



Отдел строения вещества

им. В.И. Гольданского

1. Краткая история Отдела

Сотрудники Отдела строения вещества не могут похвастаться участием в Атомном проекте СССР. Тем не менее в Отделе было создано несколько научных направлений, которые принесли Отделу международную известность, составляли и до сих пор составляют гордость не только Отделу и Институту, но и всей Академии Наук. Трудно переоценить роль, которую сыграл В.И. Гольданский в создании Отдела и становлении научных направлений Отдела. Большинство направлений исследований, которые проводятся в Отделе и поныне, были, в свое время, инициированы им.



*В.И. Гольданский в Отделе за
работой*

Виталий Иосифович в 1944 г. заканчивает химический факультет Московского университета и поступает в аспирантуру к Н.Н. Семенову. В 1947 г. защищает кандидатскую диссертацию по проблемам катализа. В 1952 году, из-за проводившейся в то время борьбы с семейственностью, В.И. Гольданский вынужден был перейти на работу в ФИАН им. П.Н. Лебедева. Здесь он проработал девять лет в лаборатории академика В.И. Векслера, став признанным специалистом в области ядерной физики и физики элементарных частиц. В 1954 г. на Ученом совете, где председательствовал И. В. Курчатов, защищает докторскую диссертацию на степень доктора физико-математических наук.

В 1961 году В.И. Гольданский возвращается в Институт химической физики, возглавляет Лабораторию ядерной и радиационной химии в Отделе свободных радикалов Института, имея за плечами опыт работы физиком-ядерщиком. В новой лаборатории В.И. Гольданский сразу начинает формировать абсолютно новые для Института химической физики направления (об этом подробнее см. следующий раздел).

В 1971 году на базе лаборатории создается Отдел ядерной химии, а в 1974 году Отдел ядерной химии переименовывается в Отдел строения вещества. В.И. Гольданский был руководителем Отдела вплоть до 1988

года. В 1988 году В.И. Гольданский переходит на работу в Дирекцию ИХФ Академии Наук СССР, вскоре становится Директором ИХФ РАН, а затем Генеральным директором Объединенного ИХФ РАН, этот пост он сохранял до конца жизни.

В 1988 году руководителем Отдела становится ученик В.И. Гольданского д.х.н. Шишков А.В.



*Шишков А.В. выступает
на семинаре Отдела*

В 2013 году руководителем Отдела назначается другой ученик В.И. Гольданского д.ф.м.н. Крупянский Ю.Ф.



*Крупянский Ю.Ф. ведет секцию на
90-летию со дня рождения
В.И. Гольданского*

2. Основные направления научной деятельности Отдела.

В 1961 г. впервые в СССР в Лаборатории ядерной и радиационной химии начато широкое применение эффекта Мессбауэра для изучения конкретных, весьма тонких проблем химии и биологии. В сравнительно короткий срок вокруг В.И. Гольданского собралась группа молодых сотрудников, публикации этой группы фактически заложили основы развития этого направления. Уже на раннем этапе (1963 г.) В.И. Гольданский публикует небольшую монографию «Эффект Мёссбауэра и его применение в химии», вызвавшую большой резонанс и трижды изданную в английском переводе. Монография и сам В.И. Гольданский получают широкое признание за рубежом, а В.И. Гольданский реально остается лидером этого направления исследований до последних дней жизни.

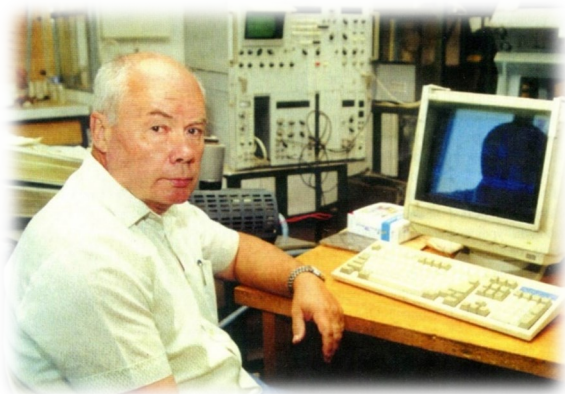


*В.И. Гольданский и
Р. Мёссбауэр на одном из
совместных семинаров*

Среди его первых учеников в этом направлении следует отметить Евгения Фредовича Макарова, Реоналя Андреевича Стукана и Игоря Петровича Суздалева. В последующем каждый из них сам стал заведующим лабораторией Института.

Практически одновременно с Мессбауэровской спектроскопией В.И. Гольданский начинает развивать другой новый метод исследования строения вещества – позитронную спектроскопию. В 1977 г. Виталий

Иосифович и его ученик Виктор Петрович Шантарович были удостоены премии им. В.Г. Хлопина Академии Наук СССР. Ими и их учениками была обнаружена высокая чувствительность аннигиляционных характеристик позитрония к структуре окружения, что привело к созданию нового метода исследования строения вещества. Позитронная спектроскопия сегодня успешно развивается в лаборатории д.ф.м.н. В.П. Шантаровича.



*Шантарович В.П. за работой
в лаборатории*

Еще одним увлечением В.И. Гольданского стало изучение химических реакций при низких температурах. Это увлечение ознаменовалось открытием (1970 – 1973 гг.) квантового низкотемпературного предела скорости химических реакций за счет туннельных переходов реагирующих атомов и молекулярных групп под активационным барьером. Это открытие показывает неприменимость основного закона химической кинетики – закона Аррениуса – при низких температурах.

Выполненные под руководством Гольданского В.И. в 1970 – 1973 гг. Баркаловым И.М. и другими сотрудниками калориметрические исследования аномально быстрой (в согласии с классическими представлениями) криополимеризации формальдегида позволили (совместно с д.х.н. А.Д. Абкиным и его сотрудниками) обнаружить неизвестное ранее «Явление существования низкотемпературного предела скорости химических реакций», зарегистрированное в Государственном реестре открытий СССР 22 сентября 1977 года за № 188.

За цикл работ «Исследование новых явлений в химии низких температур» В.И. Гольданский был удостоен в 1975 г. золотой медали

имени Д.И. Менделеева, одной из высших наград, присуждавшихся Академией Наук СССР.



*В.И. Гольданский после вручения
золотой медали и чтения
Менделеевской лекции*

Несколько позже, в 1980 г., вместе с руководителями других исследовательских групп (д.х.н. А.Д. Абкиным, академиком Н.С. Ениколоповым и член-корреспондентом В.А. Кабановым) В.И. Гольданский был удостоен еще и высшей государственной научной награды – Ленинской премии за цикл работ «Обнаружение и исследование аномально быстрой полимеризации в твердой фазе».



*Слева направо: А.Д. Абкин, Н.С. Ениколопов, В.И. Гольданский и
В.А. Кабанов*

К началу 70-х годов обычная Мессбауэровская спектроскопия, которой он уделял массу внимания в начале 60-х годов, практически перестает его интересовать. Мессбауэровскую спектроскопию в это время развивают его ученики: Е.Ф. Макаров, И.П. Суздалев и Р.А. Стукан с небольшим количеством сотрудников и массой аспирантов и студентов. В настоящее время работами по классической мессбауэровской спектроскопии (в основном, в применении к катализу) в Отделе успешно руководит д.х.н. Юрий Васильевич Максимов.



*Максимов Ю.В. в
лаборатории*

Сам Виталий Иосифович, помимо увлечения химическими реакциями при низких температурах, начинает думать о биологических исследованиях. Он все больше задумывается о том, как заняться биологическими системами. Во многом этому способствовал пример его американского друга и коллеги профессора Г. Фрауэнфельдера. Г. Фрауэнфельдер прошел, во многом, такой же путь, как и Виталий Иосифович. Сверстник Виталия Иосифовича, он начал с ядерной физики, затем занимался эффектом Мессбауэра, а с 1972 года начал заниматься физикой и кинетикой белковых макромолекул, получая при этом очень интересные результаты. Виталий Иосифович в 1974 – 1975 году в Отделе организовал семинары по динамическим и функциональным свойствам белков. Выступали на них проф. Г.И. Лихтенштейн из Черногловки и член-корр. Академии Наук Рубин А.Б. из МГУ. Начиная с этого времени, не менее 25%

широчайших научных интересов Виталия Иосифовича связано с работами по динамике белков. В мессбауэровской спектроскопии направление – изучение динамики белка – начинает резко выделяться. Для многих, включая меня, началась эпоха изучения динамики белка, эпоха Рэлеевского рассеяния Мессбауэровского излучения – методики, идею которой Виталий Иосифович привез из-за границы, а мы ее видоизменили и стали применять для изучения динамики белков. К этому времени у Виталия Иосифовича установилось тесное сотрудничество с Институтом E-15 проф. Р. Мессбауэра в Мюнхене, где велись лучшие работы по применению эффекта Мессбауэра. С 1975 года начали проводиться традиционные двусторонние семинары СССР – ФРГ в области мессбауэровской спектроскопии. Эти семинары проводились 2 раза в 3 года вплоть до 1996 года и неизменно пользовались колоссальной популярностью как в СССР (России), так и в Германии. Научный уровень этих семинаров был чрезвычайно высоким, съезжались лучшие ученые не только этих двух стран, но и гости из США и других развитых стран. Постепенно выкристаллизовывается программа семинара. В отличие от обычных Мессбауэровских конференций, включающих в свою программу изучение всего, что есть во Вселенной, в данном случае очевидный лидер Семинара – Нобелевский лауреат, Директор Института Лауэ-Ланжевена в Гренобле (Франция) и, одновременно, Директор Института E-15 в Мюнхенском Техническом Университете, Германия. Р. Мессбауэр, при участии лидеров с Советской стороны В.И. Гольданского (ИХФ Академии Наук) и Ю.М. Кагана (ИАЭ им. И.В. Курчатова) – довольно четко определил тематику Семинара: 1) динамика белков (с ИХФ Академии Наук) и 2) когерентные явления (с Курчатовским институтом). Таким образом, наши работы по динамике белков сразу привлекли внимание высокой научной общественности, сначала мессбауэровской, а затем и биофизической.



*Ю.Ф. Крупянский рассказывает
Р. Мессбаэру, последние работы по
изучению динамики миоглобина
методом рэлеевского рассеяния
мессбауэровского излучения.
Вскоре были опубликованы три
совместные с
Р. Мессбауэром работы.*

Эти работы позволили мне многократно побывать за границей – сначала в Мюнхене, затем в других городах Германии, потом в различных городах Европы и мира.

В 1981 году Виталий Иосифович организовал Международный Симпозиум СССР – США по квантовой динамике и реакционной способности сложных молекул. На этом Симпозиуме были отражены интересы В.И. Гольданского и к квантовому пределу скорости химических реакций, и к динамическим свойствам белков. В то время отношения с США были крайне натянутыми. Виталию Иосифовичу совместно с членом Национальной Академии Наук США, проф. Г. Фрауэнфельдером (Иллинойский Университет, Урбана-Шэмпейн, США) удалось устроить семинар в Венгрии, благодаря проф. Л. Кестхели – Директору Биологического научного центра Венгерской академии наук в г. Сегед (Венгрия), который предложил устроить семинар СССР – США в Сегеде. Виталий Иосифович собрал выдающуюся команду советских биофизиков – Л.А. Блюменфельда, О.Б. Птицына, Д.С. Чернавского, М.Д. Франк-Каменецкого. Из молодых были мы с Женей Фроловым. Из ученых США

следует выделить самого Г. Фрауэнфельдера, а также молодого и неизвестного тогда, но сейчас одного из корифеев физики белка П. Волинеса. На Симпозиуме также присутствовали видные ученые из ФРГ и других стран.



*Сидят слева направо: М. Ваз (Венгрия), Л. Кестхели (Венгрия), Х. Фраунфельдер (США), В.И. Гольданский (СССР), Л.А. Блюменфельд (СССР), П. Волинес (США), Ю.Ф. Крупянский (СССР), П. Дебруннер (США).
Стоят слева направо: О.Б. Птицын (СССР), Д.С. Чернавский (СССР), ?, А. Купер (Великобритания), ?, Д. Баде (ФРГ), П. Завадски (Венгрия), Е.Н Фролов (СССР), Ф. Парак (ФРГ), М.Д. Франк-Каменецкий (СССР), К. Вудвард (США), Т. Келети (Венгрия), ?, ?, ?, ?*

В это же время Отдел организовывал Семинары с Мюнхенским Техническим Университетом, Германия. Фотографии участников одного из таких Семинаров, который состоялся в г. Суздаль, 1984 г., смотри ниже:



Участники семинара по мессбауэрской спектроскопии СССР-ФРГ, г. Суздаль, 1984 г.



Ю.Ф. Крупянский, один из организаторов Семинара в Суздале, 1984 г., обсуждает с Р. Мессбауэром и академиком Ю.М. Каганом дальнейшую программу Семинара.

В 1983 году Виталий Иосифович поручил мне и Вите Флерову написать статью о низкотемпературной теплоемкости белков. Этот вопрос был очень тесно связан с изучением динамики белков и вопросом об энергетическом ландшафте. Если белки имеют сложный энергетический ландшафт, а не простой гармонический, то низкотемпературная теплоемкость белков должна вести себя аналогично низкотемпературной теплоемкости стекол. На этой основе мы с Витей написали черновик статьи, где на основе анализа данных по динамике белков утверждалось, что низкотемпературная теплоемкость белков должна вести себя аналогична

низкотемпературной теплоемкости стекол. Статья Виталию Иосифовичу понравилась, но он решил ее усилить. Вообще Виталий Иосифович любил броский, «американский» стиль. Поэтому он вынес название о стеклоподобности в заголовок статьи. В заголовке появилась: «Стеклоподобная модель белков». Замечу, что в это время в советской биофизике были модны категорические суждения о том, что может быть, а чего не может быть никогда. Если эксперименты противоречат неким догмам, значит они неправильны. Указанную работу Виталий Иосифович представил в Доклады Академии Наук, она была быстро опубликована и получила широкую известность как в Советском Союзе, так и за рубежом. Известность не заставила себя долго ждать. В Москве в то время работал семинар Михаила Владимировича Волькенштейна, семинар известный благодаря своему выдающемуся ученому-руководителю и тому, что он проходил в Институте молекулярной биологии – центре отечественной биофизики. Меня любезно пригласили на семинар. До этого я ни разу не был на этом семинаре и не знал тамошних нравов. Замечу, что когда Виталий Иосифович Гольданский затевал в Институте химической физики РАН маленькую биологическую революцию, он понимал, что почти все его ученики и последователи имеют образование в области химии или физики. Я, например, окончил МИФИ по специальности ядерная физика и физика элементарных частиц. С одной стороны хорошо, когда над группой ученых, начинающих заниматься новой проблемой, не довлеют догматы прошлого. С другой стороны они могут совершать самые элементарные ошибки. Понимая это, Виталий Иосифович старался вывозить нас на различные известные семинары, например к Олегу Борисовичу Птицыну. Сам я ходил на семинар к Дмитрию Сергеевичу Чернавскому в ФИАН, но у М.В. Волькенштейна еще ни разу не был. Шел я с легкой душой, совершенно не подозревая о том, какие страсти уже кипят и какие еще будут кипеть на семинаре и после него в нашем Институте. Я начал рассказывать о нашей работе, о нашей логике, но Михаилу Владимировичу не понравилась ни

работа, ни ее рекламный «американский» стиль, поэтому я был «выпорот» и очень хорошо. Понял я это позже, на улице после семинара и на работе, когда стал выслушивать от своих старших коллег все, что они обо мне думают. А в этот момент они думали много «хорошего». При прежнем мнении, что наша работа в целом правильна, остались лишь Витя Флеров и Виталий Иосифович, который меня очень поддержал и который специально позвонил Михаилу Владимировичу, чтобы сказать, что маститому члену-корреспонденту Академии Наук не следует на первом же семинаре «пороть» сравнительно молодого кандидата наук, тем более по полной программе. Слова, которые Михаил Владимирович говорил мне, следовало адресовать более опытному бойцу, а именно самому Виталию Иосифовичу. Тем не менее, дело было сделано и противоречивое впечатление от работы осталось надолго. Противоречивым же оно стало потому, что эту работу расхвалил буквально через месяц Г. Фрауэнфельдер в своей статье в PNAS USA. Я до сих пор преклоняюсь перед выдающимися заслугами М.В. Волькенштейна, его энциклопедическим образованием, его школой и т.д., и нахожу все новые интересные черты в его многочисленных книгах. К сожалению, первое близкое знакомство вышло комом. В 1991 году, в Черноголовке, я в качестве ученого секретаря был одним из организаторов семинара СССР – США, который так и назывался «Белки и стекла». Это был грандиозный ответ тому небольшому семинару у М.В. Волькенштейна. Сопредседателями этого семинара были Г. Фрауэнфельдер и В.И. Гольданский. Фрауэнфельдер привез с собой выдающуюся команду из США, многих лучших на то время американских биофизиков. Их имена приведены под фотографией участников семинара. М. Карплус за прошедшее с тех пор время стал лауреатом Нобелевской премии. Нам, в свою очередь, удалось собрать весь цвет Советской биофизики, что, в конце концов, для нее плохо кончилось, так как более 50% участников этого семинара из Союза оказались вскоре в США или в других странах и надолго. Наступила перестройка и тяжелые для отечественной науки времена.

Участники Семинара СССР – США «БЕЛКИ И СТЕКЛА», г. Черноголовка, 1991 г. показаны на фото ниже:



Слева направо: Б. Итон (США), Н. Балабаев, О. Энджел (США), М. Карплус (США), С. Нэджел (США), Л. Абатуров, В. Бендерский, Д.С. Чернавский, А. Гросберг, А. Плачинда, ?, Л.А. Блюменфельд, Куликов, В.Н. Морозов, член делегации США, А. Демченко, Г. Петско (США), Г.И. Лихтенштейн, Ю.А. Берлин, М.В. Волькенштейн, Н.С. Ованесян, В.Д. Федотов, Г. Фраунфельдер (США), В. Седов, В.И. Гольданский, ?, Ю.Ф. Крупянский, Л.И. Трахтенберг, А.С. Давыдов, И.В. Куринов, А.Б. Рубин, В.К. Имшенник, К.В. Шайтан, В.Я. Рочев, П. Волинес (США), И. Упоров, Г. Модзолеевски (США), Ю.А. Лебедев, И.П. Суздальев, ?, К. Мейо (США), ?, Ф. Стиллинджер (США).

Приблизительно в это же самое время в Отделе развивается метод тритиевой планиграфии. Корни метода уходят в работы лаборатории ядерной химии. В этой лаборатории Б.Г. Дзантиев руководил небольшой группой сотрудников, которая занималась хемоядерным синтезом и исследованиями реакций горячих атомов отдачи, получающихся в результате ядерных превращений. В 1976 г. была организована группа изотопных меток, которую возглавил А.В. Шишков. Она просуществовала до 1988 г., когда на ее базе была создана лаборатория структурной

организации биологических систем. В лаборатории продолжал развиваться метод бомбардировки атомарным тритием биомакромолекул. В сочетании с теоретическими исследованиями процесса, разработанными имитационными компьютерными алгоритмами и предсказанием структуры белков он перерос в метод тритиевой планиграфии. В последние годы сотрудники лаборатории, которую сейчас возглавляет Е.Н. Богачева, интенсивно занимаются исследованием белковой компоненты растительных и животных вирусов.

Возможность изучения поверхности биологических макромолекул на уровне аминокислотных остатков и даже отдельных атомных групп делает разработанный А.В. Шишковым, Б.Г. Дзантиевым и В.И. Гольданским метод тритиевой планиграфии подспорьем для существующих в данный момент методов исследования структуры.

Академиком В.И. Гольданскому, А.С. Спирину с сотрудниками А.В. Шишковым, В.А. Колбом, Е.Н. Богачевой и другими за работу «Химия горячих атомов трития как основа метода исследования поверхностных молекулярных слоев и структуры биополимеров» присуждена Государственная премия Российской Федерации в области науки и техники за 2000 год.



*Слева направо, лауреаты:
А.В. Шишков, В.А. Колб, Е.Н.
Богачева*

Начиная с 60-годов Виталия Иосифовича увлекается проблемой возникновения биологической гомохиральности, проблемами предбиологической эволюции, проще говоря проблемой возникновения жизни. В 80-е годы Гольданский В.И. активно сотрудничал по этой теме с Леонидом Морозовым, работавшим тогда в НИИ по БИХС Льва Арамовича Пирузяна, в группу которого входили Владимир Кузьмин и Владик Аветисов. В 1984 году трагически ушел из жизни Леонид Морозов, к лету 1985 года НИИ по БИХС Левы Пирузяна был ликвидирован. В этот драматический период, В.И. Гольданский, спасая научное направление, взял Владика Аветисова и Владимира Кузьмина "под свое крыло", в теоретическую группу Юрия Берлина в Отделе строения вещества. В начале Ельцинской эпохи уехал в США Юрий Берлин, ушел из жизни Владимир Кузьмин. Сохраняя тематику, Виталий Иосифович возложил на д.ф.м.н. В.А. Аветисова обязанности руководителя теоретической лаборатории, которой он успешно руководит по сей день. Несомненно, следует отметить цикл работ лаборатории, сделанных совместно с Виталием Иосифовичем Гольданским до конца 90-х, и посвященных сценарию "хиральной катастрофы" в возникновении биологической гомохиральности. Основные идеи этого сценария изложены в публикациях В.И. Гольданского, В.В. Кузьмина и В.А. Аветисова периода 1989-1996 годов в ведущих российских и международных журналах. К сегодняшнему дню эти работы имеют большой индекс цитируемости (более 500) и продолжают находиться в фокусе внимания работ, посвященных проблеме возникновения биологической гомохиральности.



*Аветисов В.А. проводит
очередной семинар*

Из современных направлений деятельности лаборатории, следует отметить работы, посвященные сетевым системам и наномасштабной механике. Один из результатов вынесен в презентацию значимых результатов научных работ Отдела в 2016-2021 гг.

Другим значимым результатом научных работ Отдела в 2016-2021 гг. (см. презентацию) является изучение архитектуры нуклеоида бактерий, которые проводятся в Лаборатории динамики биополимеров. Руководителем лаборатории является автор этих строк д.ф.м.н. Крупянский Ю.Ф. Интерес к этой проблеме возник не сразу. Лаборатория создавалась для изучения динамических свойств белков. Взаимодействуя с сотрудниками Института микробиологии РАН и изучая действие факторов анабиоза клетки, которые оказались также и «химическими шаперонами», на динамические свойства белков, мы увидели сильное и разнообразное действие этих факторов на динамику различных белков. Постепенно мы начали интересоваться механизмом функционирования клетки. Поскольку функционирование клетки определяется 3D архитектурой генома, то стали интересоваться конденсацией ДНК в клетке и структурой конденсированной ДНК в нуклеоиде простейших бактерий *Escherichia coli*. При стрессе голодания поддержание упорядоченности динамическим способом

становится невозможным, и бактерии задействуют энергонезависимый механизм поддержания упорядоченности и защиты жизненно важных структур (ДНК) – создание устойчивых молекулярных структур, как в неживой природе. Одним из новых механизмов структурного ответа является внутриклеточная нано(био)кристаллизация ДНК с белком Dps.



Крупянский Ю.Ф. выступает на семинаре Отдела

Чрезвычайно этим заинтересовавшись, мы начали изучать возможные структуры конденсированной ДНК в нуклеоиде бактерии *Escherichia coli*. Исследования проводились с помощью дифракции синхротронного излучения (синхротрон EBS-ESRF, Гренобль, Франция) и просвечивающей электронной микроскопии (сотрудничество с кафедрой биоинженерии МГУ). Экспериментальные результаты позволили в первом приближении создать простые модели структур нижнего иерархического уровня конденсированной ДНК в нуклеоиде покоящихся клеток. Дальнейшее уточнение структуры конденсированной ДНК в клетке мы ожидаем получить с помощью обработки данных нано-флуоресцентной томографии на станции ID-16A синхротрона EBS-ESRF, Гренобль.

В Отделе строения вещества внедренческие работы – большая редкость. Наиболее яркая работа связана с именем В.Г. Никольского. С начала 80-х годов В. Г. Никольский посвятил основное внимание фундаментальной проблеме, связанной с пластическим течением твердых

органических материалов. Совместно с группой сотрудников ИХФ РАН ему удалось обнаружить и исследовать явление высокотемпературного охрупчивания целого ряда полимерных термопластов, разработать метод сверхтонкого измельчения синтетических и природных полимеров, резин и композиционных материалов, или метод высокотемпературного сдвигового измельчения (ВСИ). Метод основан на явлении множественного растрескивания полимерных термопластов и резин в интенсивном силовом поле.



*Никольский В.Г. слушает
сотрудников лаборатории*

В лаборатории 1103, руководителем которой является В.Г. Никольский, разработаны теоретические основы метода. Лаборатория не остановилась на разработке фундаментальных основ метода. Для реализации метода ВСИ разработаны и созданы лабораторные и промышленные измельчающие установки – роторные диспергаторы, обеспечивающие получение высокодисперсных полимерных и резиновых порошков с производительностью от 10 г/час до 300 кг/час при минимальных энергозатратах. При участии Лаборатории 1103 Отдела строения вещества разработаны Технические условия на «Материал композиционный ПОЛИЭПОР-РП на основе активного резинового порошка» СТО 11101543-007-2021. Модификатор ПОЛИЭПОР изготовлен в АО «ЭНЕРГОТЕКС» (г. Курчатова, Курская обл.) Модификатор ПОЛИЭПОР-РП применен в 2020 г. при строительстве российской части мостового перехода через реку Амур.

Основные внедренческие достижения смотри в значимых результатах научных работ Отдела 2016 - 2021 гг., раздел внедрения.

Текст - Ю.Ф.Крупянский

Фото - Ю.Ф.Крупянский

Помощь в оформлении - И.В.Гордеева