

# Вестник МОСКОВСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

№ 5 — 1967

В. А. КРАСИЛЬНИКОВ, В. В. МИГУЛИН, Р. В. ХОХЛОВ

## РАЗВИТИЕ ФИЗИКИ КОЛЕБАНИЙ И ВОЛН В МОСКОВСКОМ УНИВЕРСИТЕТЕ ЗА 50 ЛЕТ

Изучение физики колебаний и волн в Московском университете имеет давние традиции; достаточно напомнить, что этой областью физики занимались А. С. Столетов, Н. А. Умов, П. Н. Лебедев, А. А. Эйхенвальд, В. К. Аркадьев. Электромагнитные волны изучал А. Г. Столетов, открывший закон фотоэффекта, волновые процессы исследовал Н. А. Умов, впервые четко поставивший и решивший задачу о векторе плотности потока энергии (теорема Умова—Пойнтинга). П. Н. Лебедев экспериментально доказал существование светового давления и, используя резкий звук искры, при помощи дифракционной решетки выделял ультразвуковые волны заданных частот в воздухе. Работы П. Н. Лебедева и, в особенности учеников его школы, оказали большое влияние на развитие физики колебаний и волн в нашем университете как в первые годы Советской власти, так и в последующие годы [1, 2]. Трудные двадцатые годы были годами становления и развития физических исследований и подготовки научных кадров физиков в Московском университете. В лаборатории электромагнетизма, основанной В. К. Аркадьевым в 1919 г., уже в 1922 г. была выполнена важная работа А. А. Глаголевой-Аркадьевой [3] по получению и исследованию коротких радиоволн (82 мк) при помощи оригинального так называемого массового излучателя.

В эти годы начинается бурное развитие радиотехники и ее самых различных применений как в области связи, так и в области физического эксперимента. Важность радиофизических исследований была достаточно осознана физиками университета. Н. А. Капцов [4] успешно занимается изучением электромагнитных волн сантиметрового диапазона; он же, а также В. И. Романов развивают направление по изучению электронных явлений в радиолампах. В области радиотехники, радиофизики и акустики появляется ряд существенных работ Б. А. Введенского и С. Н. Ржевкина [5], К. Ф. Теодорчика, Н. Н. Малова и других. Трудно перечислить все интересные и важные работы 20-х годов в области колебаний и волн. К ним можно отнести, например, работы физика-теоретика С. А. Богуславского [6] по движению электронов в электромагнитных полях, что было важно для разработки различных электронных приборов, пионерские работы Б. А. Введенского [7] по

изучению распространения радиоволн, работы С. Н. Ржевкина [8] по физиологической акустике и т. д.

Однако основным научным достижением за этот период времени, несомненно, следует считать открытие в 1928 г. Л. И. Мандельштамом и Г. С. Ландовергом [9] комбинационного рассеяния света, которое было также обнаружено в Индии проф. Раманом и, к сожалению, в мировой литературе носит имя одного Рамана (раман-эффект). Открытие комбинационного рассеяния света было одним из удивительных открытий в оптике, и оно, как известно, нашло в дальнейшем обширное применение.

30-е годы были годами интенсивной работы в области физики колебаний и волн. За эти годы сложились и четко сформировались научные направления, научные школы и научные идеи.

В 1931 г. на физическом факультете МГУ по инициативе Л. И. Мандельштама была создана кафедра и лаборатория колебаний. Л. И. Мандельштам постоянно обращал внимание на тот факт, что колебательные и волновые процессы подчиняются общим закономерностям и, следовательно, колебания и волны целесообразно изучать с единой точки зрения, широко используя аналогии как в теории, так и в эксперименте.

С первых лет своего существования кафедра колебаний развернула большую научную и учебную работу. В последующие годы, по мере необходимости более глубокого и детального исследования колебательных и волновых процессов различной природы, на базе кафедры колебаний и кафедры электроники были созданы кафедры: акустики, физики СВЧ (теперь кафедра радиотехники), распространения радиоволн (теперь кафедра волновых процессов) и общей физики для механико-математического факультета, которые вместе с кафедрами физики колебаний и электроники ныне объединяют свою учебную и научную работу в рамках общего отделения радиофизики физического факультета.

Под руководством Л. И. Мандельштама и с участием Н. Д. Папалекси, А. А. Андронов, А. А. Витт, С. Э. Хайкин, К. Ф. Теодорчик, Г. С. Горелик, С. П. Стрелков и другие проводили широкие исследования в области теории колебательных процессов в нелинейных системах. Был сформулирован ряд общих положений последовательной математической теории нелинейных колебаний и в 1937 г. вышла получившая широкое признание книга «Теория колебаний» А. А. Андропова, А. А. Витта и С. Э. Хайкина [10]. Эта монография впервые в мировой научной литературе содержала систематическое изложение весьма общего нелинейного рассмотрения колебательных процессов в динамических системах. Изложенные в этой книге методы, общий подход к изучаемым явлениям и конкретные результаты стали фундаментом для многочисленных исследований в этой области как в Советском Союзе, так и за рубежом во все последующие годы вплоть до наших дней.

Сотрудники и ученики Л. И. Мандельштама, работающие на физическом факультете, открыли новые явления (резонанс второго рода, акустическое захватывание и др.), развили методы анализа процессов синхронизации и параметрического возбуждения колебаний [11]. Г. С. Горелик [12] обобщил теорию резонанса на системы с периодически изменяющимися параметрами. В. В. Мигулин [13] прозвел общее рассмотрение и изучил явление комбинационного резонанса. С. П. Стрелков совместно с Г. А. Бендриковым [14] изучил возникновение автоколебаний в аэродинамических потоках, что привело к суще-

ственным практическим результатам при создании аэродинамических труб больших мощностей. А. А. Вигт [15] исследовал особенности автоколебаний в системах с распределенными параметрами и совместно с А. А. Андроновым и Л. С. Понтрягиным [16] выполнил первые исследования поведения автоколебательных систем при воздействии на них флуктуационных процессов. С. Э. Хайкиным и Л. Н. Лошаковым была экспериментально исследована задача о воздействии случайных сил на колебательную систему [17].

Исследования К. Ф. Теодорчика [18] привели к созданию метода рассмотрения широкого круга задач об автоколебаниях. Этот метод, получивший название «энергетического метода», органически связан с основными идеями общего нелинейного подхода к процессам автоколебаний, развитого в работах школы Л. И. Мандельштама и, обладая большой физической наглядностью, позволяет приближенно решать многие практически важные задачи.

Все эти исследования колебательных процессов и ряд смежных работ сыграли исключительную роль в развитии радиотехники, акустики, теории регулирования и устойчивости динамических систем как в СССР, так и за рубежом.

Переезд А. А. Андропова (в 1931 г.), а позднее и Г. С. Горелика в г. Горький привели к созданию в Горьком крупной и успешно работающей школы радиофизиков в области физики колебаний.

Работа ряда учеников Л. И. Мандельштама — питомцев физического факультета МГУ — С. М. Рытова, П. А. Рязина, М. А. Давильковского, М. И. Филиппова и др. в Физическом институте АН СССР привела к формированию в стенах ФИАН большой группы физиков-колебателей, работавших в тесной связи с кафедрой колебаний университета.

В области волновых процессов, изучение которых шло параллельно изучению теории колебаний за 30-е годы был выполнен также ряд фундаментальных работ. Прежде всего под руководством Л. И. Мандельштама и Г. С. Ландсберга продолжалось дальнейшее экспериментальное изучение комбинационного рассеяния света как мощного средства изучения строения молекул. Ряд важных теоретических результатов в этом направлении был получен М. А. Леонтовичем. По предложению Л. И. Мандельштама ленинградский физик Е. Ф. Гросс занялся изучением рэлеевского рассеяния света в кристаллах кварца и довольно быстро получил существенный результат — обнаружил тонкую структуру линий рэлеевского рассеяния света в кварце и далее в жидкостях (образование дублетов и триплетов Мандельштама—Бриллюэна) благодаря рассеянию света на дебаевских упругих волнах. Объяснение наблюдавшихся эффектов требовало предположения, что упругие волны частот порядка  $10^{11}$  гц (т. е. гиперзвуковых частот) поглощаются в жидкости гораздо слабее, чем это следовало из обычных представлений. Опыты П. А. Бажулина [19] с распространением ультразвука в жидкостях также привели к обнаружению ряда аномальных свойств в поведении скорости и поглощения звука в ряде органических жидкостей.

Все эти трудные вопросы нашли прекрасное объяснение в релаксационной теории Л. И. Мандельштама и М. А. Леонтовича [20] (1937 г.), общепринятой в настоящее время и являющейся важным разделом термодинамики неравновесных процессов.

Интересные работы были проведены также по дифракции света на ультразвуке (С. М. Рытов [21], В. К. Харизоменов [22]). Следует отметить теоретические работы А. А. Власова и В. С. Фурсова [23] по изуче-

нию ширины и сдвига спектральных линий в газах (1936, 1939 г.), связанного с различными типами взаимодействия между возбужденными и невозбужденными атомами.

Очень интересными и важными в практическом отношении были исследования распространения радиоволн вдоль земной поверхности, проводимые Л. И. Мандельштамом и Н. Д. Папалекси [24]. Хотя эти работы в основном велись вне стен физического факультета, некоторые вопросы, связанные с разработкой методики исследования, решались на кафедре колебаний.

Использованный оригинальный метод радиоинтерферометра (интерферометр Мандельштама и Папалекси) сыграл большую роль в развитии отечественной радионавигации, радиолокации и в вопросах изучения распространения радиоволн. В этих работах существенное участие принимал В. В. Мигулин [25].

Большим достижением в области акустических колебаний и волн оказалось создание С. Н. Ржевским, Г. Д. Малюжиным, В. С. Нестеровым, М. С. Анциферовым [26] так называемых резонансных поглотителей звука, их теоретическое обоснование и экспериментальное изучение. Эти работы были вызваны практическими потребностями архитектурной акустики; разработка и внедрение этих звукопоглотителей потребовали привлечение интересных физических идей, солидного математического аппарата и сложной экспериментальной техники. Это направление работ развивалось дальше на физическом факультете вплоть до наших дней.

Важные и интересные работы по электронике, проводимые Н. А. Капцовым, В. И. Романовым, Г. В. Спиваком, П. В. Тимофеевым, Н. С. Хлебниковым, С. Д. Гвоздовером, Э. М. Рейхруделем, также затрагивали вопросы колебаний и волн, однако их направление стоит несколько в стороне от темы данной статьи и поэтому здесь не рассматривается.

Великая Отечественная война 1941—1945 гг. в определенной мере приостановила интенсивную работу по теоретическим исследованиям, однако большее внимание начало уделяться практическим применениям физики колебаний и волн. В военное время большую роль сыграли оптические исследования по спектральному анализу металлов, начатые под руководством Г. С. Ландсберга еще в 1931 году. В. Ф. Смирнов внедрил новые образцы спектральной аппаратуры для быстрого анализа металлов и сплавов. Ф. А. Королев занимался исследованиями по спектроскопии высокой разрешающей силы, по многолучевой интерферометрии и по оптическим методам исследования направленного взрыва. В это же время в связи с проблемами радиолокации интенсивно велась работа по изучению распространения радиоволн (В. В. Мигулин, С. Э. Хайкин, М. А. Леонтович, В. В. Владимирский, П. Е. Краснушкин, В. А. Красильников).

Первое послевоенное десятилетие направление физики колебаний и волн развивалось очень быстро. В конце 40-х годов организационно оформилось радиофизическое отделение, увеличилось число преподавателей, научных сотрудников, студентов и аспирантов, занимающихся проблемой колебаний и волн. Продолжалась разработка нелинейной теории колебаний. Кроме того, С. П. Стрелков, К. Ф. Теодорчик, Г. А. Бендриков развивали метод анализа линейных систем автоматического регулирования на основе графического метода траекторий корней. С. П. Стрелков изучил линейные воспроизводящие системы, создав строгую теорию качества воспроизведения усилителями сервосистемами. В. В. Мигулин, М. Д. Карасев, Т. Н. Ястребцева исследо-

вали работу мультивибраторов, спусковых схем и ряда других импульсных систем.

В области волновых процессов был получен ряд существенных достижений, М. А. Леонтович [27] в весьма важных исследованиях разработал метод приближенного решения задачи о распространении электромагнитных волн вдоль поверхности с достаточно большой проводимостью, используя приближенную запись граничных условий; эти условия теперь носят название «граничных условий Леонтовича». Этот метод играет большую роль в работах по изучению распространения радиоволн вдоль поверхности земли, а также в большом числе акустических задач.

П. Е. Краснушкин [28] развил метод исследования волновых процессов — метод нормальных волн (перенеся на распределенные системы идею метода нормальных колебаний сосредоточенных систем), который был им успешно применен для анализа ряда необъяснимых ранее явлений распространения волн в волноводах, в волноводных каналах и в слоистых средах. Этот метод в настоящее время широко используется в волноводных задачах. В. А. Красильниковым [29] был выполнен ряд теоретических и экспериментальных работ по распространению звуковых и электромагнитных волн (радиоволн и света) в среде со случайными неоднородностями коэффициента преломления (турбулентная атмосфера), в которых были использованы теоретические результаты Колмогоровской теории локально-изотропной турбулентности. Это направление исследований оказалось очень важным и далее широко развивалось как у нас в стране, так и за рубежом и превратилось в настоящее время в целую область исследования в радиофизике, оптике, акустике. М. Д. Карасев, А. А. Коваленко, Н. А. Арманд, В. В. Тяжелов изучали распространение поверхностных электромагнитных волн, распространяющихся вдоль одиночного провода и в многопроводных системах. С. Д. Гвоздовер, В. М. Лопухин занимались изучением колебаний и волн в задачах электроники [30].

В области оптических исследований Ф. А. Королевым с сотрудниками изучалась область многолучевой интерферометрии и спектроскопии высокой разрешающей силы [31]. Была создана теория многолучевых интерферометров с учетом дифракционных явлений: развита теория мультиплекс-интерферометров. Разработаны теории интерференционных светофильтров и многослойных диэлектрических интерференционных зеркал. С разработанной аппаратурой были проведены исследования сверхтонкой и изотопической структуры спектров атомов и ионов водородно-гелиевой группы изотопов, изотопов ртути, галлия и др. Разрабатывались интерференционные светофильтры, нашедшие далее большое применение.

С переездом в новое здание в 1953 г. возможности научной и педагогической деятельности резко возросли. Появление и применение в системах радиоэлектроники большого числа новых принципиально нелинейных элементов и устройств с их специфическими свойствами и характеристиками (транзисторы, туннельные и параметрические диоды, ферриты, высокочастотные нелинейные диэлектрики и др.) потребовали интенсивной исследовательской работы по изучению колебательных процессов в системах с подобными элементами. Используя разработанные методы анализа и идеи, лежащие в основе созданного на физическом факультете общего нелинейного колебательного подхода, физики Московского университета получили ряд новых результатов. Был изучен ряд особенностей поведения различных автоколебательных систем, изучены колебания в системах с нелинейными реактивны-

ми элементами, проведен анализ общих вопросов параметрического усиления и регенерации. Всесторонне исследованы маломощные параметрические генераторы, делители и умножители частоты, рассмотрены процессы в цепях с транзисторами и другими полупроводниковыми приборами и изучались колебания в системах с запаздывающими силами.

Результаты упомянутых многочисленных исследований приводились в большом числе публикаций в научных изданиях и содержатся также в получивших широкую известность книгах и монографиях К. Ф. Теодорчика [18], С. П. Стрелкова [32], В. В. Мигулина [33], Ю. М. Азыяна, Г. Н. Берестовского, Л. Н. Капцова, К. С. Ржевкина, К. Я. Сенаторова [34], Г. А. Бендрикова и К. Ф. Теодорчика [35].

С. П. Стрелков, А. А. Харламов, П. С. Ланда, Ю. М. Романовский [36] занимались электромеханическим моделированием колебательных систем, главным образом в применении к аэродинамическим задачам. С. Н. Ржевкин, В. В. Нестеров, К. А. Велижанина, К. М. Иванов-Шниц [37] продолжали исследовать распространение волн в сложных акустических системах (трубы, звукопроводы, резонаторы).

В серии работ Р. В. Хохлов показал, что круг нелинейных колебательных проблем, который удастся эффективно проанализировать, может быть существенно расширен при использовании предложенного им метода, так называемого вторичного упрощения укороченных уравнений [38]. С помощью этого метода был рассмотрен ряд задач теории синхронизации генераторов, деления частоты, получен ряд результатов в нелинейной теории электронных приборов диапазона СВЧ, квантовых генераторов, параметрических усилителей и генераторов.

Следует отметить результаты работы по применению колебательных систем для измерения весьма малых механических смещений (до  $10^{-12}$  см) и малых сил ( $1 \cdot 10^{-9}$  дин). Эти работы, проводимые В. Б. Брагинским [39], привели к возможности осуществления тонких экспериментов по измерению светового давления от маломощных источников света, по проверке малых гравитационных эффектов (например, показано отсутствие «гравитационной экранировки» на уровне  $1,5 \cdot 10^{-11}$  от ньютоновского взаимодействия) и некоторых выводов общей теории относительности.

В. М. Лопухин, В. Б. Магалинский, В. П. Мартынов, А. С. Рошаль [40] занимались колебаниями и волнами, вызванными электронными потоками; к этому же циклу работ относятся исследования С. Д. Гвоздова [41]. П. А. Бажулин, Ф. А. Королев, Л. В. Левшин с сотрудниками [42] занимались дальнейшими исследованиями по спектральному анализу.

В развитии теории колебаний вслед за разработкой линейных задач центр интересов этой науки, как известно, переместился в область нелинейных колебательных процессов. Можно сказать, что подобное положение начинает иметь место в последние годы в области теории волн. В связи с применением все больших интенсивностей упругих волн (в особенности ультразвукового диапазона) все в большей мере начинают проявляться нелинейные эффекты, играющие в ряде случаев определяющую роль; развивается нелинейная акустика. Получение больших интенсивностей электромагнитных волн радиодиапазона и когерентного излучения оптического диапазона (лазеры) и зависимость диэлектрической проницаемости  $\epsilon$  и магнитной восприимчивости  $\mu$  сред от электрического и магнитного полей привели к тому, что в электродинамике и оптике также становится необходимым учет нелинейных эффектов, возникают и развиваются нелинейная электродина-

мика и нелинейная оптика. В развитии эксперимента и теории нелинейных волновых процессов как в области упругих волн, так и в области электромагнитных волн уже получены существенные результаты и, можно думать, что в ближайшее время эта область будет развиваться еще более быстро, чем сейчас.

Освоение миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов электромагнитных волн и успехи последних лет в создании лазеров привели к необходимости разработки нелинейной теории волн, которая по образцу нелинейной теории колебаний обобщала бы многочисленные отдельные явления в поведении различных устройств. В настоящее время выявлены наглядные качественные понятия и представления, выработаны руководящие «волновые» концепции и проведено систематическое изучение круга нелинейных волновых явлений в целом.

Успехи исследований волновых явлений в нелинейных средах достигнуты во многом благодаря привлечению идей и методов нелинейной теории колебаний. Вместе с тем следует обратить внимание на специфику волновых процессов, которая привела к необходимости создания математического аппарата нелинейной теории волн. Отрадно констатировать, что подобно тому, как в 30—40-е годы в области нелинейной теории колебаний физический факультет создал общепризнанную ведущую школу и полученные результаты заложили основы нелинейной теории колебаний, так в 50—60-е годы подобное положение имеет место в области нелинейных волновых процессов.

Начиная с 1955 г. В. А. Красильниковым и Л. К. Зарембо велись работы по нелинейным волновым процессам в акустике — главным образом в области ультразвуковых волн. Сначала ими (совместно с В. А. Шкловской-Корди) было показано [43], что даже при сравнительно небольшой интенсивности ультразвука в слабо поглощающей жидкости (например, в воде) синусоидальная у излучателя волна по мере своего распространения искажается, образуются гармоники.

В. А. Красильникову совместно с В. А. Буровым удалось показать [44], что при достаточно больших интенсивностях ультразвука волна из синусоидальной на некотором расстоянии от излучателя вообще превращается в пилообразную слабую периодическую ударную волну; ее поглощение оказывается существенно больше, чем волны синусоидальной. Эти работы привлекли внимание к нелинейной акустике и заставили по-новому смотреть на открывшиеся экспериментальные возможности изучения нелинейных волновых процессов при распространении упругих волн. Далее в 1961 г. было показано экспериментально (В. А. Красильников, А. А. Гедройц) [45], что благодаря ангармонизму решетки нелинейное искажение ультразвуковых волн имеет место (даже при сравнительно небольших интенсивностях) и в твердых телах. Эти эксперименты представляют собой прямое доказательство того, что дебаевские волны или тепловые фононы в твердых телах нелинейно взаимодействуют между собой.

Нелинейные взаимодействия упругих волн в твердых телах приводят к ряду обнаруженных интересных эффектов — комбинационному рассеянию звука на звуке [46], влиянию дислокаций на искажение поперечных волн и т. д. Кроме фонон-фононных взаимодействий, в последние годы изучаются также взаимодействия между фононами и электронами, фононами и спинами. Широкий круг вопросов нелинейной акустики, главным образом фонон-фононовых взаимодействий, изложен в монографии Л. К. Зарембо и В. А. Красильникова [47]. К нелинейной акустике относятся ряд работ, выполненных Р. В. Хохловым и С. И. Солуяном [48]. Метод малого параметра, обобщенный ими на волновые

задачи, позволил проанализировать формирование ударных волн в диссипативных, релаксационных средах; демодуляцию акустических волн в нелинейной среде.

В последнее время первостепенное значение приобрели исследования волновых процессов СВЧ и оптического диапазонов (электродинамика нелинейных диспергирующих сред), главным образом в связи с появлением и усовершенствованием оптических квантовых генераторов. Методы, разработанные в нелинейной теории волн, были использованы для изучения нелинейных оптических процессов.

Ряд существенных результатов, относящихся к первому этапу этих исследований, изложен в монографии С. А. Ахманова и Р. В. Хохлова [49]. В этой книге дана теория оптических преобразователей частоты, теория параметрических генераторов и усилителей оптического диапазона. Коллективом сотрудников под руководством С. А. Ахманова и Р. В. Хохлова выполнена серия экспериментальных и теоретических работ по различным проблемам нелинейной оптики. Эксперименты, проведенные А. И. Ковригиным [50] по умножению частоты лазеров, позволили создать мощные генераторы когерентного излучения на новых (кратных) частотах в оптическом и ближнем ультрафиолетовом диапазонах.

Теория нелинейного взаимодействия волн получила дальнейшее развитие в работах А. П. Сухорукова [51] по дифракции волн в нелинейных средах. Из этих работ особый интерес представляют исследования вопросов, связанных с динамикой самофокусировки мощных световых пучков в нелинейных средах. Развита А. С. Чиркиным методика анализа взаимодействия волн, имеющих пространственную и временную некогерентность, позволила изучить протекание нелинейных эффектов в световых полях многомодовых лазеров, и нелазерных источников [52].

На основе модели классического осциллятора В. Т. Платоненко [53] дал теорию вынужденного комбинационного расстояния и, в частности, предсказал возможность получения сверхкоротких импульсов длительностью  $10^{-11}$  сек при генерации стоксовой волны, бегущей навстречу пучку лазера, играющего роль накачки.

Особое место среди когерентных источников, полученных методами нелинейной оптики, принадлежат параметрическим генераторам света с перестраиваемой частотой. Принципиальная возможность создания такого генератора была подсказана С. А. Ахмановым и Р. В. Хохловым в 1962 г. Спустя 3 года параметрический генератор был практически осуществлен А. И. Ковригиным; А. С. Пискарским и В. В. Фадеевым [54]. Перестройка частоты (на 10% относительно средней) осуществлялась поворотом нелинейного кристалла, помещенного внутрь резонатора. Перестраиваемый параметрический генератор света имеет большое значение при изучении проблемы резонансного взаимодействия когерентного излучения с веществом в физике, химии и биологии.

Дальнейшие исследования в области параметрической генерации и усиления света привели к предсказанию Д. Н. Клышко явления параметрической люминесценции, которое было экспериментально зарегистрировано и изучено В. В. Фадеевым, О. Н. Чунаевым и Д. П. Криндачем. Это явление можно интерпретировать как спонтанный распад фотона накачки на два новых фотона. В результате такого распада в направлении синхронизма имеет место эффект накопления интенсивности новых фотонов. Область частот люминесценции, определяемая условиями, занимает весьма широкую часть оптического диапазона.



Авторы настоящего обзора не ставили перед собой задачу максимально полного перечисления всех исследований в области волновых и колебательных процессов, выполненных за годы Советской власти на физическом факультете МГУ. Здесь упомянуты лишь те исследования или циклы работ, которые, по мнению авторов, привели к существенно новым результатам и сыграли определяющую роль в формировании целых направлений в широкой области физики колебаний и волн. При этом наиболее подробно освещены работы последних лет в области нелинейных волновых процессов, явившихся основополагающими, как для нелинейной акустики, так и для нелинейной оптики — новых дисциплин, формирование которых принадлежит к числу достижений физического факультета. И в настоящее время активная работа ученых физического факультета в области развития и применения нелинейной теории колебаний, нелинейной теории волн, экспериментального изучения различных нелинейных колебательных и волновых процессов и систем — обеспечивает за радиофизическим отделением физического факультета МГУ ведущую роль в этих существенных разделах физики.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Мигулин Е. В. В кн.: «Московский университет за 50 лет Советской власти», под ред. И. Г. Петровского. Гл. Физика. Изд-во МГУ, 1967.
2. Гвоздовер С. Д. Развитие радиофизики и электроники на физическом факультете МГУ. Сб. «История и методология естественных наук», вып. II, физика. Изд-во МГУ, 1963.
3. Глаголева-Аркадьева А. А. Новый источник электромагнитных волн ультравысокой частоты. «Тр. съезда РАФА», 1922, г. Нижний Новгород, 1923. «Тр. Гос. эксп. электротехн. ин-та», № 2, М., 1924.
4. Kartzov N. A. Über die Diffraktion Hertzscher Wellen in einem Raumgitter. «App. d. Phys.», 69, Nr. 18, 1922.
5. Ржевкин С. Н. Некоторые особенности в работе генератора незатухающих колебаний с термононными лампами. М., Изд. Физ. ин-та при Моск. научн. ин-те, 1920; Ржевкин С. Н., Введенский Б. А. Прерывистый генератор, его теория и применение. «Телеграфия и телефония без проводов», № 11, 67, 1921.
6. Богуславский С. А. О влиянии магнитного поля на термононные токи. «Тр. Гос. эксп. электротехн. ин-та», № 2, 5, 1924; Богуславский С. А. Пути электронов в электромагнитных полях. «Тр. ин-та физики», вып. 11, М., 1929.
7. Введенский Б. А. К вопросу о распространении ультракоротких волн. «Вестн. теоретич. и экпер. электротехники», 12, 139, 1928.
8. Ржевкин С. Н. Слух и речь в свете современных физических исследований. М., 1928; 2-е изд. М.—Л., ОНТИ, 1936.
9. Мандельштам Л. И., Ландсберг Г. С. Новое явление при рассеянии света. «Журн. русск. физ.-хим. о-ва», 60, 335, 1928; Мандельштам Л. И. Полн. собр. трудов, т. I, М., Изд-во АН СССР, 1948, стр. 292.
10. Андронов А. А., Витт А. А., Хайкин С. Э. Теория колебаний. М.—Л., Физматгиз, 1937, 2-е изд. 1959.
11. Мигулин Е. В., Стрелков С. П., Теодорчик К. Ф. Работы ученых Московского университета в области физики колебаний и современные проблемы теории колебаний. «Вестн. Моск. ун-та», № 4—5, 125, 1955.
12. Горелик Г. С. Резонансные явления в линейных системах с периодически меняющимися параметрами. ЖТФ, 4, вып. 10, 1783, 1934; 5, вып. 2, 185, 1935; 5, вып. 3, 489, 1935.
13. Мигулин Е. В. Комбинационный резонанс. «Тр. Физ. ин-та АН СССР», 1, вып. 3, 71, 1938.
14. Бендриков Г. А., Стрелков С. П., Шубин Э. П. Автоколебания в аэродинамических трубах с открытой рабочей частью. ЖТФ, 11, вып. 13—14, 1194, 1941; Стрелков С. П. К теории автоколебаний в аэродинамической трубе с открытой рабочей частью «Уч. зап. МГУ», физика, вып. 77, 131, 1945; Стрелков С. П., Бендриков Г. А., Шубин Э. П. Автоколебания в аэродинамических трубах с открытой рабочей частью. «Уч. зап. МГУ», физика, вып. 77, 117, 1945.
15. Витт А. А. Распределенные автоколебательные системы. ЖТФ, 4, вып. 1, 144, 1934.

16. Понтрягин Л. С., Андронов А. А., Витт А. А. О статистическом рассмотрении динамических систем. ЖЭТФ, 3, 165, 1938.
17. Лошаков Л. Н., Хайкин С. Э. Экспериментальные исследования поведения системы при случайных начальных условиях. ЖЭТФ, 6, 858, 1936.
18. Теодорчик К. Ф. Автоколебательные системы. М., Гостехиздат, 1948.
19. Бажулин П. А. Затухание ультраакустических волн в уксусной кислоте. ДАН СССР, нов. сер., 3, 255, 1936; Бажулин П. А. Поглощение ультраакустических волн в жидкостях. ЖЭТФ, 8, 457, 1938.
20. Мандельштам Л. И., Леонтович М. А. К теории поглощения звука в жидкостях. ЖЭТФ, 7, 438, 1937.
21. Рытов С. М. Дифракция света на ультразвуковых волнах. «Изв. АН СССР», сер. физики, № 2, 223, 1937.
22. Харизоменов В. К. Модуляция света на ультразвуковых волнах. ЖТФ, 7, 844, 1937.
23. Фурсов В. С., Власов А. А. Теория ширины спектральных линий в однородном газе (ширина связи) ЖЭТФ, 6, 750, 1936; Фурсов В. С., Власов А. А. Ширина спектральных линий при больших плотностях однородного газа. ЖЭТФ, 9, 783, 1939.
24. Мандельштам Л. И. Интерференционный метод исследования распространения электромагнитных волн. «Изв. АН СССР», сер. физики, № 4, 525, 1938.
25. Мигулин В. В. Интерференция радиоволн. «Успехи физ. наук», 33, вып. 3, 353, 1948.
26. Ржевкин С. Н. Резонансное звукопоглощение. ЖЭТФ, 6, 2103, 1935; Ржевкин С. Н. О возможности получения больших коэффициентов поглощения звука при помощи системы резонаторов, ДАН СССР, 18, 25, 1938; Ржевкин С. Н. Обзор работ по резонансным звукопоглотителям. «Успехи физ. наук», 30, вып. 1—2, 40, 1946.
27. Леонтович М. А. Об одном методе решения задачи о распространении электромагнитных волн вдоль поверхности земли. «Изв. АН СССР», сер. физики, 8, № 1, 16, 1944; Леонтович М. А. О приближенных граничных условиях для электромагнитного поля на поверхности хорошо проводящих тел. Сб. «Исследования по распространению радиоволн». М., Изд-во АН СССР, 1948.
28. Краснушкин П. Е. Метод нормальных волн в применении к проблеме дальних радиосвязей. Изд-во МГУ, 1947; ЖТФ, 18, 431, 1948.
29. Красильников В. А. О распространении звука в турбулентной атмосфере, ДАН СССР, 47, 486, 1945; Красильников В. А. О влиянии пульсаций коэффициента преломления в атмосфере на распространение ультракоротких радиоволн. «Изв. АН СССР», сер. геогр. и геофиз., 13, № 1, 33, 1949; Красильников В. А. О флуктуациях угла прихода в явлении мерцания звезд. ДАН СССР, 65, 291, 1949.
30. Лопухин В. М. Возбуждение электромагнитных колебаний и волн электронными потоками. М., Гостехиздат, 1953.
31. Королев Ф. А. Спектроскопия высокой разрешающей силы. М., ГИТТЛ, 1953.
32. Стрелков С. П. Введение в теорию колебаний. М., «Наука», 1964.
33. Мигулин В. В. Основные принципы радиолокации. М., Воениздат, 1945; Мигулин В. В. Лекции по основам радиолокации. Изд-во МГУ, 1958.
34. Азьян Ю. М., Берестовский Г. Н., Капцов Л. Н., Ржевкин К. С., Сенаторов К. Я. Полупроводниковые триоды в регенеративных схемах. Под ред. В. В. Мигулина. М.—Л., Госэнергоиздат, 1959.
35. Бендриков Г. А., Теодорчик К. Ф. Траектории корней линейных автоматических систем. М., «Наука», 1964.
36. Стрелков С. П., Харламов А. А. Электромеханическая модель колебаний крыла с элероном в потоке воздуха. «Изв. вузов», радиофизика, X, № 3, 433, 1967; Ланда П. С., Стрелков С. П. О флаттере крыла при нелинейных аэродинамических силах. «Изв. АН СССР», механика и машиностроение, № 5, 111, 1962; Ланда П. С., Стрелков С. П. Об устойчивости системы управления элероном при наличии турбулентного возмущения. «Автоматика и телемеханика», 21, № 10, 1352, 1960; Романовский Ю. М., Стрелков С. П. О воздействии атмосферной турбулентности на самолет с управляемыми крыльями при различных скоростях полета. «Изв. АН СССР», механика, машиностроение, № 4, 3, 1959.
37. Iwanov-Schitz K. M., Rschevkin S. N., Welischanina K. A. Uber die Wirkung des Schallabsorbers, der eine Schwingende oberfläche bedect, auf die Schallausfrugalung. «Austica», 13, Nr. 6, S. 403, 1963; Ржевкин С. Н. К вопросу о присоединенной массе в неоднородных акустических волноводах. «Акустический журнал», XI, вып. 3, 371, 1965; Ржевкин С. Н. Теория звука, Изд-во МГУ, 1960.
38. Хохлов Р. В. К теории захватывания при малой амплитуде внешней силы. ДАН СССР, 97, № 3, 411, 1954; Khokhlov R. V. On the one method in the non-linear theory of oscillations. Trans. IRE CT—7, No. 4, 398, 1960.

39. Брагинский В. Б., Манукин А. Б. Об одном радиофизическом методе измерения малых механических колебаний. «Изв. вузов», радиофизика, IX, № 6, 1196, 1966; Брагинский В. Б., Мартынов В. К. Экспериментальное исследование возможного влияния промежуточного тела на гравитационное взаимодействие. «Вестн. Моск. ун-та», сер. физ., астрон., № 2, 60, 1966.
40. Лопухин В. М., Мартынов В. П., Рошаль А. С. Шумы и параметрические явления в электронных приборах сверхвысоких частот. М., «Наука», 1966.
41. Гвоздовец С. Д. Теория электронных приборов сверхвысоких частот. М., Гостехиздат, 1956.
42. Бабушкин А. А., Бажулин А. П., Королев Ф. А., Лёвшин Л. В., Прокофьев Е. К., Стриганов А. Р. Методы спектрального анализа. Изд-во МГУ, 1962.
43. Зарембо Л. К., Красильников В. А., Шкловская-Корди В. А. О распространении ультразвуковых волн конечной амплитуды в жидкостях. «Акустический журнал», 3, 29, 1957.
44. Буров В. А., Красильников В. А. Непосредственное наблюдение искажения формы интенсивных ультразвуковых волн в жидкости, ДАН СССР, 118, 920, 1958.
45. Красильников В. А., Гедройц А. А. Об искажении ультразвуковых волн конечной амплитуды в твердых телах. «Вестн. Моск. ун-та», сер. физ., астрон., № 2, 92, 1962; Гедройц А. А., Красильников В. А. Упругие волны конечной амплитуды в твердых телах и отклонение от закона Гука. ЖЭТФ, 43, 1592, 1962.
46. Гун Сю-фэнь, Зарембо Л. К., Красильников В. А. Экспериментальное исследование комбинационного рассеяния звука на звуке в твердом теле. ЖЭТФ, 48, 1598, 1965; Krasilnikov V. A., Zarembo L. K. Non linear interaction of Elastic Waves in Solids» «IEEE Trans. Son. Ultrason», 14, No. 1, 12, 1967.
47. Зарембо Л. К., Красильников В. А. Введение в нелинейную акустику, М., «Наука», 1966.
48. Солуян С. И., Хохлов Р. В. Распространение акустических волн конечной амплитуды в диссипативной среде. «Вестн. Моск. ун-та», сер. физ., астрон., № 3, стр. 52, 1961; Солуян С. И., Хохлов Р. В. Акустические волны конечной амплитуды в релаксирующей среде. «Акустический журнал», 8, 220, 1962; Khochlov R. V., Nangolnych K. A., Soluyan S. I. Waves of moderate amplitudes in absorbing media». «Acustica», 14, No. 5, 248, 1964.
49. Ахманов С. А., Хохлов Р. В. Проблемы нелинейной оптики. М., «Наука», 1964.
50. Ахманов С. А., Ковригин А. И., Пискараскас А. П., Хохлов Р. В. Каскадные умножители частоты в оптическом диапазоне. Письма ЖЭТФ, 2, 223, 1965.
51. Ахманов С. А., Сухоруков А. П., Хохлов Р. В. Самофокусировка и дифракция света в нелинейных средах. «Успехи физ. наук», 93, вып. 1, 19, 1967; Сухоруков А. П. О генерации второй оптической гармоники пучками конечной апертуры. «Изв. вузов», радиофизика, 9, 765, 1966.
52. Ахманов С. А., Ковригин А. И., Чиркин А. С., Чунаев О. Н. О статистических эффектах при генерации оптических гармоник. ЖЭТФ, 50, 829, 1966; Ахманов С. А., Чиркин А. С. Об удвоении частоты спектральной линии конечной ширины при волновых взаимодействиях в нелинейной среде. «Радиотехника и электроника», 11, 1915, 1966.
53. Платоненко В. Т., Хохлов Р. В. О механизме работы комбинационного лазера. ЖЭТФ, 46, 555, 1964; Платоненко В. Т. Резонансное вынужденное комбинационное рассеяние. В сб. «Нелинейная оптика», «Наука», 1967.
54. Ахманов С. А., Ковригин А. И., Пискараскас А. С., Фадеев В. В., Хохлов Р. В. Перестраиваемый параметрический генератор света на кристалле КДР. Письма ЖЭТФ, 3, 372, 1966.
55. Клышко Д. Н. Параметрическая люминесценция. Письма ЖЭТФ (в печати) 1967; Асхтанов С. А., Нупаев О. Н., Фадеев В. В., Khochlov R. V., Reyschko D. N., Kovrigin A. F. «Proc. symposium on Modern Optics». Politechnic Press. N. Y., 1967.