки специалистов, способных формулировать и развивать новые приложения в области различных нанотехнологий, но и в организации «полигона» для отработки подходов к модернизации университетского естественнонаучного образования в целом. Собственно говоря, вторая цель в современных условиях представляется мне, возможно, даже более значимой (об

этом еще пойдет речь дальше). С самого начала НОЦ заявил амбициозную программу фундаментального образования в области нанотехнологий, и начата она была с широкого общедоступного лектория, включающего курс лекций «Фундаментальные основы нанотехнологий» и сопряженный с ним цикл лекций «Современные проблемы нанотехнологий». По замыслу, первый должен был нести преимущественно образовательную, а второй – познавательную нагрузку. Далее дело встало за наполнением конкретных направлений (специализаций). Таковых было обозначено три – «наносистемы и наноустройства» (физическая), «функциональные наноматериалы» (физико-химическая) и «нанобиоматериалы и нанобиотехнологии» (химико-биологическая). По идее, все три специализации могли стать междисциплинарными и межфакультетскими, но на практике так получилось лишь с последней из них по причинам, в значительной мере связанным с существенным различием учебных планов и сроков обучения у физиков и химиков. Таким образом, специализация «функциональные наноматериалы» должна была быть вписана в устоявшуюся и довольно жесткую схему химического образования в МГУ, что оказалось непростой задачей. С другой стороны, программу этой специализации надо было создавать практически с «чистого листа».

В конце 2008 года я получил предложение возглавить методическую комиссию по специализации «функциональные материалы» в рамках НОЦ МГУ. Должен сказать, это было неожиданно для меня по нескольким причинам. Во-первых, моя прежняя работа была связана, в основном, с физико-химическими исследованиями; я читал курсы лекций для студентов и аспирантов, но никогда не занимался организацией учебного процесса или учебно-методической деятельностью. Во-вторых, к тому времени у меня уже сложилось настороженное отношение к словам с приставкой «нано», особенно при их расширительном толковании с политическим оттенком. Наконец, мой собственный научный опыт, хотя и включал эксперименты с нанообъектами, не имел прямого отношения к

наиболее распространенным направлениям нанотехнологий. Предложение, однако, поступило от людей, в искренности и серьезности намерений которых я не сомневался. Я получил разъяснение, что главная задача – создать программу и концепцию, исходящую в первую очередь из базовых физико-химических принципов, а не из потребностей конкретных технологий. Это вполне отвечало моим представлениям, и я согласился участвовать в этой работе. Способствовать успеху в таком понимании должен был и предложенный состав методической комиссии – в нее вошли не просто представители разных кафедр, но люди, имеющие опыт реальных исследований на современном уровне в различных областях физики, химии и наук о материалах.

Работать комиссии пришлось достаточно быстро, и в результате к началу первого учебного семестра специализации была вчерне подготовлена (хотя и не без изъянов) программа, состоящая на три четверти из новых или существенно обновленных курсов. Коллеги с физического факультета (под руководством проф. А.Н. Васильева) подготовили курс «Физика конденсированного состояния вещества и наносистем», в который, наряду с традиционными аспектами физики твердого тела, были представлены разделы, относящиеся к области “soft matter”. Большой интерес и бурное обсуждение вызвал оригинальный современный курс «Коллоидные системы» проф. О.И. Виноградовой, предложенный в качестве альтернативы традиционному курсу «Коллоидной химии», читаемому для студентов-химиков. Впоследствии этот курс стал межфакультетским – сейчас его слушают и физики, и химики. Кафедра высокомолекулярных соединений предложила существенно модифицированный курс «Физико-химия полимеров», построенный с учетом специфики специализации. Оригинальный курс «Методы получения наноструктур и наноматериалов» с основным акцентом на «растворные» методы (формирование наноструктур из жидкой фазы) был предложен проф. Г.А. Цирлиной. Принципы этого курса отвечают общей методологии, которой мы пытались следовать (возможно, не

всегда удачно и последовательно в других случаях) – он выдержан в физико-химическом, а не в препаративном ключе. Пожалуй, наиболее трудоемкой задачей для комиссии (как с содержательной, так и с организационной точки зрения) стала разработка и реализация большого двухсеместрового курса «Экспериментальные методы диагностики наноструктур и наноматериалов» и сопряженного с ним практикума. Усилиями различных специалистов (физиков и химиков, всего в этом сборном курсе «задействовано» 14 преподавателей) удалось создать содержательный и профессионально представленный курс, дающий базовые принципы самых различных методов исследований (рентгеноструктурных, микроскопических и зондовых, спектроскопических, магнитно-резонансных) и возможности их применений для исследований наноструктурированных систем. Отдельный блок был отведен для детального обсуждения методов измерения физических характеристик вещества (электрических, магнитных, тепловых) – несмотря на кажущуюся «тривиальность», эти вопросы имеют ключевое значение для правильной характеристики исследуемых объектов и, к сожалению, часто остаются за рамками внимания студентов-химиков. В целом, на мой взгляд, несмотря на определенные трудности и вынужденные пробелы (особенно, в части практикума), такой курс полезен для современных химиков, независимо от их специализации, и опыт его построения можно было бы использовать шире.

Второй (и не менее важной) частью программы, по нашему замыслу, должна была стать система «курсов по выбору», позволяющая студентам набрать конкретные знания, соответствующую их выбору в рамках весьма широко трактуемого расплывчатого понятия «нанотехнологии». Было предложено несколько таких курсов весьма широкой направленности (от катализа до радиационно-химических методов формирования наноструктур), однако реально пока эта часть не вполне состоялась (о причинах и возможных следствиях речь пойдет ниже).

Достаточно быстро (по крайней мере, по моим ощущениям) прошли три года с начала нашей работы, состоялось два выпуска. О том, что удалось сделать, коротко сказано выше. Между тем, на мой взгляд, гораздо полезнее на этой стадии поговорить о проблемах, о том, как сработал наш «полигон» в рамках сложившейся системы и что он показал на сегодняшний день.

### **«Не ходите, дети, в Африку гулять»**

Один из парадоксов нашего опыта заключается в том, что востребованность специализации с очень модной приставкой и достаточно серьезным наполнением оказалась не слишком высокой – в среднем в год через нашу «наногруппу» проходило около десяти студентов. Конечно, можно говорить о том, что это вовсе не так плохо для новой специализации, и качество здесь, безусловно, важнее количества. Среди наших выпускников, бесспорно, были сильные и интересные студенты. И все же надо признать, что студенты третьего курса не очень активно шли в нашу группу, а руководители часто просто не хотели их пускать (исключение составила кафедра химической технологии). Причин здесь, вероятно, несколько – психологические, организационные и более глубокие – системные.

Первое объяснение, которое приходилось слышать, – очень большая нагрузка. Действительно, никто не отменял для наших студентов предметов, которые изучали все другие группы «общего потока», а попытки «оптимизации» часто наталкивались на упорное сопротивление соответствующих кафедр («вы можете дополнять что угодно, но изменять ничего нельзя!»). Конечно, хорошие студенты, поступающие в специальные группы химического факультета, часто сознательно идут на более сложную, но более интересную и перспективную программу. Но это происходит на первом курсе. Студенты третьего курса гораздо более прагматичны – и их можно понять: «на носу» диплом, и возможностей для маневра куда меньше. Именно этот прагматизм объясняет низкую востребованность некоторых современных курсов по выбору, предлагаемых студентам

(эти курсы, как правило, читаются в девятом семестре, когда окончательный выбор уже сделан и не может быть изменен). Второе (отчасти сходное) объяснение лежит преимущественно в организационной плоскости. Дело в том, что специализация была не вполне легализована и фактически являлась «второй» (т. е., не заменяла «кафедральную специализацию» и все связанные с этим трудозатраты). На многих кафедрах возобладало консервативно-настороженное отношение: «не надо отдавать туда наших студентов, а то еще отберут». В результате среди студентов наногруппы практически не оказалось тех, кто выбрал кафедры физико-химического направления, – а ведь на них мы рассчитывали в первую очередь. Более глубокое противоречие, однако, заключалось в не востребованности знаний и навыков, полученных при обучении в «наногруппе», при выполнении дипломной работы (так произошло с доброй половиной тех студентов, которые все же прошли у нас полный курс обучения). Мы пытались анализировать эту ситуацию (и не только применительно к наногруппе) и поняли, что студенты далеко не всегда удовлетворены темами своих дипломных работ и перспективами, которые они получают, однако иногда они попросту боятся что-либо менять и не видят хороших альтернатив. Попытка дать эту альтернативу была предпринята – на сайте НОЦ появился открытый для пополнения список возможных тем дипломных работ, которые в широком смысле связаны с исследованиями в области наноструктур и наноматериалов, однако пока этот список не востребован. Здесь, по-видимому, и проявляется глубинная (системная) проблема, трудно разрешимая в рамках существующей схемы. С одной стороны, программа специализации на старших курсах в отрыве от научной (и, соответственно, дипломной) работы студента теряет смысл, с другой – направление этой работы («кафедральная специализация») задается до выбора специализации в НОЦ и часто без учета этого выбора. Наиболее естественным путем это противоречие, по-видимому, решается в рамках двухуровневой системы, в которой специализация «функциональные наноматериалы»

могла бы существовать в качестве полноценной магистерской специализации, доступной для студентов с достаточной базовой подготовкой на уровне бакалавриата. Гораздо труднее «вплетать» новые специализации в действующую схему специалитета (даже шестилетнего) при сохранении общей структуры и порядка преподавания дисциплин. По-видимому, единственный выход состоит в увеличении числа курсов по выбору, предлагаемых студентам уже со второго курса и расширении реальных возможностей такого выбора на разных стадиях обучения.

### **Самолет с одним крылом**

В общей постановке понятие «функциональные наноматериалы» включает две большие группы – неорганические материалы различных типов и органические и гибридные материалы (включая функциональные полимерные нанокомпозиты). Если говорить о мировых тенденциях, оба направления развиваются весьма активно, и каждое из них имеет свои устойчивые точки роста (для проверки этого достаточно пролистать любые журналы последних лет, от Nature и Science до серьезных специальных журналов). В соответствии с этим программа специализации представлялась как самолет с мощным физико-химическим фюзеляжем (общая база) и двумя крыльями, которые должны были изначально выделяться в общих курсах и вырастать из курсов по выбору. В действительности, однако, наш самолет с самого начала оказался однокрылым – полимерно-органическое крыло так и не выросло. На уровне общих курсов это направление было намечено экскурсом в область жидких кристаллов в курсе физики и обзором полимерных наноматериалов для различных приложений в курсе физико-химии полимеров. Некоторые весьма активные области (в частности, материалы для органической электроники и фотоники), по существу, остались в стороне. Совершенно не рассматривались вопросы молекулярного дизайна и оптимизации функциональных органических наноструктур (ни на квантово-химическом, ни на синтетическом уровне), т.е., не удалось

подойти к созданию аналога курса методов получения наноматериалов для органических систем. Практически не освещались возможности супрамолекулярной химии применительно к построению органических и полимерных наноструктур. В принципе, это вполне естественно могло быть поправлено набором курсов по выбору (предложения на этот счет были). Однако еще хуже обстояло дело с точки зрения состава слушателей: за все три года в группу не пришло ни одного студента-органика или полимерщика. В результате специализация стала многими восприниматься как еще одно ответвление неорганической химии, а иногда попросту ставился знак равенства между понятиями «функциональные наноматериалы» и «неорганические наноматериалы».

В этом случае также существует несколько объяснений на разных уровнях. Определенную роль, по-видимому, сыграл консерватизм органиков и традиционная ориентация многих сильных и успешных научных групп химического факультета на другие приложения – прежде всего, связанные с природными соединениями и физиологической активностью и стоящие гораздо ближе к направлению «нанобио». Между тем, более глубокая причина может состоять быть связана с менталитетом большинства студентов, выбирающих органическую химию на химическом факультете. Изучение органической химии в университете, по существу, предшествует изучению физической химии, что, по моим наблюдениям, не очень способствует формированию представлений в духе физической органической химии. В самом деле, для того, чтобы заниматься осмысленным дизайном функциональных материалов, например, для органической электроники и фотоники, крайне желательно иметь представление об основах электрохимии, фотохимии и фотофизики. Студент, выбирающий органику на третьем курсе, как правило, таких представлений не имеет совсем (ведь это еще будет только на четвертом, а чего-то и вовсе не будет). Кроме того, хорошо бы «дружить» с физикой и не испытывать аллергии к квантовой химии, а это как-то не очень вписывается в сложившийся

стереотип студента-органика. Продолжая рассмотрение, впрочем, следует отметить, что эта проблема имеет еще более глубокие корни, связанные, в конечном итоге, с состоянием соответствующих областей нашей науки и промышленности. Удельный вес исследований, например, в области органической электроники в России гораздо ниже, чем в ведущих странах мира, активных групп и публикаций намного меньше, а перспективы отечественных технологий в этой области выглядят и вовсе туманно (хуже, чем в некоторых областях, связанных с неорганическими материалами).

Впрочем, сохраняя объективность, было бы неправильно адресовать «призывы» только в адрес органиков. Есть и другая сторона вопроса. Не только студенты, но и многие преподаватели и исследователи с неорганической предысторией практически не воспринимают второе крыло, а органическую химию представляют как некую «кухню» (иногда это можно было почувствовать даже во время заседаний методической комиссии). Между тем, во многих современных областях, связанных с созданием функциональных материалов, успех предполагает возможность комбинировать разные типы систем и подходов. Исследователь, начинающий с неорганических полупроводников, в какой-то момент осознает, что нужно включить возможности конструирования органических структур, и ему совершенно необходимо представлять хотя бы в общих чертах, как такие системы могут быть получены и организованы, и какие их особенности критичны для функциональных характеристик. На мой взгляд, в нашей образовательной конструкции здесь пока проявляется слабость физико-химического «фюзеляжа». Нерешенной проблемой является отсутствие курса с условным названием «Моделирование наносистем и наноматериалов», в котором рассматривались бы подходы к теоретическому описанию строения и свойств различных систем – от изолированных молекул до периодических структур и наноматериалов (пока на этом поле у нас есть только курс по выбору А.В. Щербинина «Периодические модели в квантовой химии»).

В более широком смысле наш опыт обозначает проблему адаптивности современных исследователей и их интегрируемости в междисциплинарные проекты, которая для химиков является наиболее актуальной и, вероятно, наиболее сложной (в силу специфики устройства химической науки). Если мы хотим изменить ситуацию в науке и технологиях через образование, необходимо менять само образование. Во-первых, нужна определенная корректировка учебных планов и программ базовых курсов, отход от стереотипов, возможно, изменение сложившейся почти полвека назад последовательности и идеологии преподавания различных дисциплин с учетом тех кардинальных изменений, которые произошли в науке за последние десятилетия. Во-вторых, нужно привлекать к преподаванию спецкурсов и курсов по выбору специалистов со стороны (в том числе, из ведущих мировых центров).

### **Учить или переучивать?**

Особенность химического образования в рамках НОЦ по нанотехнологии состоит в том, что его основу составляют курсы, которые в той или иной мере базируются на применении знаний, полученных при изучении различных физических и химических дисциплин. Другими словами, какой-то отдельной «фундаментальной нанохимии» в чистом виде не существует (в широком смысле, фундамент «нанонауки» принадлежит физике, в которой вводится понятие о квантовых размерных эффектах). С другой стороны, «химические нанотехнологии», если не превращать их в профанацию, весьма требовательны с точки зрения базовой подготовки. Так, в основе понимания процессов получения наноструктур лежат представления теории адсорбции, классической химической кинетики и макрокинетики, химии твердого тела. Устойчивость «химических» наносистем описывается в рамках представлений термодинамики и кинетики. Многие приемы, лежащие в основе получения как неорганических, так и органических наноструктур, в принципе, используются и в классической препаративной химии. Здесь

возникают две основные проблемы: первая – степень реального владения студентами соответствующими разделами физики, физической, неорганической или органической химии; вторая – согласованность используемых представлений, понятий и терминологии.

Даже короткий опыт образования химиков в рамках НОЦ вполне отчетливо обозначает реальность обеих проблем, причем их корни достаточно глубоки. В целом, студенты «наногруппы» были несколько выше среднего уровня. Однако у части из них явно ощущались пробелы в элементарной математике (в том числе, застарелого школьного происхождения), у большинства – в общей физике, а некоторые знания и химических курсов были благополучно «сданы и забыты». Отдельно стоит вопрос о «параллельном» прохождении некоторых базовых разделов физической химии, которые, по моему убеждению, в традиционной структуре изучаются очень поздно. Действительно, к началу четвертого курса студенты имеют весьма отрывочные сведения о химической кинетике и электрохимии, почерпнутые из курсов неорганической и аналитической химии и основательно забытые. Общая проблема большинства студентов – неумение правильно решать задачи с получением конкретного ответа (есть надежда, что в ходе изучения некоторых курсов специализации это удалось отчасти преодолеть, по крайней мере, так были построены курсы «Коллоидные системы», «Методы получения наноструктур и наноматериалов» и большинство разделов курса «Экспериментальные методы диагностики...»). Не вдаваясь в анализ проблем изучения конкретных курсов (не только университетских, но и школьных), хотел бы отметить общую внутреннюю причину – недостаток осознанной мотивации (если не считать самоцелью получение оценки). По-видимому, на младших курсах многие студенты не очень отчетливо понимают, зачем они учатся (возникает смесь инфантилизма и «начетничества»), а на старших некоторые перестают понимать, зачем они учились. Очевидно, необходимо как повышение требований к набору абитуриентов, так и постоянная модернизация

«базовых» курсов с обязательной обратной связью на всех этапах. Знания и навыки должны не осаждаться в «зачетках», а формировать цепочку возможностей. Это означает, что по мере обучения неизбежно должна происходить определенная дифференциация, которая как раз исключает инфантилизм. Здесь полигон бесспорно полезен, но начинать эксперимент на четвертом курсе при унифицированной пятилетней системе образования безнадежно поздно. Есть два выхода – двухуровневая система или определенная «траектория» (по существу – спецгруппа с повышенным уровнем требований при достаточной гибкости) с младших курсов. Во втором варианте (фактически он уже «запущен» в группах НОЦ на химическом факультете, начиная с набора первокурсников 2010 года) легче решается также проблема согласованности содержания и формы изложения базовых и специальных курсов, чтобы избежать возникновения «плюрализма в одной голове» у студентов. Надеюсь, что этот вариант в данном случае сработает на уровне полигона. Однако, понимая всю привлекательность системы спецгрупп в сегодняшних условиях, нужно отчетливо осознавать, что дальнейшее увеличение их числа практически размывает унификацию университетского химического образования, уменьшает возможности самоопределения для студентов по мере обучения и снижает уровень «общего потока» (при этом формально диплом остается одинаковым). В пределе это ведет к двойному стандарту, т. е. означает скрытое введение двухуровневой системы с неясными принципами. Более того, это может не увеличить, а снизить общую адаптивность системы и послужить прикрытием для реализации откровенно конъюнктурных проектов. На мой взгляд, принцип должен быть предельно простым: общие требования ко всем студентам на первой стадии и максимальные возможности реализации для лучших на последующих стадиях, что подразумевает непрерывную селекцию.

### **Предварительное заключение: что дальше?**

Конечно, подводить серьезные итоги работы отделения НОЦ по нанотехнологиям на химическом факультете МГУ рано. С практической точки зрения хочу надеяться, что определенная реальная польза есть – созданы и отработаны несколько новых курсов, которые могут быть общепользованы, сделана попытка создания оригинальной ориентированной программы. Организационные и технические трудности (их немало) анализировать здесь не хочу – это для другого жанра, жанра «докладной записки». Между тем, попытка осмысления перспектив этой деятельности неизбежно выводит на общие вопросы о необходимости постепенных, но достаточно серьезных (не косметических) изменений в традиционной структуре образования. Здесь хотелось бы отметить, что я ни в коей мере не являюсь сторонником новаций ради новаций; более того, придерживаюсь принципа «презумпции виновности» по отношению к рьяным новаторам и прогрессистам в области образования. Однако при этом надо осознавать, что аргументы типа «это хорошо, потому что так преподавали пятьдесят лет» по отношению к естественнонаучному образованию в МГУ абсурдны. Фактически это попросту означает признание разрыва между наукой и образованием, поскольку и содержание, и структура науки за эти пятьдесят лет изменились весьма существенно. А вот это как раз совершенно недопустимо для МГУ и не отвечает его лучшим традициям. Если мы направленно не изменяем что-либо к лучшему в нашем образовании, то оно неизбежно самопроизвольно изменяется к худшему, становится менее адекватным реальности, которая изменяется (здесь невольно напрашивается аналогия с известным термодинамическим принципом для изолированной системы).

На мой взгляд (и это один из уроков попыток внедрения междисциплинарной программы), пришло время для серьезного и спокойного разговора о реальной модернизации общей программы, разговора без «табу», без перетягивания каната и апелляции к «традициям». Это касается всех вопросов – чему учить, как, в какой

последовательности, и, конечно, требований и критериев, предъявляемых к студентам и преподавателям. И, наконец, система должна стать более открытой, восприимчивой – через курсы по выбору, приглашение ведущих лекторов, использование богатых возможностей горизонтальных связей, как внутренних, так и внешних.