

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК

ПОД РЕДАКЦИЕЙ
Э. В. ШПОЛЬСКОГО

ТОМ
XXVII
ВЫПУСК 1

ГОСУДАРСТВЕННОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
ТЕХНИКО-ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ
МОСКВА 1945 ЛЕНИНГРАД

Адрес редакции: Москва, Орликов пер., д. 3.



ПЕТР ПЕТРОВИЧ ЛАЗАРЕВ

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК

Срч 101

ПЁТР ПЕТРОВИЧ ЛАЗАРЕВ
(1878 — 1942)

Э. В. Шпольский

В лице скончавшегося 24 апреля 1942 г. академика Петра Петровича Лазарева советская наука понесла большую потерю. Выдающийся и разносторонний учёный — физик, геофизик, физиолог, организатор огромной энергии и широкого масштаба, Пётр Петрович Лазарев сыграл важную роль в организации советской науки.

П. П. Лазарев родился в Москве 14 апреля 1878 г. в семье межевого инженера. По окончании Московской 2-ой гимназии П. П. поступил на Медицинский факультет Московского университета, который окончил в 1901 г. Уже в студенческие годы, наряду с серьёзным интересом к физиологии, у него появилось тяготение к физико-математическим наукам. Его идеалом стал Гельмгольц, начавший свою деятельность, как физиолог, постепенно перешедший к физике и закончивший гениальными работами в области гидродинамики и чистой математики. Это преклонение перед Гельмгольцем П. П. сохранил на всю жизнь: в его кабинете всегда стоял большой бюст Гельмгольца, в его образцовой научной библиотеке было собрано всё написанное Гельмгольцем и о Гельмгольце, наконец, будучи прекрасным рисовальщиком, П. П. сделал множество портретов Гельмгольца. Другим учёным, работы которого произвели неизгладимое впечатление на юного П. П. и в значительной степени определили круг его последующих работ, был гениальный американский биолог Жак Лёб. В начале девятисотых годов огромную сенсацию призвели открытия Лёба, показавшего, что некоторые явления, специфически характерные для живого организма и не наблюдающиеся в мёртвой природе (рост, размножение и т. п.), могут быть введены определённым воздействием физико-химических факторов и подчиняются простым количественным закономерностям, допускающим математическую формулировку. Так можно вызвать далеко идущий процесс деления неоплодотворённого яйца простым изменением концентраций ионов окружающей среды (искусственный партеногенез); сокращение мышц и нервное возбуждение также связано с действием

ионов, причём для минимального раздражения между концентрациями антагонистически действующих ионов должно иметь место определённое количественное соотношение; наконец, явления фототропизма подчиняются фотохимическому закону Бунзена-Роско. Эти открытия и в особенности установленные Лёбом и Нернстом количественные законы возбуждения, открывавшие путь для применения математического анализа к объяснению сложнейших жизненных явлений, чрезвычайно увлекли П. П. Интерес его к физико-математическим наукам оказался настолько серьёзным, что через два с небольшим года после окончания Медицинского факультета он сдал одновременно экзамены на учёную степень доктора медицины и экзамены за весь физико-математический факультет.

Избранный после этого ассистентом Клиники уха, горла и носа П. П. получил возможность отдаться научной работе. Повидимому, П. П. никогда не занимался практической медициной — к ней он не чувствовал тяготения; директор клиники, учитывая блестящие научные способности молодого ассистента и его горячий интерес к исследовательской работе, поручил ему заведывание ценнейшим собранием научных, главным образом акустических, приборов, которым располагала клиника, и с этими приборами П. П. выполнил свои первые научные работы. Эти работы были посвящены физиологии органов чувств — области, которая в дальнейшем стала одним из самых главных предметов исследований П. П. и его учеников. Первая из этих работ представляла собою исследование влияния разности фаз на восприятие звука, вторая — устанавливает интересную связь между слуховыми и зрительными ощущениями.

Начало девятисотых годов в Москве было временем расцвета деятельности П. Н. Лебедева, как учёного и как создателя физической школы. Большой интерес среди московских физиков вызвали заведённые П. Н. Лебедевым по европейскому образцу еженедельные физические коллоквиумы, на которых докладывались и обсуждались новые работы из различных областей физики. П. П. естественно образом начал посещать эти коллоквиумы сначала в качестве слушателя, а затем — активного участника. В то время он уже решил перейти от медицины к физике и, желая пройти серьёзную научную школу, в 1903 г. отправился работать за границу, в Страсбург. Проездка и выбор места работы были совершенно очевидно сделаны под влиянием Лебедева, который сам работал в Страсбурге и высоко ценил тамошний физический институт. В Страсбурге П. П. работал у проф. А. Брауна. Однако, эта заграничная командировка продолжалась недолго, так как в 1904 г. вспыхнула русско-японская война, и П. П., как врач, обязан был вернуться в Россию.

Вернувшись в Москву, П. П. не ограничивается посещением физического коллоквиума П. Н. Лебедева, но приступает к научной работе в его лаборатории. Эту работу он ведёт сначала в качестве добровольного практиканта, но быстро выдвигается и становится ассистентом и ближайшим помощником П. Н. Лебедева. Последн

сразу заметил талант П. П. и высоко оценил его. Работа у Лебедева и, в особенности, участие в руководстве его лабораторией, положила начало тесной личной дружбе обоих учёных, продолжавшейся до смерти Лебедева.

В 1907 г. П. П. преодолевает один из самых трудных барьеров, стоявших в то время на пути каждого молодого учёного, желавшего посвятить себя академической деятельности: он сдаёт так называемые «магистрантские» экзамены и становится приват-доцентом Московского университета.

В лаборатории Лебедева П. П. за очень короткий промежуток времени сделал две большие работы, из которых одна послужила ему магистерской диссертацией, другая — докторской. Магистерская диссертация была сделана на тему, предложенную П. Н. Лебедевым, и посвящена исследованию скачка температуры при теплопроводности на границе твёрдое тело — газ. Интерес к этому вопросу, повидимому, возник у Лебедева в связи с открытым им значительным повышением чувствительности термоэлементов при помещении их в вакууме. Наряду с этим исследование вопроса о скачке температуры имело и большое принципиальное значение, как подтверждение кинетической теории газов, интерес к которой снова пробудился после временного забвения под влиянием энергетической философии Оствальда.

Магистерская диссертация была защищена в 1911 г. К этому времени положение П. П. в лаборатории Лебедева совершенно окрепло: он стал не только ближайшим помощником Лебедева, но ему было разрешено самостоятельно привлекать сотрудников и давать им темы научных работ. Работы, которые были поставлены П. П., отражали его собственные научные интересы и значительно расширяли круг проблем, занимавших лебедевскую лабораторию. Большинство этих работ было связано с теми вопросами физико-химической биологии, которые увлекли П. П. в бытность его студентом-медиком и молодым врачом и которые собственно и привели его к занятиям физикой.

Так, наряду с работой студента Б. В. Ильина, посвящённой брауновскому движению, П. П. руководит работой студента В. В. Сребницкого, исследовавшего влияние концентрации ионов на поверхностное натяжение растворов на границе с воздухом, а студент П. П. Кандидов изучает под руководством П. П. влияние электрического заряда на поверхностное натяжение на границе между эфиром и водой. Все эти темы из области молекулярной физики и физической химии явным образом навеяны работами Нернста и Лёва и впоследствии будут использованы П. П. в его ионной теории возбуждения.

Приблизительно одновременно с началом самостоятельной деятельности в Университете П. П. приступил к преподаванию в Московском высшем техническом училище, где с 1908 г. был преподавателем, а в 1912 г. избран профессором по кафедре физики.

В 1912 г. П. П. защитил докторскую диссертацию на тему «Выцветание красок и пигментов в видимом спектре». Под этим скромным названием была представлена работа, заключающая в себе

важные результаты и широкие обобщения. Основная задача работы заключалась в исследовании законов химического действия света. В качестве удобного объекта исследования П. П. выбрал коллоидные слои некоторых красителей (преимущественно сенсibilизаторов к красной части спектра — цианин, пинавердол, пинахром и др.), которые быстро выцветают под действием света. Пользуясь простыми и точными физическими методами учёта количества разложившегося вещества и поглощённой энергии, П. П. впервые исследовал связь между поглощённой энергией и скоростью фотохимической реакции, зависимость скорости реакции от длины волны, влияние кислорода на скорость выцветания. Эти работы, частью напечатанные ранее также в *Annalen der Physik* и в *British Journal of Photography*, произвели большое впечатление во всём мире; они, безусловно, принадлежат к числу немногих основных работ доквантовой фотохимии.

Наряду с исследованием выцветания красителей, в качестве образца фотохимической реакции, П. П. рассмотрел в своей диссертации также и биологические вопросы, связанные с химическими действиями света. Он показал, в частности, что выцветание зрительного пурпура — пигмента, окрашивающего палочки сетчатки глаза, — подчиняется тем же простым законам, которые им были установлены для случая выцветания красителей. В той же главе своей диссертации П. П. указывает и на другие биологические процессы, подчиняющиеся основным законам фотохимии: приспособление организмов к цвету среды и так называемое фотодинамическое явление, которое есть не что иное, как фотохимическая сенсibilизация. Эта глава была зародышем большого направления, созданного П. П. и его сотрудниками в теории органов чувств.

Диссертация заканчивалась эскизом теории фотохимических явлений. В этой теории ещё не могли быть учтены квантовые законы поглощения света. Поэтому в настоящее время она имеет только исторический интерес. Однако, для своего времени она представляла несомненный шаг вперёд, так как в основе её лежала молекулярная картина механизма фотохимической реакции, в общем довольно близкая к современной.

Докторскую диссертацию П. П. уже не мог защищать в Московском университете (он защитил её в Варшавском университете), так как в 1911 г. произошел разгром Московского университета министром народного просвещения Кассо, в результате которого значительное большинство профессоров и молодых учёных ушли из университета. Покинул свою лабораторию и П. Н. Лебедев, а вместе с ним ушёл и П. П. Университет опустел, но появился новый центр, где нашли себе приют учёные, которые, понимая всю тяжесть последствий, связанных с уходом из университета, не пожелали подчиниться произволу царского министра. Этим центром послужил Городской университет имени Шанявского — учреждение, созданное на частное пожертвование генерала Шанявского и поддержанное городом Москвой. После разгрома Государственного университета

это учреждение оказалось богатым блестящими представителями науки, но оно было бедно средствами, а главное — помещением и оборудованием. Физические лаборатории расположились в двух местах: в доме Голицыных на Волхонке¹⁾ и в полуподвальном этаже дома № 20 по Мёртвому (ныне Островскому) переулку. В старинном дворянском особняке Голицыных, с мраморной лестницей, украшенной мраморными скульптурами, с обширным залом и домовая церковь было слишком мало места для целого университета. Достаточно сказать, что в одном небольшом коридоре помещались лаборатории — физическая, экспериментальной биологии — с проф. Кольцовым и физической кристаллографии — с проф. Г. В. Вульфом во главе. На долю физической лаборатории приходилось всего две комнаты, где располагались: практикум, демонстрационный кабинет и несколько установок для научных работ. Помещение в Мёртвом переулке было, правда, целиком отведено под научные работы, но оно состояло из двух небольших квартир, разумеется, совершенно не приспособленных для лабораторий. Кроме того, здесь же надо было поместить мастерскую и библиотеку. Коротко говоря, лаборатория в Мёртвом переулке была так же тесна и бедна, как и лаборатория на Волхонке. Но несмотря на эту бедность обстановки и недостаток приборов, все работники лабораторий отдавались делу с величайшим энтузиазмом, и творческая мысль здесь была ключом. Работы, которые были поставлены в этих лабораториях, велись отчасти под руководством самого П. Н. Лебедева, отчасти под руководством П. П. Среди сотрудников последнего было много юных студентов, которые параллельно с учением в университете, приступали к научно-исследовательской работе. Для этой молодёжи, к которой в то время принадлежали студенты С. И. Вавилов, Т. К. Молодой, Э. В. Шпольский, П. Н. Беликов, С. Н. Ржевкин и др., физики старшего поколения читали специальные курсы, а по воскресеньям все «от мала до велика», от учёного с мировым именем, каким был Лебедев, до студента второкурсника, — собирались на коллоквиум, где горячо обсуждались очередные проблемы физики. По традиции коллоквиум завершался «пост-коллоквиумом», т. е. уже совершенно непринуждённым продолжением беседы на научные темы за кружкой пива или за растегаем в дешёвом ресторане «Мартьяныч». Во всей этой жизни П. П. играл выдающуюся роль. П. Н. Лебедев, уже давно страдавший болезнью сердца, которая обострилась в результате перееданий и потягивания в связи с университетской драмой, почти не выходил из своей квартиры и сравнительно редко появлялся даже на коллоквиумах. Его признанным заместителем был П. П. Он руководил большим числом научных работ, вёл всю организационную и административную работу по лаборатории, председательствовал на коллоквиумах. Доверие, которое оказывал ему П. Н. Лебедев,

¹⁾ В настоящее время в этом доме, совершенно перестроенном, помещается отделение общественных наук Академии Наук СССР.

его обширные и разносторонние знания, способность быстро схватывать существо вопроса, обилие высказываемых оригинальных идей— всё это импонировало окружающим и создавало П. П. большой авторитет.

14 марта 1912 г. П. Н. Лебедев безвременно скончался в возрасте 46 лет и руководство «лебедевской лабораторией» Советом Городского университета им. Шанявского было поручено П. П.

Научные интересы П. П. в то время концентрировались вокруг проблем фотохимии, молекулярной физики и теории нервного возбуждения. С течением времени проблемы физиологии органов чувств и теории нервного возбуждения всё больше и больше выдвигались на первый план. Юношеские мечты о создании математической теории биологических процессов, навеянные работами Гельмгольца и Лёба, П. П. старался осуществить в развитой им физико-химической теории нервного возбуждения, которую он назвал ионной теорией возбуждения. В основе этой теории лежит упомянутая выше закономерность, эмпирически найденная Лёбом.

Именно Лёб впервые установил, что различные ионы действуют по отношению к возбуждению нервов и мышц антагонистически. Одни из них, например ионы K и Na, вызывают возбуждение, а другие, — например ионы Ca и Mg, угнетают его. Согласно закону Лёба, минимальное раздражение возникает при условии, когда между концентрациями C_1 и C_2 ионов-антагонистов имеется простая связь

$$\frac{C_1}{C_2 + b} = \text{const.}$$

Это соотношение П. П. выдвигает в качестве основного закона возбуждения и делает его исходным для своей теории. Он использует этот закон не только в теории раздражения нервов и мышц, но также и в теории периферического зрения, т. е. зрения при малых интенсивностях света, когда действующими элементами сетчатки являются палочки, содержащие длительный пурпур. Уже в своей докторской диссертации П. П. показал, что этот пигмент подчиняется обычным законам фотохимии. Предполагая, что продуктами фотохимического разложения зрительного пурпура являются ионы, и пользуясь основным соотношением между концентрациями ионов-антагонистов, П. П. математически выводит законы периферического зрения при различных условиях (постоянное освещение, мелькающее освещение и т. п.). Аналогичным образом строится теория слуховых, вкусовых ощущений, теория мышечных сокращений и т. д. Разработкой этой теории и её экспериментальным обоснованием, проверкой на опыте вытекающих из неё следствий П. П. занимался до конца жизни. К экспериментальной работе в этой области он привлек большое число учеников и сотрудников.

В 1914 г. началась первая мировая война, и П. П. по свойствам своего характера не мог оставаться её равнодушным свидетелем. Со всей своей незаурядной энергией он стал организовывать помощь

фронту. Техническая отсталость дореволюционной России была такова, что даже медицинские термометры в ней не производились, но выписывались из-за границы. Как только выяснилась острая потребность госпиталей в термометрах, П. П. при помощи своего сотрудника (впоследствии профессора Саратовского университета) К. А. Леонтьева организует при МВТУ мастерскую по изготовлению термометров. Широкое применение рентгеновских лучей для диагностических целей было в то время сравнительно новым делом. П. П. организует при физической лаборатории Университета Шанявского (переселившегося в 1913 г. в новое специально выстроенное здание) центральный рентгеновский кабинет для московских госпиталей и подвижной рентгеновский кабинет в автомобиле — для госпиталей Московской губернии, читает лекции по рентгенологии для врачей, принимает участие в составлении большого руководства по рентгенологии.

В 1916 г. Петербургский университет избирает П. П. профессором на место ушедшего в отставку за выслугой лет проф. О. Д. Хвольсона. Однако, П. П. отклоняет это предложение и остаётся в Москве. В начале 1917 г. он избирается действительным членом Российской Академии Наук, но при этом выговаривает себе условие — остаться в Москве и, вплоть до переезда самой Академии в Москву, ограничивается периодическими поездками в Ленинград.

Избрание П. П. в Академию произошло накануне Февральской Революции. За Февральской Революцией последовала Октябрьская Социалистическая Революция. П. П. понял всё великое историческое значение Октябрьской Революции и принял её без всяких колебаний. Когда родина — говорил он — переживает такое великое событие, как Революция, обязанность каждого честного человека быть на своём месте и всеми силами помогать ей. И П. П. всей своей напряжённой научной, организаторской и общественной деятельностью осуществлял эти слова. Сразу после Октябрьской Революции он предложил свою помощь Наркомздраву. В качестве продолжения своей прежней деятельности в области рентгенологии, он организовал при Наркомздраве Рентгеновскую, электромедицинскую и фотобиологическую секцию, которая послужила зародышем будущего Московского рентгеновского института. Каким авторитетом пользовались созданные П. П. рентгеновские учреждения, видно из следующего факта. Когда в начале болезни В. И. Ленина врачи нашли необходимым подвергнуть его рентгеновскому исследованию, это исследование было произведено рентгеновским кабинетом при лаборатории П. П. в Институте физики и биофизики.

Гражданская война потребовала организации совершенно нового в то время дела: военной маскировки. П. П. использует свои огромные и разносторонние знания в области физики и физиологии органов чувств и для помощи этому важному делу. Он организует лабораторию маскировки, в которой решаются разнообразные теоретические и чисто практические проблемы, связанные с краскомаскировкой, звукомаскировкой, камуфляжем и т. п.

П. П. принадлежит огромная заслуга создания первого советского научно-исследовательского института по физике. Как известно, до Революции русская наука была наукой университетской: она развивалась исключительно в лабораториях высших школ, главным образом — университетов. Разгром Московского университета в 1911 г. со всей остротой поставил на очередь вопрос о необходимости создания системы научно-исследовательских институтов без учебных функций. Выдающиеся русские учёные — П. Н. Лебедев, К. А. Тимирязев и др. выступили в печати с призывом к русскому обществу изыскать средства для создания таких институтов. В результате было учреждено «Московское общество научного института», имевшее целью создать ряд научно-исследовательских институтов, в первую очередь, физический институт для П. Н. Лебедева. К сожалению, Лебедев не дожидаясь осуществления своей мечты. Но начатое дело продолжалось при активном участии П. П. Для постройки физического института было получено крупное пожертвование, и в 1915 г. институт начал строиться на участке, отведённом Московским городским общественным управлением на Миусской площади, рядом с новым зданием Университета имени Шанявского. Учёный совет «Общества научного института» избрал директором будущего института П. П.

Несмотря на затруднения, связанные с военным временем, строительство института было закончено к началу 1917 г. На базе этого института, который в начале революции представлял собой только здание, практически без оборудования, П. П. создал при Наркомздраве Институт физики и биофизики. По времени организации — это был первый советский научно-исследовательский физический институт. Его научная и организующая роль в первые годы Революции была очень велика. В соответствии с разносторонними интересами своего руководителя, Институт вёл работу в различных областях физики, биофизики, геофизики. На его коллоквиумах собиралась вся «физическая» Москва, и все приезжавшие в Москву иногородние и иностранные физики считали своим долгом сделать доклад в «Миусском институте». Из недр этого Института вышел ряд учёных, впоследствии занявших ответственные места в научных учреждениях и на кафедрах высших учебных заведений. Таковы: С. И. Вавилов, В. В. Шулейкин, А. С. Предводителев, Г. С. Ландсберг, С. Н. Ржевский, П. А. Ребиндер, Н. Т. Фёдоров, С. В. Кравков, П. Н. Беликов, Б. В. Ильин, Э. В. Шпольский, В. Л. Левшин, А. Г. Калашников и др. В этом институте самим П. П. и его сотрудниками было выполнено много работ, которые приобрели широкую известность в СССР и за границей.

В 1918 г. П. П. приступил к организации новой большой работы, чрезвычайно важной в научном и практическом отношении. Речь идёт об исследовании Курской магнитной аномалии. История этого исследования очень интересна. В семидесятых годах прошлого столетия при первой геомагнитной съёмке России И. Н. Смирновым

было открыто 2 пункта в Курской губернии с резко выраженной магнитной аномалией. В течение последующих 20 лет различными исследователями производилась несистематическая работа по изучению этой аномалии, в результате которой были определены элементы земного магнетизма в 150—200 пунктах. Начиная с девяностых годов в течение последующих 22 лет профессор Московского университета Э. Е. Лейст один, без всякой помощи, произвёл геомагнитную съёмку в 4500 пунктах Курской губернии. Работа производилась классическими лабораторными методами, дававшими излишне высокую точность и крайне неудобными для применения в полевых условиях. Как бы там ни было, была проделана гигантская для одного человека работа при полном равнодушии правительства к этому делу большого государственного значения. Результаты своей работы в общем виде, без приведения координат мест, где производилась съёмка, Лейст доложил на коллоквиуме Института физики и биофизики весной 1918 г. Вывод, к которому он пришёл и который вначале энергично оспаривался геологами, состоял в том, что Курская магнитная аномалия обусловлена огромными залежами железа, причём был указан возможный общий характер залегания и его глубина.

Доклад этот был передан П. П. для напечатания, однако, без карты и координат, а Лейст уехал лечиться (в Германию) на курорт Наугейм, где летом 1918 г. внезапно умер. Осенью выяснилось, что получить необходимый цифровой материал к работе Лейста невозможно, так как этот материал остался в Германии. Более того, какой-то немецкий проходивец, в руки которого попали цифры и карты Лейста, предложил Советскому правительству купить у него этот материал за баснословную цену. Это предложение Правительством было отвергнуто и П. П. было предложено создать при Академии Наук комиссию для организации широкого исследования Курской магнитной аномалии. П. П. взялся за это дело со всей энергией и большим увлечением. Была создана Комиссия с участием крупных геологов (академики А. Д. Архангельский и И. М. Губкин), магнитологов, астрономов, геодезистов; выбраны наиболее рациональные методы исследования, соединяющие удобство работы в полевых условиях с достаточной точностью, и организованы экспедиции для производства съёмки на месте. Следует вспомнить, что работа началась в 1919 г., в разгар гражданской войны с белыми, и потому естественно, что она протекала в напряжённой обстановке. Вот что писал о начале работы П. П.: «Производство работ в 1919 г. началось из-за задержки откомандирования гидрографов только в июне; 17-го июня отряд приехал в деревню Белый колодец, откуда, по поручению председателя Комиссии П. П. Лазарева, и должна была быть начата работа...» Необходимо отметить здесь, что условия работы были [в течение лета] крайне неблагоприятными; за июль было всего 11 рабочих дней, остальное время из-за дождей и плохих дорог работать было невозможно. Не способствовала работе и общая обстановка. Уже

в самом начале в близлежащей деревне распространились слухи о том, что в Овсянниково прибыл отряд для восстановления власти помещиков и только умелыми и энергическими мерами начальника отряда К. С. Юркевича удалось добиться сознательного и разумного отношения к экспедиции со стороны граждан. Кроме всего перечисленного, очень мешала спокойной работе и близость фронта. Ещё в самом начале экспедиции отряд был задержан на станции Орёл, так как в Курск не пропускались даже воинские эшелоны. Далее во время работы приходилось многократно думать об эвакуации, пока, наконец, 16 августа начальнику отряда не пришлось дать приказ об эвакуации. В журнале Юркевича помечено: «16 августа вся местность была без власти, все учреждения Тима были эвакуированы в Карандаково, Белое и Мармыжи»¹⁾. Несмотря на эту напряжённую обстановку уже в течение лета 1919 г. были произведены все необходимые измерения в 443 пунктах, а к первому августа 1920 г. было промерено более 1600 точек, т. е. проделано свыше трети двадцатидвухлетней работы Лейста. Через два-три года Комиссия получила цифровые данные для 10 с лишним тысяч пунктов. При этом работа не ограничивалась магнитной съёмкой, но были произведены также гравиметрические измерения (под руководством проф. А. А. Михайлова). На основании всех этих данных были построены подробные карты района аномалии, установлен характер залегания железа и предсказана его глубина. Как известно, бурение подтвердило предсказание, и железо действительно было найдено.

Работа по исследованию Курской магнитной аномалии не ограничивалась для П. П. организацией этого большого дела. Благодаря своим блестящим способностям он с поразительной быстротой овладел этой совершенно чуждой для него областью. Он не только превосходно знал все методы измерения элементов земного магнетизма, но и овладел сложнейшими математическими методами теории потенциала и сам производил подробные расчёты полей при различных гипотезах о форме подземного «железного хребта», пересекающего Курскую губернию. Вместе с тем эта работа пробудила у него интерес к геофизике вообще. Со свойственной ему быстротой и энтузиазмом он немедленно поставил ряд работ по геофизике и, как всегда, послужил «центром притяжения» для ряда молодых работников. Из его сотрудников, создавших себе широкую известность своими работами в области геофизики, следует назвать прежде всего проф. В. В. Шулейкина и проф. Г. А. Гамбурцева.

В своей разносторонней организаторской деятельности П. П. уделял большое внимание научной литературе. В 1918 г. им было создано два журнала: один — под названием «Архив физических наук» должен был выходить на русском и французском языках; другим — являются «Успехи физических наук». Первый из этих жур-

¹⁾ П. П. Лазарев, Курская магнитная аномалия по работам Комиссии Академии Наук, Успехи физич. наук, II, вып. 1, 61, 1920.

налов через год прекратил существование по чисто техническим причинам, но впоследствии не восстанавливался. Вместо него П. П. организовал новый журнал — «Журнал прикладной физики», выходявший ряд лет и впоследствии заменённый «Журналом технической физики».

Что касается «Успехов физических наук», то роль и значение этого журнала настолько известны, что о нём говорить не приходится. Перу П. П. принадлежит ряд монографий и популярных книг. Таковы монографии «Основы учения о химических действиях света», «Ионная теория возбуждения» (в нескольких изданиях, а также в переводах на французский и немецкий языки), «Курская магнитная аномалия», таковы популярные книги по теории относительности, прекрасная книжка «Физика земли», изданная вторым изданием за несколько лет до его смерти; ему же принадлежит ряд биографий выдающихся русских и иностранных учёных — П. Н. Лебедева, А. Г. Столетова, Н. А. Умова, Б. Б. Голицына, Г. Гельмгольца.

До конца своей жизни П. П. не оставлял и преподавания в высшей школе. Много сил и времени уделял он также общественной работе. В трудные годы гражданской войны, когда Советское правительство по инициативе В. И. Ленина широко пошло навстречу улучшению бытовых условий учёных, П. П. играл выдающуюся роль в созданных с этой целью организациях. Он был председателем Комиссии по улучшению быта учёных врачей (КУБУВ), членом Центральной комиссии по улучшению быта учёных (ЦЕКУБУ), одним из организаторов Поликлиники для учёных, Московского Дома учёных и т. д.

Количество работ и научных статей, опубликованных П. П., огромно. Он считал необходимым возможно быстрее предавать гласности полученные им результаты, так как, по его мнению, неопубликованный результат оказывает давление на психику учёного и мешает его дальнейшей спокойной работе. В отстаивание своих научных и организационных положений он вкладывал много страстности.

Обладая широкими научными интересами, неистощимым запасом идей и живым общительным характером, он поддерживал связь с большим количеством русских и зарубежных учёных. Он оставил ценнейший архив, в котором сохранены для будущего историка науки важные материалы и интересная переписка с П. Н. Лебедевым, И. П. Павловым и рядом иностранных учёных. Большую ценность представляет также его обширная и тщательно подобранная библиотека, в которой интересен не только подбор книг, но и огромное количество отдельных оттисков, систематизированных по предметам и переплетённых искусными руками самого П. П.

П. П. умер в г. Алма-Ата, куда он был эвакуирован со своей лабораторией Академией Наук СССР. Последние годы жизни он страдал неизлечимой болезнью (сахарный диабет), требовавшей строгой диеты, который он исполнял далеко не безупречно. В эвакуации, в связи с ухудшившимся состоянием здоровья, был

сделан рентгеновский снимок, обнаруживший ещё более тяжёлую болезнь — рак желудка в неоперабельной стадии. Как врач, П. П. потребовал, чтобы снимок был ему показан и, потряс нный роковым диагнозом, умер от удара в ночь с 23-го на 24-е апреля 1942 г. в возрасте 64 лет, далеко не исчерпав богатых возможностей, данных ему природой.

В этом кратком очерке нет никакой возможности дать полную характеристику яркой личности П. П. Дело будущего историка науки разобраться в оставленном им научном наследстве и во всей его многогранной деятельности. Одно не подлежит сомнению — своими научными работами и организаторской деятельностью, созданной им большой школой учёных Пётр Петрович Лазарев оставил неизгладимый след в истории русской науки. Нам, его современникам и ученикам, остаётся с глубоким уважением склониться перед памятью о нём, как об учёном блестящей одарённости и человеке большого темперамента.

ТВОРЧЕСКИЙ ПУТЬ АКАДЕМИКА П. П. ЛАЗАРЕВА

Т. П. Кравец¹⁾

Руководитель и создатель Московской школы физиков, П. Н. Лебедев много рассказывал своим ученикам о знаменитом «коллоквиуме», работавшем под руководством его учителя в Страсбурге, Августа Кундта. При этом он постоянно сокрушался, что нам такое предприятие ещё не под силу. Но в 1902 г. он, по настоянию своих старейших учеников, сделал попытку к организации такого научного коллоквиума (ныне такие собрания называют чаще семинарами) при Московской физической лаборатории (Физический институт ещё не был к тому времени достроен). Коллоквиум сразу удался и увлёк как его председателя, так и других участников. Как первый опыт подобного рода в Московском университете, он заинтересовал представителей и других специальностей, и в числе посетителей его в разное время можно назвать К. А. Тимирязева, Б. К. Млодзеевского (математика), Н. Н. Лузина и др. И вот в первые же дни существования коллоквиума на его собраниях, с разрешения председателя, стал появляться не принадлежавший к сотрудникам П. Н. молодой человек, не принимавший участия в прениях, вообще всегда весьма оживлённых, но жадно прислушивавшийся ко всем выступлениям. При попытках вовлечь его в частные разговоры на научные темы он охотно шёл им навстречу и поражал своей феноменальной памятью, огромной уже тогда эрудицией, скромностью, доходившей до застенчивости, и горячей верой в каждое напечатанное слово. Это был молодой врач, а впоследствии крупный учёный — физик П. П. Лазарев.

В то время П. П. интересовался преимущественно физиологией органов чувств. Он только что сделал свои первые две работы: о независимости звукового впечатления от разности фаз между гармоническими компонентами звука и о взаимодействии органов слуха и зрения. Значительно позже, должно быть в 1913 г. или 1914 г., он показывал на своём коллоквиуме такой опыт: в тёмной комнате звучит электромагнитный камертон, дающий звук постоянной интенсивности. В это время зажигается лампочка. В момент её вспышки все в аудитории явно слышат усиление (конечно, кажущееся) звука.

¹⁾ Доклад на апрельской сессии Академии Наук 1942 г.

В дни молодости П. П. преклонялся перед Гельмгольцем, воздавая ему едва ли не божеские почести. Из русских учёных он благоговел перед К. А. Тимирязевым и чрезвычайно высоко ставил его классические работы по действию света на хлорофилл.

П. П. был одним из старейших русских физиков. По возрасту он занимал среди оставшихся в живых, кажется, двенадцатое место. Но смерть не соблюдает строгой очереди. Он родился в 1878 г. и в 1901 г. окончил курс медицинского факультета Московского университета. Повидимому, именно его интересы к физиологии и физике органов чувств привели его в клинику ушных болезней университета. Последняя была организована на деньги, пожертвованные известной благотворительницей того времени Базановой. Клиника была оборудована по своему времени с большой роскошью и обладала богатым собранием физических, преимущественно акустических, приборов. П. П. начал свою научную карьеру с должности заведующего этим кабинетом.

Затем наше знакомство с П. П. прерывается года на два: он уезжает в Страсбург, я — на японскую войну. Когда я возвратился и вновь получил место для работы в лаборатории П. Н. Лебедева — уже в новом Физическом институте Университета в знаменитом лебедевском подвале — мне пришлось работать с П. П. в одной комнате в подвальном этаже башни института. Он уже кончал свою работу по фотохимическому выцветанию красителей. Здесь ему, как известно, удалось весьма точными физическими измерениями, очень характерными для лебедевской школы, доказать точную приложимость закона Вант-Гоффа к реакции обесцвечивания красок. Но, хотя исполнение работы имеет лебедевский стиль, самая тема совершенно чужда нашему общему учителю. Она явно принадлежит самому П. П., который принёс её сюда из сферы своих физиологических интересов, отчасти, может быть, из знакомства с вышеупомянутыми работами К. А. Тимирязева об усвоении световой энергии хлорофиллом растений.

В 1907 г. происходил, как известно, первый менделеевский съезд (в Петербурге, в конце года). На этом съезде П. П. показывал демонстрационное расположение, дающее возможность в условиях лекционного эксперимента показать выцветание цианина одновременно в лучах различных спектральных участков.

Сам он в это время работал над новой темой — о температурном скачке на границе твёрдого тела в газе крайнего разрежения. В противоположность первой его физической работе, эта работа под-сказана, несомненно, П. Н. Лебедевым. Её происхождение таково. П. Н. опубликовал работу, в которой показал, что можно усилить чувствительность термоэлемента, помещая его в наилучшую достижимую пустоту; между прочим, с тех пор такие термоэлементы фабричного изготовления вошли во всеобщее употребление, но никому не приходит в голову назвать их именем их прямого автора: выпускаемые в продажу приборы приносят пользу — да и славу — не тому, кто их изобрёл, а тому, кто их первый запатентовал... Идея

таких термоэлементов связана с некоторыми тонкими физическими соображениями, которые не могли не занимать ученика кундтовской школы П. Н. Лебедева. Ведь сам Кундт, а не кто другой, доказал впервые, что при доступных в его время диапазонах низких давлений газов внутреннее трение и теплопроводность их не зависят от давления. При экстраполяции к ультравысоким разрежениям это свойство ведёт к абсурдным следствиям: полная пустота должна вести себя так же, как любой газ при атмосферном давлении. Ясно, что при крайних разрежениях должны проявляться какие-то новые обстоятельства, и теория указывает их для внутреннего трения — в скольжении газа у твёрдой границы, а для теплопроводности — в скачке температуры у этой же границы. Оба эти факта подверглись проверке в лаборатории П. Н. Лебедева: скачку температуры посвящено исследование П. П. Лазарева (впоследствии это его магистерская диссертация), а особенностям внутреннего трения — прекрасная работа А. К. Тимирязева. Обе эти темы вытекали из необходимости теоретически обосновать усиление чувствительности термоэлементов при эвакуации их баллонов. Справедливость требует указать также, что самый интерес к вопросам высоких разрежений у П. Н. возник, несомненно, в связи с его капитальной работой о световом давлении, где успех был определён в значительной мере тем, что посредством остроумного приёма П. Н. удалось повести разрежение несколько дальше, чем его предшественникам в этого рода исследованиях.

Самое исследование П. П. Лазарева по-лебедевски просто и прозрачно по своей методике: в регулируемом вакууме два металлических зеркала поставлены на близком расстоянии друг от друга и параллельно друг другу, верхнее — при более высокой, нижнее — при более низкой температуре. Между ними перемещается термоэлемент, измеряющий температуру газа в той точке, где он находится, а также при непосредственном прикосновении к зеркалу — температуру последнего. Факт скачка температуры устанавливается непосредственным опытом и оказывается близким к теоретически ожидаемой величине.

Работа эта, как сказано, была защищена П. П., как диссертация на степень магистра. К сожалению, она, не в пример другим работам П. П., не имела прямого продолжения в работах его учеников; повидимому, подсказанная П. Н., она осталась чуждой собственным интересам П. П. Но, когда он впоследствии стал основателем и научным руководителем завода рентгеновской аппаратуры, близкое знакомство с вопросами вакуумной физики и методики не могло не оказаться весьма для него полезным.

Однако это случилось значительно позже. А в то время интерес П. П. к молекулярной физике увлёк его вглубь статистических методов. Помню, что он носился тогда с мечтой о введении в уравнения статистики времени, как независимой переменной. Если бы это удалось осуществить, то термодинамика перестала бы быть наукой о равно-

весных системах и открылась бы возможность предсказывать течение всех тепловых процессов во времени. Иногда П. П. казалось, что он близок к решению этой фундаментальной задачи. Но мне неизвестно, чтобы в дальнейшем он что-нибудь писал по этому вопросу.

К этому времени, параллельно интеллектуальному росту П. П., определилось и постепенное возвышение его положения в лаборатории П. Н. Лебедева: из начинающего он стал зрелым учёным, из допущенного к работе постороннего посетителя лаборатории он стал старшим ассистентом П. Н., его правой рукой и помощником во всех его начинаниях. В частности, П. Н. стал доверять его совершенно самостоятельному руководству известную часть сотрудников лаборатории вплоть до определения тематики их работы. В это время стали появляться в лаборатории П. Н. работы по статистике, по скорости распространения взрывных химических процессов и т. п. Это — тематика П. П. Лазарева, получившая своё полное развитие позже.

Сам он к этому времени вернулся к своей фотохимической работе, занялся кинетикой фотохимических реакций. Но спокойному течению этой работы суждено было испытать ряд трагических перерывов.

Немногие помнят теперь историю разгрома Московского университета министром народного просвещения, бывшим профессором Московского университета, Кассо. Позволю себе восстановить эту грустную страницу нашей культурной истории в памяти читателей. В самом начале 1911 г. Министерство народного просвещения разослало по высшим учебным заведениям своего ведомства циркуляр, предлагавший президиумам этих заведений принимать самые энергичные меры против назревавших тогда студенческих волнений, или, как тогда их называли, «беспорядков». В частности, президиумам предписывалось при первых же сходках студентов вызывать на помощь полицию. Президиум Московского университета (ректор — А. А. Мануилов, проректор — П. А. Минаков и помощник ректора — М. А. Мензбир — ныне все уже покойные) справедливо сочли этот циркуляр нарушением университетской автономии, которая вверяла все заботы о поддержании порядка в университете работникам самого университета, и в таком духе составили доклад Совету университета. Совет с основаниями доклада согласился и уполномочил ректора на соответственные действия. При последовавшей сходке ректор отказался от услуг полиции. Тогда министр распорядился отстранить всех трёх членов президиума от их должностей. Распоряжение это вызвало в университете бурю протестов. Многие члены Совета, голосовавшие за предоставление президиуму полномочия не подчиняться незаконному распоряжению министерства, сочли себя наравне с президиумом ответственными за все последствия и подали в отставку. Движение получило широкое распространение: в отставку подали свыше 40 профессоров университета. К ним не замедлили присоединиться многочисленные «младшие преподаватели» университета — приват-доценты, ассистенты и пр., хотя они на Совете университета

не присутствовали, голосом в нём не пользовались (предмет постоянных ссор между «профессорской» и «младшей» группами старого академического союза), а потому никакой моральной ответственности за его действия нести не должны были. Для многих деятелей университета наступили часы мучительных колебаний. Едва ли не тяжелей всех эти колебания были для П. Н. Лебедева. Он к этому времени был тяжело болен (грудной жабой); от его бывшего довольно крупного состояния оставалась лишь малая часть, но под вопрос ставилось не только материальное благосостояние, а в особенности возможность продолжения научной работы. Он никогда не имел никаких совместительств, не был связан ни с одним научным учреждением вне университета, и ему, уйдя он из университета, пришлось бы начать заново строительство дела, которому он отдал в Московском университете без малого двадцать лет своей трудовой жизни. Но он ушёл, принеся в жертву гражданскому долгу больше, чем кто бы то ни было из его товарищей и подчинённых. Ушёл, конечно, и П. П. Лазарев, и тут впервые ученикам П. Н., вообще бывшего всегда далёким от вопросов политики и общественной деятельности, пришлось погрузиться с головой в дело устройства лаборатории П. Н. на новых началах общественной поддержки. В то время это значило искать сочувствия в слоях богатой буржуазии, недовольной порядками царской России. Не всё здесь шло гладко. Я помню одно посещение богатого просвещённого представителя московской купеческой знати, человека, который в то время сам пробовал заниматься научными исследованиями. Мы были у него вдвоём с П. П. Хозяин принял нас любезно, выразил полное сочувствие к цели нашего посещения и обещал подумать о том, что можно было бы предпринять сейчас же. На следующий день он сам позвонил П. Н. и объявил ему, что П. Н. Лебедеву и его ученикам предоставляется полная свобода в распоряжении приборами из физической коллекции Московской Практической академии коммерческих наук. Так называлось одно среднее коммерческое училище, в коем обучались сыновья богатого купечества... В его «кабинете» и предлагалось вести научную работу главе всемирно известной физической школы со всеми его сотрудниками.

Первые неудачи не сломили духа у П. П. и других учеников П. Н. Но сколько нервов и трудов стоило им всем добиться понимания размеров возникшей задачи — это могут себе ясно представить только непосредственные участники этих трудов и их ближайшие товарищи. Первые шаги на пути к новому устройству были поддержаны Народным университетом им. Шанявского, который снял для лаборатории П. Н. подвал в доме № 20 по Мёртвому переулку на Пречистенке. В том же доме повыше поселились в двух близко расположенных квартирах П. Н. Лебедев и П. П. Лазарев. Здесь их близость приняла характер тесной дружбы. И как ни удивительно, во многих вопросах доминировал здесь не недостижимо высокий для всех нас П. Н., а наш товарищ П. П. Отчасти это объяснялось тем, что он внушал П. Н. неограниченное доверие как врач, а П. Н., как уто-

пающий, хватался уже и за соломинку... Но в большей мере это имело в своей основе тот факт, что для устройства всех внешних сторон жизни на новый лад из всех окружающих П. Н. лиц больше всех сделал, конечно, П. П.

П. Н. прожил после всех этих событий недолго. В апреле 1912 г. мы похоронили его, почтили торжественным заседанием, издали его труды и обратились к повседневной работе. Коллоквиум Лебедева перешел под руководством П. П. в Университет Шанявского. Работы учеников П. Н. тоже кое-как устроились. Сам П. П. продолжал свою фотохимическую работу в лаборатории Московского высшего технического училища. Судьба устроила для этой работы ещё один перерыв. В один ужасный вечер препаратор Технического училища позвонил Ольге Александровне Лазаревой и сообщил ей самым категорическим тоном, что у П. П. взорвался прибор и что при этом один глаз ему выбило, а на второй он ничего не видит... К счастью, дело оказалось не в такой мере ужасным: при взрыве пострадал только один глаз, причём дело ограничилось кровоизлиянием... Я помню наше испуганное паломничество к П. П. в частную хирургическую лечебницу П. А. Постникова. Он оправился довольно быстро, но у него остался какой-то дефект в цветном зрении на повреждённый глаз. Сам П. П. не унывал, а впоследствии сумел из своего «увечья» сделать метод для исследования некоторых вопросов цветного зрения...

Дело общественной помощи науке, изгнанной из Московского университета, между тем, шло своим ходом и дало богатые результаты. В частности, для физиков был построен прекрасный институт, впоследствии описанный П. П. Его все знают — это нынешнее здание Физического института Академии Наук. Но открытие его не обошлось, уже накануне революции, без некоторого «скандала». Я не буду здесь входить в описание этого печального события. Приходится, однако, с сочувствием вспомнить по его поводу бессмертное суждение штабс-капитанши Пушкина: «Разбери, кто прав и кто виноват, да обоих и накажи». Последующее развитие событий оправдало П. П. от многих вин, действительных и воображаемых: из полученного им института он сумел в короткое время и при самых грозных внешних условиях создать солидное научное учреждение с широкой и своеобразной тематикой. Не всем его противникам выпал на долю такой же успех.

Но вот грянул гром революции. Многие научные работники при его первых раскатах совершенно и безнадежно растерялись: как те, которые стояли за новый порядок, так и те, которые были «по ту сторону баррикады». Приходилось искать для своего привычного дела новых оснований и новых применений, говорить с новыми людьми и на новом языке. Несомненно, одним из самых первых, нашедших себя в новой обстановке, был П. П. Я помню наши беседы после долгой разлуки (я в то время работал в Харькове), которые меня совершенно поразили: я изнывал от того, что не мог себе достать нужный мне один спектрофотометр, а у П. П. я их увидел целых пять или шесть — и получены они были уже после революции. Мы все были

воспитаны на теориях «чистой науки», а здесь я увидел в широком масштабе прикладные темы и практические задачи: дело шло о задачах маскировки и демаскировки. Подход к решению их был вполне научен и даже казался чрезмерно научным при тогдашних более чем скромных возможностях молодой пролетарской республики. Но тон П. П. был уверен и бодр, а достижения и возможности — налицо. Приходилось не только согласиться с его подходом к делу, но и учиться у него тому, как приниматься за дело по-новому, располагая достаточно старым багажом.

К сожалению, кроме упомянутых работ по маскировке, П. П. не обратился после этого ни разу к темам чисто физического характера. Но он достиг крупных успехов на других поприщах и прежде всего в области геофизики. Здесь на первом месте следует поставить его работы по исследованию Курской магнитной аномалии.

История этого вопроса такова. О существовании Курской магнитной аномалии в науке было известно уже давно, но подробным исследованием её мы обязаны приват-доценту, а впоследствии профессору Московского университета Э. Е. Лейсту. На свои более чем скромные приват-доцентские достатки он ежегодно ездил в область аномалии, нанимал телегу — тоже на те же «достатки» — и производил сотни кропотливых и точнейших измерений магнитных элементов. Впоследствии критики ставили Лейсту в вину, что он при преувеличенной точности магнитных измерений довольствовался гораздо более грубыми данными о координатах точек наблюдения. Всё же его измерения — первая солидная основа наших знаний о Курской аномалии.

До революции подробное исследование аномалии не принесло других осязаемых результатов, кроме ажиотажа на земельном рынке; местные помещики разжигались и прогорали на спекуляциях своими земельными участками, и сам Лейст утверждал, что аномалия такой громадной протяжённости и абсолютной величины может вызываться исключительно наличием громадных залежей железа. Геологи согласно утверждали — это необходимо твёрдо помнить, — что о железе в этих местах не может быть и речи. Против геологов ни Лейст, ни заинтересованные в его торжестве помещики не могли возразить ничего, кроме лепета о том, что в одном месте они видели ржавую воду в источнике и т. п. После революции Лейст ездил за границу и там умер. Повидимому, он пытался заинтересовать в курской руде германские промышленные круги. Во всяком случае, составленная им карта аномалии попала в руки немцев, а они пытались продать её Л. Б. Красину за какие-то миллионы золотых марок. Л. Б. Красин, при случае, спросил мнения на этот счёт П. П. Лазарева. Последний энергично восстал против германских домогательств и предложил заново снять карту с затратой меньших средств.

С этого начались труды грандиозной комиссии по исследованию Курской аномалии. П. П. впервые поставил эту задачу непосредственно на службу практической геологии, вернее, геологической разведке. Задача такова: обследовать область аномалии — и не только

магнитными, но и различными гравиметрическими методами — и по результатам определить, где и в каком количестве залегают обуславливающие её магнитные, т. е. железные массы. Задача эта весьма сложна, а при беглом взгляде представляется даже безнадежной: как известно из теории потенциала, одно и то же силовое поле вдали от источников может производиться бесконечным разнообразием источников. Истинную плотность зарядов, как показывают уравнения Лапласа и Пуассона, можно однозначно определить только измерением поля в непосредственной близости к источникам. Некоторый выход из этого положения даётся уже соображениями не математического, а геологического характера. Дело в том, что не всякое распределение масс, всё равно магнитных или материальных, мыслимое математически, оказывается вероятным с геологической точки зрения. Вот почему геологам должно было принадлежать в некоторых случаях решающее слово в комиссии Курской магнитной аномалии, и в обиход её рассуждений вошли пласты горизонтальные и наклонные, изломы пластов, похоронённые хребты и т. п.

Таковы были теоретические предпосылки работы комиссии, которые далеко не представлялись такими ясными вначале. Затем надлежало выработать и практическую методику изысканий. В этом вопросе большое значение получило веское указание академика А. Н. Крылова, который предложил для пользования комиссии прибор, применяемый в морском деле, гораздо менее точный, чем лейстовские инструменты, но зато работающий не в пример быстрее. Если вспомнить хозяйственную и политическую обстановку того времени, то приходится с величайшим уважением отнестись к трудам комиссии, которой удалось получить карту аномалий, расширив её далеко за первоначально предполагавшиеся пределы, истолковать её геологически, проверить расчётные данные результатами непосредственного бурения и в конце концов подарить советской родине точно обследованное месторождение железа в центре страны, в двух шагах от нашего главного угольного бассейна, и притом по общему содержанию железа превосходящее всё, что имеется в Европе. Этот успех навсегда должен быть связан с именем П. П. Лазарева.

Исследованием Курской магнитной аномалии не исчерпываются геофизические работы П. П. Лазарева, но в дальнейшем они уже никогда не подымались до таких размеров и до таких огромных практических достижений. Мы можем, однако, назвать его интересную работу по теории течений в земных океанах и объяснение изменяющимся направлением этих течений смены климатов в различные геологические эпохи. Далее следует ряд сейсмологических работ как самого П. П. Лазарева, так и его учеников. Работы эти тоже в своей совокупности не лишены значения. Короче, и вне связи с Курской магнитной аномалией, можно говорить о П. П., как о геофизике.

П. П. работал и над задачей о стекле и стеклообразном состоянии. И всё же мы не коснулись самой важной стороны деятельности П. П. — его трудов в области биофизики. Вполне естественно, что

он, врач по образованию, уже с самых молодых лет задумывался над физическими и химическими задачами, возникающими в области физиологии и биологии вообще. Об его ранних работах по физиологии органов чувств мы говорили в начале нашего доклада. Но главный цикл его работ в этой области возник позже, в связи с выдвинутой Нернстом теорией нервного возбуждения. Редкая способность П. П. заражать своим энтузиазмом окружающих повела к тому, что мы, его приятели, совсем не врачи и не биологи по образованию, обзавелись книжкой Лёба «Динамика живого вещества» и дискутировали вопросы о путях распространения возбуждения в центральной нервной системе и другие подобные проблемы.

П. П. много интересовался вопросами психологии творчества¹ и очень любил книжку В. Оствальда «Grosse Männer». На него большое впечатление производило оствальдовское разделение творцов науки на «классиков» и «романтиков». Первые спокойно работают в тиши и одиночестве над своими темами, не нуждаясь в помощи сотрудников, своим собственным трудом завершая свои мысли, часто даря человечеству неоценимые сокровища мысли и опыта. Вторые работают нервно, с надрывом, не поспевая облечь в плоть собственной работы свои идеи, рождающиеся у них в мучительном изобилии и властно требующие от них привлечения к немедленному разрешению возникающих задач всё новых и новых учеников и сотрудников. Наш общий учитель П. Н. Лебедев, несомненно, был таким типичным романтиком, и за ним по этому пути пошёл и П. П. Лазарев. Этот путь он избрал сознательно, и я уверен, с некоторым насилием над своей природой и своими ранними привычками. Мы помним его молодым, когда он поражал своими инстинктивно здоровыми вкусами, соблюдал крайне простой режим, не признавал в пище ничего острого, не прикасался даже к лёгкому красному вину, знал только одно излишество — в неустанной работе. Как-то трудно соединить с этими подробностями образ «романтика». Но идей у него рождалось множество, и учеников для разработки их он привлёк за свою жизнь много десятков, далеко превзойдя в этом отношении своего учителя...

Оглядываясь на эту жизнь, прожитую в великую, но трудную эпоху, полную труда, в постоянно менявшихся условиях, поражаешься богатством и разнообразием одушевлявших её интересов. У кого другого из его, из наших современников мы найдём такие обширные серии работ и по чистой физике, и по физической химии, и по геофизике, и по биофизике, — работ, оставивших по себе память и сохранивших своё действительное начало.

Сегодня мы помним добрым словом ушедшего в вечность товарища по научной работе. Вместе с нами помнят его многочисленные товарищи и друзья, ещё более многочисленные ученики и все, кому по разнообразнейшим вопросам придётся рыться в громадном наследии, оставшемся после почившего.

НОВЫЕ ДАННЫЕ О ПРИРОДЕ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ

А. И. Алиханов и А. И. Алиханян¹⁾

Основная тенденция в развитии физики последних десятилетий заключалась во всё большем отходе от изучения макроскопических тел и явлений, связанных с ними, и углублении в мир микроскопический. От явлений, происходящих с твёрдыми, жидкими и газообразными телами в целом, физика перешла через кинетическую теорию вещества к строению атомов и молекул, и теперь в центре её внимания — явления, происходящие в объёме 10^{-39} см³ — в ядре атома.

Переход в микромир сопровождался коренным изменением таких физических понятий, как причинность, частица, волна, и привёл к созданию новой механики — микромеханики, известной под названием квантовой механики. Вместе с тем, с переходом в микромир физика вступила в область огромных скоростей, приближающихся к скорости распространения света, т. е. той области скоростей, где безраздельно господствуют принципы механики Эйнштейна. Однако, энергии частиц в ядре не являются предельными, то же так же, как ядра не являются пределом микромира. Мы хорошо знаем, что ядра атомов являются, несмотря на ничтожные размеры, сложными системами, состоящими из протонов и нейтронов. Сейчас в физике наступил момент, когда не только естественным развитием выдвинулись на передний план вопросы свойства и «структуры» элементарных частиц — протонов, нейтронов, мезонов и т. д., но и дальнейший прогресс в понимании строения ядра и процессов, происходящих в нём, упирается в незнание свойств и «структуры» этих элементарных частиц.

Основной и самый очевидный метод изучения свойств частиц заключается в том, чтобы сталкивать их друг с другом и наблюдать результат столкновения (разлёт частиц после удара, порцию энергии, передаваемую одной частицей другой, форму этой энергии, расщепление частиц, если они сложны и т. д.). При этом, чем более пройна бомбардируемая система, т. е. чем сильнее в ней связаны частицы, тем с большей энергией должны мы вталкивать в неё разрушающую частицу.

Отсюда происходит стремление создавать приборы и установки, позволяющие сообщать заряженным частицам большие энергии, как, например, циклотрон Лауренса, ускоритель электронов Керста и др.

¹⁾ Доклад на сентябрьской сессии Академии Наук СССР, 1943.

Однако, несмотря на то, что достигнута возможность получать частицы с энергиями в несколько десятков миллионов и даже до сотни миллионов вольт, всё же никакие искусственные источники не могут сравниться с естественным источником частиц большой энергии — со вселенной, дающей нам космические лучи, где частицы имеют в среднем энергии порядка нескольких миллиардов вольт. Более того, нам известны явления в космических лучах, так называемые «ливни Оже», которые могут быть вызваны только частицами, обладающими энергией в 10^{14} — 10^{18} В.

Мы сейчас знаем очень мало о происхождении космических лучей и не можем даже себе представить, в результате каких процессов они получают эти фантастические энергии. Но когда мы выясним это, а такой момент несомненно наступит, то одновременно мы, по-видимому, узнаем много нового и о вселенной. Так, углубляясь в мир микроскопический, мы своеобразным путём придём к объединению изучения обоих миров — микроскопического и макроскопического.

Уже сказанным объясняется необычайный рост интереса к космическим лучам, наблюдающийся в настоящее время. Нельзя назвать другую область физики, число приверженцев которой увеличивалось бы так сильно день ото дня, несмотря на специфические трудности работы в этой области. Она привлекает и начинающих учёных и учёных, прославленных своими работами в других областях физики. И это вполне понятно, так как благодаря космическим лучам мы имеем возможность проникнуть в глубочайшие тайны природы — строение, свойства и структуру элементарных частиц, составляющих вселенную, — которые при отсутствии космических лучей были бы скрыты от нас на долгие времена.

К сожалению, интенсивность потока космических лучей ничтожна, и поэтому не так легко с ними производить количественные исследования. Наблюдение их основано на том обстоятельстве, что быстрая заряженная частица, проходя через вещество, отрывает электроны от атомов, т. е. создаёт ионы, вследствие чего после её прохождения остаётся электрический след. Этот след можно сделать видимым, если он образовался в газе и если сконденсировать на каждом ионе капли воды из паров, содержащихся в газе. В камере Вильсона, действующей именно на этом принципе, впервые воочию увидел пути космических частиц Д. В. Скобельцын.

Более простым и портативным прибором (а это свойство очень существенно для исследования космических лучей) является счётчик Гейгера, в котором первоначально созданные частицей в газе ионы при движении в электрическом поле образуют большое количество новых ионов, так что в конце концов в газовом промежутке между электродами происходит процесс, подобный пробоем газа. Попадание каждой частицы в счётчик, сколько бы она ни создала первоначальных ионов (только, конечно, не меньше одной пары), вызовет такой пробой, что и даст возможность установить число прошедших через счётчик частиц. На уровне моря через 1 см^2 проходит одна частица в минуту.

Так же проста ионизационная камера. В ней под действием электрического поля ионы из следа частицы расходятся к двум электродам без всякого увеличения в числе. В этом случае измеряется суммарное число ионов, создаваемых в газе потоком космических частиц за некоторый промежуток времени.

Какие же свойства космических лучей прежде всего были исследованы при помощи этих методов?

Всякий раз, когда в физике обнаруживалось новое излучение, исследование его свойств начиналось с измерения проникающей способности, т. е. поглощения этого излучения в веществе. Точно так же это было и с космическими лучами. Уже тот факт, что интенсивность космических лучей возрастает с высотой, т. е. с уменьшением толщины слоя атмосферы, которую им приходится преодолевать, показывает, что часть лучей поглощается по пути и не доходит до уровня моря. Наличие излучения на уровне моря и ниже (под толстыми слоями земли — в метро, шахтах) показывает, что часть излучения имеет огромную проникающую способность.

Согласно первым работам в этой области получилось, что приблизительно поглощение определяется только количеством вещества, которое пройдено частицей, независимо от сорта поглощающего вещества. Однако, тщательное сравнение поглощения космических лучей в различных тяжёлых и лёгких веществах, т. е. веществах с малым (воздух, вода) и большим (свинец) атомным номером, позволило получить новые данные.

Крупнейший французский исследователь космических лучей Пьер Оже обратил внимание на то, что по поглощению в космических лучах можно заметить две довольно резко различающиеся составные части. Одна часть поглощается очень слабо и независимо от сорта вещества, но в соответствии с тем количеством его, которое встречается на пути лучей, т. е., короче говоря, в соответствии только с плотностью поглощающего вещества. Так, 1 см свинца по поглощению будет приблизительно для этого излучения эквивалентен 11 см воды. Другая же часть поглощается значительно сильнее, и поглощение при одинаковой плотности зависит ещё и от атомного номера поглотителя: оно тем больше, чем больше атомный номер поглотителя. Соответственно различие в свойствах двух компонент становится всё более резким с увеличением атомного номера поглотителя.

Для второй компоненты 4 мм свинца по поглощению эквивалентны 30 см воды.

Оже назвал первую компоненту жёсткой, а вторую — мягкой. Это, казалось бы чисто описательное, различие вскоре приобрело глубоко-физическое содержание и привело к одному из крупнейших открытий в современной физике — открытию новой частицы, названной мезоном. К этому открытию удалось прийти благодаря тому, что опыты по поглощению были дополнены целым рядом непосредственных наблюдений над свойствами отдельных частиц, входящих в состав жёсткой и мягкой компонент.

Так оказалось, что мягкая компонента состоит из электронов и квантов больших энергий (в среднем около 100 млн. вольт) и что при прохождении их через вещество происходит превращение электронов в кванты, и обратно — квантов в электроны. Следствием таких взаимных превращений является возникновение так называемых ливней космических лучей, т. е. пучков электронов, исходящих как бы из одной точки.

Это свойство — создавать ливни из частиц — является характерной особенностью электронов и квантов больших энергий и представляет собой понятное следствие из всех хорошо известных нам экспериментальных и теоретических данных о свойствах этих частиц. Оно служит причиной того, что мягкая компонента поглощается сильнее, чем жёсткая, и притом тяжёлыми веществами больше, чем легкими.

Что же касается жёсткой компоненты, то она оказалась состоящей из частиц, ранее неизвестных — мезонов, — обладающих таким же зарядом, как электрон, но массой в 130—180 раз большей, чем масса электрона, или, если сравнивать с массой самого лёгкого ядра, в 10—12 раз меньшей, чем масса протона — ядра водорода.

Как и электроны, мезоны обладают способностью на своём пути ионизовать атомы, теряя при этом акте немного энергии, так что длина пути мезона в веществе зависит от запаса у него кинетической энергии. Чем больше энергия у мезона, тем больший путь он может пройти в веществе, и, таким образом, ослабление пучка мезонов в веществе обусловлено просто тем, что одни мезоны имеют большую энергию и, таким образом, обладают большей возможностью терять энергию на образование ионов при столкновении с атомами, а другие — меньшую.

Как будет видно дальше, ещё одно уточнение измерений поглощающей способности жёсткой компоненты привело к новому замечательному открытию. Сравнение поглощения жёсткой компоненты в плотном веществе, например в воде, с поглощением в воздухе, имеющем плотность, в 700 раз меньшую, показывает, что при эквивалентных по количеству вещества слоях (1 км воздуха эквивалентен, приблизительно, 1 м воды) воздух поглощает сильнее, чем вода. Поскольку атомные номера элементов в воздухе и в воде очень близки, практически одинаковы, это может быть обусловлено только резким различием плотности. К тому же различие по величине остаётся таким же, если мы сравним поглощение в воздухе с поглощением в эквивалентном по количеству вещества свинце.

Отсюда с неопровержимой очевидностью следует, что если бы мы смогли на пути мезонов создать вакуум на участке длиной 1 км, то интенсивность проходящей через него жёсткой компоненты заметно бы ослабла. Таким образом, мезоны самопроизвольно, без внешнего воздействия исчезают — «умирают» — в пути. Средняя продолжительность «жизни» медленных мезонов, как показывают опыты, равна 0,000002 сек.

Разумеется, энергия, как кинетическая, так и энергия покоя мезона, не может исчезнуть, и, следовательно, «смерть» мезона сопровождается «рождением» других частиц. Вместе с тем из свойства мезонов распадаться следует, что они не могли притти на Землю извне, из далеких космических пространств, на что даже при скорости, близкой к скорости света (максимально возможной), нехватило бы их короткой «жизни». Это означает, что мезоны где-то в атмосфере зарождаются первичными космическими лучами.

К этому именно моменту в развитии наших знаний о космических лучах относится начало наших работ на высоте 3250 м на горе Алагез в Армении.

Открытие распада мезона поставило два вопроса: 1) во что превращается мезон при распаде, и 2) если он превращается в электрон и нейтрино, как это можно было думать из ряда общезначимых представлений, то существуют ли в действительности определённые соотношения между интенсивностью мягкой и жёсткой компонент (т. е. между числом электронов и мезонов), которые должны иметь место в том случае, если одна компонента генерирует другую. Надо сказать, что до последнего момента по этому вопросу существовало много противоречивых наблюдений из-за ошибочных или недостаточно чистых, как это сейчас выяснилось, экспериментов и недостаточно внимательного анализа особенностей применяемых методов измерений.

В результате первой экспедиции в 1942 г. мы показали, что на высоте Алагеза отношение мягкой компоненты к жёсткой — то, что мы называем отношением числа электронов к числу мезонов, — зависит от прибора, которым эта величина измеряется.

Если пользоваться ионизационной камерой, то отношение равняется 1,0, если же измерять его при помощи счётчика Гейгера, то оно равно 0,65. Между тем, если все электроны генерируются мезонами, т. е. мягкая компонента является производной от жёсткой, отношение должно быть равно 0,45.

В более низкой точке, в г. Ереване (высота около 900 м), различия сглаживаются.

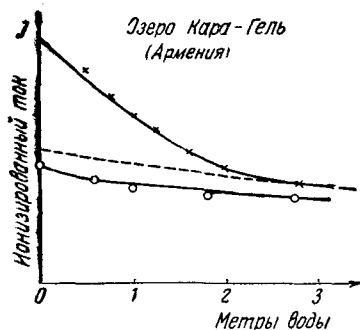
Каков физический смысл этого различия показаний двух приборов — счётчика Гейгера и ионизационной камеры?

Выше говорилось, что счётчик регистрирует число частиц независимо от того, какое количество ионов в газе счётчика создала частица — одну пару или сколь угодно больше. Ионизационная камера, напротив, регистрирует количество ионов, создаваемых потоком частиц в объёме камеры.

Таким образом, различия в величине отношения мягкой компоненты к жёсткой обусловлены тем, что первая на Алагезе состоит не только из электронов и квантов, но в ней имеются ещё частицы, ионизующие газ сильнее, чем быстрые электроны и мезоны.

В связи с этим перед нами возникли две задачи: 1) выяснить происхождение этих частиц и 2) выяснить их природу. Выяснить про-

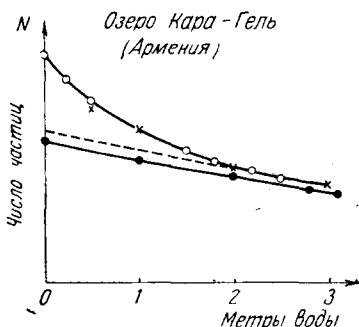
исхождение частиц — означает установить, являются ли они производными, вторичными от электронно-квантовой или мезонной компоненты (т. е. создаются ли они в веществе благодаря взаимодействию одной из этих двух компонент) или возникают независимо от них. В качестве примера такой генетической связи можно сослаться на факт, о котором уже говорилось выше — электроны распада генерируются мезонами. Вторым примером могут служить электроны столкновения, т. е. электроны, выбрасываемые из атома мезонами



Высота 3225 м над уровнем моря

- o Иониз. ток в камере закрытой свинцовым панцирем 6,7 см толщины
- x Иониз. ток в камере без свинца

Рис. 1.



Высота 3225 м над уровнем моря

- Жесткая
- o Общая - метод совпадений
- x Общая - одним счётчиком

Рис. 2.

при столкновении с ними. И эти электроны генетически связаны с мезонами — жёсткой компонентой.

Для решения вопроса о происхождении сильно ионизирующих частиц мы обратились к испытанному уже ранее методу анализа космических лучей — к методу поглощения. В качестве поглощающей среды мы избрали воду, погружая приборы в оз. Кара-Гёл на высоте 3225 м над уровнем моря.

Вода по своему среднему атомному номеру по существу не отличается от воздуха, и поэтому все процессы взаимодействия космических лучей с веществом будут одинаковыми и в воде и в воздухе. Только из-за того, что плотность воды значительно превышает плотность воздуха мезоны на эквивалентном по количеству вещества пути не успеют распасться, следовательно, не будут рождать электронов распада.

На рис. 1 и 2 приведены результаты измерений, полученные нами во второй экспедиции (в 1943 г.¹⁾), при погружении ионизационной камеры и счётчика в воду без свинцового фильтра (т. е. когда

¹⁾ В этих измерениях принимали участие также К. М. Качарян (Ереванский университет), И. Ф. Кварцхиви и Г. М. Мириошвили (Грузинская Академия Наук).

измеряется сумма мягкой и жёсткой компонент) и со свинцовым фильтром (когда измеряется только жёсткая компонента, а мягкая поглощена в свинце).

Из этих кривых прежде всего видно, что характер поглощения жёсткой компоненты в воде при измерении счётчиком и камерой не изменяется и соответствует очень слабому поглощению ($10^0/0$ на 1 м воды).

Гораздо сложнее поведение мягкой компоненты. Прежде всего обращает на себя внимание отношение мягкой компоненты к жёсткой, которое на глубине около 2 м равно всего 10. Между тем на 2200 м ниже (в г. Ереване), что приблизительно эквивалентно по количеству вещества погружению на глубину 2,2 м в оз. Кара-Гёл, оказывается, что отношение мягкой компоненты к жёсткой равно 0,35.

Разница в условиях измерений состоит только в том, что плотность воды значительно больше плотности воздуха.

Отсюда следует, что 25 из $35^0/0$ мягкой компоненты в г. Ереване — это электроны от распавшихся мезонов, образовавшиеся в воздухе на пути от Алагеза до г. Еревана. В соответствующем месте озера на глубине 2,2 м распада этих электронов нет, так как на коротком пути в 2,2 м мезоны не успели распасться, а те электроны, которые получились от распада мезонов выше озера, благодаря их малой проникающей способности (меньшей, чем у мезонов) поглотились в слое воды около 2 м.

Так, нам удалось из анализа поглощения установить существование электронов распада и их число для уровня г. Еревана.

Зная количество этих электронов в г. Ереване, мы можем определить, сколько их должно быть на Алагезе. Как уже говорилось, отношение мягкой компоненты к жёсткой, если принимать во внимание только ту часть, которая рождается мезонами, должно на Алагезе составлять 0,45. Продолжая далее анализ, мы выделили отдельно кривую поглощения мягкой компоненты как «счётчиковую» (полученную при помощи счётчика), так и «камерную».

Сравнение их показывает, что не только по абсолютной величине, как это было установлено во время первой экспедиции, но, больше того, и по проникающей способности они резко отличаются друг от друга. На рис. 3 приведено сравнение кривых поглощения. На этом же рисунке приведены данные ещё одного опыта, который был проделан на том же озере.

Как уже говорилось, электроны и кванты больших энергий создают ливни, что отличает их от других частиц. Мы погружали прибор, регистрирующий только ливни, в озеро и таким образом установили, как поглощаются электроны в воде. Эти данные изображены на рис. 3 в виде звздочек. Треугольником показаны данные поглощения в виде мягкой компоненты, полученные при погружении ионизационной камеры в озеро, находящееся на высоте всего 800 м над уровнем моря.

Наконец, крестом показано, какова должна быть интенсивность электронов на глубине 1 м воды, если известна их интенсивность над этим слоем по теоретическим расчётам Л. Д. Ландау и И. Е. Тамма. Сопоставление этих данных приводит нас к очень важным выводам.

1. Компонента, к которой ионизационная камера более чувствительна, чем счётчик — назовем её в отличие от мягкой и жёсткой компонент третьей — поглощается в воде медленнее, чем электронная компонента, регистрируемая счётчиком и прибором для ливней, и, следовательно, генерируется не электронами.

2. Третья компонента состоит не из электронов (она не даёт ливней) и не из мезонов.

3. На малых высотах третья компонента уже почти отсутствует.

4. Третья компонента не создаётся мезонами в результате воздействия их на вещество, так как в этом случае она должна была бы поглощаться в воде так же, как жёсткая компонента. Точно так же эта компонента не создаётся мезонами в результате их распада, так как в этом случае она на малых высотах должна была бы присутствовать в таком же отношении к электронам распада, как и наверху, чего в действительности нет.

5. Третья компонента сильнее поглощается в свинце, чем в воде.

Таким образом, третья компонента представляет собой независимую, отдельную компоненту, или, как принято называть, неравновесную компоненту.

Отличительная её особенность — большая ионизирующая способность или её самой или, скорее всего, создаваемых ею вторичных частиц.

Если считать, что излишние 150_{10} мягкой компоненты над вычисленным отношением 450_{10} для Алагеца, которые наблюдались и в измерениях со счётчиком, обусловлены третьей компонентой, то её ионизирующая способность окажется в 3—4 раза больше, чем у мезона.

Итак, главные результаты двух наших экспедиций сводятся к следующему.

1. Доказано существование и определено количество электронов от распада мезонов.

2. Доказано существование третьей, неравновесной компоненты.

3. Показано, что свойства третьей компоненты отличны от свойств электронов и мезонов.

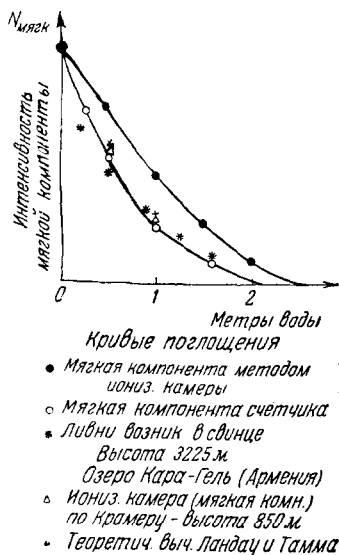


Рис. 3.

Наша задача теперь — ответить на вопрос о природе частиц самой третьей компоненты и создаваемых ею вторичных частиц. Очень возможно, что эти вторичные частицы, создаваемые ею, — протоны. Задача эта не лёгкая, но будем надеяться, что экспедиция 1944 г. приблизит нас к её решению.

В заключение — несколько слов об условиях, в которых происходила работа экспедиции. Разумеется, они были очень трудны, в особенности в 1942 г., летом, в самые тяжёлые времена для Кавказа. Но благодаря огромной помощи, оказанной нам ЦК КП(б) Армении, удалось решить такие трудные задачи, как снабжение экспедиции горючим, питанием, доставка грузов к подножию и переброска почти 15 т груза вычным транспортом от подножья на вершину и обратно.

Большая помощь была оказана нам ректором Ереванского университета проф. Г. Х. Бунатяном и сотрудниками кафедры физики Ереванского университета, а также заместителем председателя Армянского филиала Академии Наук В. О. Гулканяном. Всё это дало нам возможность привести в Ереване в порядок наши приборы, опробовать их перед подъёмом и провести наблюдения на вершине.

Работа происходила частью в помещении метеостанции Алагеза, частью в палатках, причём наличие метеостанции на Алагезе и товарищеское отношение к нам её сотрудников очень облегчили нашу работу.

УСКОРЕНИЕ ЭЛЕКТРОНОВ С ПОМОЩЬЮ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ (БЕТАТРОН КЕРСТА)

А. П. Гринберг

В 1940 г. американский физик Дональд Керст построил в Иллинойском университете (г. Эрбана) индукционный ускоритель электронов. Технический арсенал физики обогатился новым замечательным прибором, новым методом. Керст впервые успешно осуществил на практике давно уже возникшую идею об использовании явления электромагнитной индукции для ускорения электронов, и это открывало путь для создания установок, в которых энергию электронов можно довести до чрезвычайно больших величин.

Возможность получения очень быстрых электронов — и при этом с помощью сравнительно простых средств — представляет весьма большой практический и научный интерес. Наиболее широкое применение быстрые электроны находят в технике генерирования рентгеновских лучей. Как известно, эти лучи возникают при торможении пучка быстрых электронов на антикатоде рентгеновской трубки. Рентгентехника в настоящее время имеет дело с электронами значительных скоростей. Если в медицинских рентгеновских трубках электроны ускоряются разностью потенциалов, обычно не превышающей 100—200 kV, то в современных промышленных рентгеновских трубках, используемых для просвечивания большой толщи металла (рентгеновская дефектоскопия), применяемая разность потенциалов гораздо выше — она составляет 1 MV и более. Рентгеновские лучи, возникающие в таких трубках, обладают такой жёсткостью, т. е. такой большой проникающей способностью, что с их помощью возможно исследование стальных плит толщиной до 200 мм.

Однако, и для техники и — в ещё большей мере — для науки весьма существенна была бы возможность ускорения электронов до ещё гораздо более высокой энергии. Изучение свойств электронов, взаимодействия их с веществом, можно было бы распространить на электроны сверхвысоких энергий. Кроме того, возможность иметь в распоряжении источник таких электронов представляет особый интерес для физики атомного ядра, так как с их помощью, несомненно, можно осуществить множество интересных ядерных реакций и — что еще важнее — можно было бы попытаться воспроизвести в лабораторных условиях такие явления, которые до настоящего

времени удавалось наблюдать только в виде единичных случаев в космических лучах (образование «ливней», рождение мезона). Бетатрон Керста является в настоящее время единственной установкой, дающей возможность генерировать электроны с рекордно высокой энергией, оставляющей далеко позади всё то, чем располагали физики до сих пор.

По своему фундаментальному значению в качестве инструмента для научных исследований бетатрон безусловно может быть поставлен в один ряд с циклотроном, и появление его так же, как в свое время появление циклотрона, открывает новую эпоху в развитии ядерной физики.

Необходимо отметить, что и во многих таких случаях, когда требуется сравнительно небольшая энергия электронов, бетатрон способен успешно конкурировать с применявшимися до сих пор установками и методами для получения быстрых электронов, обладая преимуществами портативности и простоты. Весьма вероятно, что в недалёком будущем установки, использующие метод бетатрона, полностью вытеснят нынешние.

ПРЕЖНИЕ МЕТОДЫ ПОЛУЧЕНИЯ БЫСТРЫХ ЭЛЕКТРОНОВ

Все мыслимые методы ускорения электронов в конечном счёте основаны на одном и том же принципе — на том, что электрон, являясь частицей, обладающей электрическим зарядом, в электрическом поле испытывает действие сил¹⁾, заставляющей его двигаться в определённом направлении и с определённым ускорением. Кинетическая энергия, которую частица с данной величиной заряда приобретает за счёт сил электрического поля, целиком определяется пройденной разностью потенциалов (разумеется, речь идет о движении частицы в идеальном вакууме, где нет затраты энергии на столкновения с другими частицами). Как известно, кинетическую энергию элементарных частиц принято выражать в электрон-вольтах (eV)¹⁾.

В природе существуют естественные источники быстрых электронов — это различные радиоактивные вещества, обладающие β -радиоактивностью. Так, например, максимальная энергия β -частиц радия С (RaC) составляет около 3,2 MeV, максимальная энергия β -частиц RaE равна 1,2 MeV. Именно с помощью этих естественных источников был в своё время впервые изучен ряд свойств быстрых электронов — поглощение их в веществе, тормозное излучение и т. д.

β -частицы получают свою большую энергию за счёт процессов, разыгрывающихся в радиоактивном ядре. Впоследствии были созданы установки, позволяющие получить «искусственные β -частицы», т. е. электроны, ускоренные до энергии в несколько миллионов электрон-

¹⁾ Напомним, что $10^6 \text{ eV} = 1 \text{ MeV} = 1,6 \cdot 10^{-6} \text{ эргов}$.

вольт с помощью соответственно высокой разности потенциалов. Такая установка аналогична обычной рентгеновской (где также используется прямой метод ускорения электронов), отличаясь от неё, главным образом, в том отношении, что она рассчитана на гораздо более высокое напряжение. Подобная установка состоит из специальной вакуумной трубки, способной выдержать высокие разности потенциалов, и из источника постоянного высокого напряжения. На одном конце вакуумной трубки расположена «электронная пушка», т. е. источник электронов в виде калящейся нити, снабжённой соответствующими фокусирующими электродами, собирающими поток электронов в узкий пучок. На другом конце трубки расположен анод, обычно имеющий вид кольца. Выходящие из пушки электроны под действием приложенного между нею и анодом электрического поля движутся к аноду; в тот момент, когда они пройдут сквозь отверстие последнего, они, очевидно, будут иметь кинетическую энергию E электрон-вольт, если между анодом и катодом (т. е. нитью пушки) приложена разность потенциалов E вольт.

В качестве источника высокого напряжения пользуются либо повышающими трансформаторами, либо специальными генераторами постоянного напряжения¹⁾. Наибольшее распространение получил в последние годы электростатический генератор ван-де-Граафа, достигший высокого технического совершенства.

Установка для получения «искусственных β -частиц» с помощью описанного выше прямого метода ускорения электронов неизбежно приобретает весьма громоздкие формы, так как в связи с применением очень высокого напряжения и сама трубка, и генератор напряжения должны иметь соответственно большие размеры. Укажем для примера, что генератор типа ван-де-Граафа, построенный в Украинском физико-техническом институте (г. Харьков) и рассчитанный на получение напряжений всего до 4 MV, по внешнему виду представляет собой полый металлический шар диаметром 10 м, расположенный на изолирующих колоннах высотой в 8 м.

С помощью высоковольтных генераторов уже удалось получить напряжения до 10 MV. Вакуумные трубки на такое напряжение не были, однако, построены, и наибольшая энергия, до которой удалось ускорить электроны, не превышала 4—5 MeV. Такие электроны способны вызывать расщепление некоторых атомных ядер. Следует заметить, что в трубках можно получить несравненно более интенсивные электронные пучки, чем те, которые доставляются радиоактивными веществами. Интенсивность электронного пучка в трубке легко может достигать величины, эквивалентной β -излучению от 20 кг радия.

Но десять миллионов вольт — это, повидимому, тот практический предел, выше которого современная техника генерирования постоян-

¹⁾ Разные варианты получения высокого напряжения, используемые в прямом методе ускорения заряженных частиц, систематизированы в обзорном докладе Ланге и Шпинеля¹. См. также статью Хлебникова².

ного высокого напряжения существенно подняться не может, главным образом потому, что это потребовало бы непомерно больших размеров всего устройства. Поэтому конструкторская мысль не раз обращалась к идее ускорения электронов с помощью какого-либо косвенного метода. В самом деле, обязательно ли для ускорения электронов до энергии, положим, в 5 MeV располагать полным напряжением в 5 миллионов вольт? Нельзя ли, взяв сравнительно невысокое напряжение, приложить его на пути движения электрона многократно и таким способом ускорить электрон до больших скоростей? Как известно, метод многократного ускорения был успешно использован в так называемом линейном синхронном ускорителе ионов. Впервые модель такой установки построил в 1927 г. Видероз³. Схема устройства линейного ускорителя такова. Ионы из соответствующего источника пролетают в вакууме последовательно через прямолинейный ряд цилиндрических электродов возрастающей длины. Нечётные электроды в этом ряду соединены с одним полюсом генератора высокой частоты, а чётные — с другим. Длина электродов и частота генератора подбираются таким образом, что в зазорах между электродами получается электрическое поле нужного направления как раз в те моменты, когда ионы проходят через эти промежутки. Для такой синхронизации необходимо, очевидно, чтобы время, за которое ион пролетает внутри данного цилиндра от одного его края до другого, было равно периоду колебаний напряжения от генератора; нужно, таким образом, выполнить условие:

$$l_n v_n = T = \text{const.},$$

где l_n — длина n -го цилиндра, v_n — скорость иона на этом участке его пути. Для получения ионов с достаточно большой энергией приходится устраивать большое число ускорительных промежутков, т. е. брать большое число цилиндров, и общая длина всей вакуумной трубки становится очень большой. Поэтому метод линейного синхронного ускорителя практически пригоден лишь для ускорения очень тяжёлых ионов, у которых при заданной кинетической энергии скорость меньше, чем у лёгких, так что соответственно уменьшается необходимая длина трубки. Слоан и Котс⁴ получили ионы ртути с энергий 2,85 MeV в трубке, содержащей 36 электродов и имевшей длину 1,85 м. Для ускорения протонов до такой же энергии и при такой же частоте ($\lambda = 29,8$ м, $f \sim 10^7$ Hz) потребовалась бы трубка длиной в 25 м. Так как существенное повышение частоты сверх 10^7 Hz в такой установке практически уже невозможно, то очевидно, что для электронов из-за необходимой гигантской длины трубки этот метод ускорения совершенно непригоден.

Существует другой вариант синхронного ускорения с прямолинейным движением частиц, отличающийся тем, что ускоряющее напряжение подаётся на промежутки между цилиндрами не от высокочастотного генератора, а от двух проводов, образующих колебательную систему, в которой создаются бегущие волны (принцип метода

предложен Иснигом⁵ в 1925 г.). Цилиндрические электроды присоединяются к соответствующему ряду точек на указанных проводах, и бегущая волна переносит свой потенциал последовательно на все ускорительные промежутки. Так как скорость распространения бегущей волны практически равна скорости света, то этот метод ускорения пригоден и для электронов, не требуя непомерно большой длины трубки. Бимс и Троттер⁶ в 1934 г. получили в установке такого типа электроны с энергией в 1,3 MeV, при общей длине трубки около 2,6 м. Большим недостатком этого метода является то, что могут быть получены лишь крайне малые интенсивности пучка электронов (мы не будем останавливаться здесь на причинах этого). Поэтому опыты с ускорителями такого типа были оставлены.

Идея создания установки для ускорения электронов, использующей принцип многократного ускорения, всё же неизменно продолжала привлекать внимание физиков⁷.

Наилучшим образом и с наибольшим успехом метод синхронного ускорения заряженных частиц применён в циклотроне. В этом чрезвычайно остроумном аппарате, впервые построенном Лауренсом и Ливингстоном⁸ в 1932 г., вместо прямолинейного движения ускоряемых частиц имеет место движение их по плоской спирали, осуществляемое с помощью магнитного поля. К этим частицам применяется описанный выше метод синхронного ускорения, причём вместо большого числа ускорительных щелей требуется только один промежуток между двумя электродами (дуантами), расположенный по диаметру спиральной траектории частиц, которые, таким образом, на своём пути многократно проходят через этот промежуток (дважды за один оборот).

С помощью циклотрона удалось получить мощные пучки тяжёлых заряженных частиц — протонов, дейтронов и α -частиц (т. е. ионов водорода, дейтерия и гелия) — с весьма большими энергиями, достигающими в настоящее время до 32 MeV.

Естественно возникает вопрос: нельзя ли этот же самый аппарат или по крайней мере этот же метод ускорения частиц применить и для ускорения электронов? На этот вопрос, к сожалению, приходится ответить отрицательно.

НЕПРИГОДНОСТЬ ЦИКЛОТРОНА ДЛЯ УСКОРЕНИЯ ЭЛЕКТРОНОВ

Важнейшее соотношение, составляющее основной принцип работы циклотрона, состоит в том, что заряженная частица, обладающая зарядом e , массой m и линейной скоростью v , в поперечном однородном магнитном поле движется по окружности (радиус которой зависит от величины v и напряжённости магнитного поля H), описывая один оборот за время

$$T = \frac{2\pi mc}{eH} \quad (1)$$

(c — скорость света). В этом выражении существенно то, что вели-

чина T не зависит от скорости частицы; следовательно, если в силу тех или иных причин скорость частицы изменяется, — например, делается всё больше и больше, то это приводит лишь к соответствующему возрастанию радиуса её траектории в данном магнитном поле, но величина T при этом остаётся неизменной. Именно вследствие этого возникает возможность использовать для многократного ускорения ионов переменное напряжение высокой частоты с периодом $\tau = T$; это и осуществляется в циклотроне. Однако, правую часть равенства (1) можно считать постоянной величиной лишь до той поры, пока массу m частицы допустимо рассматривать, как величину постоянную. Другими словами, $T = \text{const.}$ только в области нерелятивистских скоростей частицы ($v \ll c$). Но это означает, что с помощью циклотрона частицы можно ускорять не до любой скорости, а лишь до некоторой предельной. Дальнейшего повышения скорости сверх этой последней не происходит, так как масса частицы m начинает заметно превышать массу покоящейся частицы m_0 (согласно релятивистской формуле: $m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$), а пропор-

ционально массе увеличивается и время T ; в силу этого, если в начале процесса ускорения частота τ переменного напряжения, приложенного к ускоряющему промежутку в циклотроне, была подобрана таким образом, что выполнялось условие $\tau = T$, то после ускорения до некоторой предельной скорости получается настолько заметное превышение T над τ , что частица «выпадает из синхронизма» и в результате она начинает замедляться в циклотроне, вместо того, чтобы ускоряться.

Условие постоянства массы в случае тяжелых частиц, обычно ускоряемых в циклотроне, а именно — протонов, дейтронов и α -частиц — практически выполняется до весьма высоких энергий этих ионов; с помощью циклотрона их можно ускорить до 50—100 MeV. Но дело обстоит совершенно иначе в случае электронов. Переменность массы электрона начинает существенно сказываться уже при энергиях порядка 25 keV. Следовательно, об ускорении электронов в циклотроне, например, до энергии в несколько миллионов электрон-вольт, не может быть и речи.

То обстоятельство, что область релятивистских скоростей для электронов начинается при гораздо меньших значениях кинетической энергии, чем для тяжёлых частиц, не представляет, конечно, ничего удивительного. Оно обусловлено огромным различием масс электрона и иона. Положим, например, что электрон и протон прошли разность потенциалов в 2 MV. Обе частицы приобретут одинаковую кинетическую энергию в 2 MeV (так как заряд протона по величине равен заряду электрона). Но в то время как скорость электрона с кинетической энергией в 2 MeV составляет 98% скорости света, скорость протона, обладающего той же кинетической энергией, равна всего 6,5% скорости света. Масса такого протона лишь на 0,2% превы-

шает массу покоящегося протона, тогда как масса электрона с энергией в 2 MeV приблизительно в 5 раз больше массы покоящегося электрона.

Совершенно очевидно, таким образом, что циклотрон — во всяком случае в своем современном выполнении — не может служить генератором очень быстрых электронов. Можно предложить несколько видоизменений циклотрона, при осуществлении которых появилась бы возможность использовать его для ускорения электронов. Одно из таких видоизменений, например, могло бы заключаться в подаче на дуанты циклотрона электрических колебаний, частота которых периодически изменяется (модуляция частоты), следуя за изменением величины T за время процесса ускорения. Другой вариант, недавно предложенный В. И. Векслером⁹, состоит в том, что значительно повышается как частота напряжения, прикладываемого к дуантам, так и его амплитуда. Все подобные видоизменения циклотрона в принципе решают задачу ускорения электронов, но практическое их осуществление связано, повидимому, с серьёзными техническими затруднениями.

УСКОРЕНИЕ ЭЛЕКТРОНОВ С ПОМОЩЬЮ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ

Возможен, однако, ещё один метод ускорения заряженных частиц — индукционный метод. Идея его известна давно. На протяжении последних двух десятилетий неоднократно делались как теоретические предложения, так и попытки экспериментального осуществления индукционного прибора для ускорения электронов. Наиболее существенные расчёты, сопровождавшиеся и экспериментом, принадлежат Р. Видероэ³ и относятся к 1927 г. Результаты и этих, и других опытов, о которых мы подробнее скажем ниже, были полностью отрицательными, главным образом вследствие недостаточной теоретической разработки вопроса о необходимых условиях работы такого прибора. В 1935 г. те выводы по этому вопросу, которых не хватало в теории Видероэ, были даны Стеенбеком¹⁰ в тексте патента, содержащего, кроме того, ряд ценных конструктивных предложений. К сожалению, эти сведения не получили тогда сколько-нибудь широкой известности. Проведённые Стеенбеком эксперименты дали обнадеживающие результаты, но дальше предварительной стадии он не пошёл.

Таким образом, Д. Керст, построивший в 1940 г. свой индукционный ускоритель¹¹, был первым физиком, которому удалось блестяще решить на практике задачу ускорения электронов с помощью косвенного метода, т. е. без применения высокого напряжения, и в частности — задачу индукционного ускорения электронов.

Идея индукционного метода ускорения заряженных частиц состоит в следующем. Всякий переменный магнитный поток индуцирует в окружающем пространстве электрическое поле. Это — особое поле, поле вихревого типа; его силовые линии, идущие вокруг индуцирую-

щего магнитного потока, являются замкнутыми линиями. В частности, если магнитный поток обладает осевой симметрией распределения интенсивности магнитного поля, то силовые линии индуцированного электрического поля будут представлять собой концентрические окружности, плоскость которых перпендикулярна к центральной оси магнитного поля, а центр совпадает с её следом на этой плоскости. Наличие электрического поля можно использовать для ускорения частиц, обладающих электрическим зарядом; а то обстоятельство, что силовые линии индуцированного электрического поля замкнуты, приводит к чрезвычайно существенным следствиям. В электрическом поле вихревого типа потенциал не является однозначной функцией координаты; поэтому, если заставить электрон описать в таком поле какой-либо замкнутый путь, то энергия, которую электрон при этом приобретёт за счёт сил поля, не должна быть равной нулю, как это было бы в случае постоянного электростатического поля. В этом можно убедиться особенно наглядно, если представить себе движение электрона по замкнутому пути, совпадающему с одной из силовых линий индуцированного электрического поля. Очевидно, что в этом случае на электрон на всём протяжении его движения будет действовать сила, направление которой неизменно совпадает с направлением движения электрона, и благодаря этому, возвратившись в исходную точку, он будет обладать соответственно большей скоростью (т. е. большей кинетической энергией), чем в начале своего пути. Выигрыш энергии на одном таком обороте может быть и совсем небольшим, но если этот процесс повторить многократно, то можно, очевидно, сообщить электрону весьма большую энергию. Сделаем небольшой расчёт, который покажет, каковы, примерно, цифры, о которых здесь можно говорить. Напряжённость E_r электрического поля, индуцированного магнитным потоком с осевой симметрией, является функцией от расстояния r данной точки до оси и от производной магнитного потока Φ_r по времени. Разность потенциалов, соответствующая одному обходу вокруг центральной оси магнитного поля по окружности радиуса r , будет составлять

$$\Delta U_r = 2\pi r \cdot E_r.$$

Предположим, что на протяжении $1/1000$ сек. магнитный поток изменяется равномерно ($\frac{d\Phi_r}{dt} = A = \text{const.}$), причём скорость его изменения A такова, что величина ΔU_r равна 20 V при $r = 5 \text{ см.}$ Это означает, что если в такое магнитное поле коаксиально поместить один виток проволоки, взяв диаметр его равным 10 см. , то в нём будет индуцироваться эдс в 20 V .

Допустим теперь, что вместо витка проволоки мы поместим в то же магнитное поле вакуумную камеру, например, в виде плоской коробки, в которой на расстоянии в 5 см от центральной оси имеется сначала неподвижный свободный электрон. Под действием индуцированного электрического поля этот электрон начнёт двигать-

ся — сначала вдоль проходящей через данную точку силовой линии электрического поля, а затем, вследствие инерции и других причин по некоторой траектории, отнюдь не совпадающей с этой линией. Но мы предположим, что найден способ заставить электрон, движущийся в идеальном вакууме под действием силы вихревого электрического поля, не сходить с силовой линии этого поля. Какую энергию приобретёт в таких условиях электрон за время $1/1000$ сек.? Этот случай представляет собой движение тела под действием постоянной силы, но при непрерывном возрастании массы тела в соответствии с ростом его скорости. Точный релятивистский расчёт показывает, что в электрическом поле указанной величины длина пути электрона за $1/1000$ сек. составит 290 км, т. е. он сделает за это время $925\,000$ оборотов вокруг центральной оси магнитного поля. (Чтобы этот результат не казался удивительным, вспомним, что из-за малости своей массы электрон уже при малой пройденной им разности потенциалов приобретает огромную скорость. В нашем примере электрон после первого оборота приобретает кинетическую энергию в 20 eV, чему соответствует скорость электрона, равная $2,67 \cdot 10^8$ см/сек.) Так как на каждом обороте электрон в нашем случае приобретает за счёт силы индуцированного электрического поля энергию в 20 eV, независимо от его массы, то, следовательно, в итоге его кинетическая энергия будет равна $20 \cdot 925\,000 = 1,85 \cdot 10^7$ eV или $18,5$ MeV.

Приведённый пример ясно показывает, что с помощью электромагнитной индукции действительно возможно сообщать электронам чрезвычайно большие энергии.

Однако сама по себе идея — ускорять электроны, заставляя их двигаться вдоль силовых линий индуцированного электрического поля — не имела бы никакой практической ценности, если бы она не дополнялась указанием способа, с помощью которого можно на самом деле удерживать движущийся электрон на силовой линии вихревого электрического поля, на замкнутой вокруг магнитного потока орбите ¹⁾.

Самый важный результат, полученный Видероз при теоретическом анализе вопроса об ускорении электронов с помощью электромагнитной индукции, состоит именно в том, что он обнаружил замечательную возможность автоматического управления движением электронов в индукционном ускорителе. Возможность эта заключается в следующем. Известно, что в однородном магнитном поле траекторией электрона является окружность, плоскость которой перпендикулярна магнитному полю (речь идёт о случае, когда электрон первоначально имел скорость v , перпендикулярную магнитному полю), а радиус её

¹⁾ Двигаясь в вихревом электрическом поле, электроны, разумеется, могут ускоряться в том случае, когда их траектория — незамкнутая линия (например, плоская спираль). Однако, такой вариант индукционного ускорителя, как легко показать, во многих отношениях хуже варианта с круговым движением электрона.

ρ зависит от величины v и от напряжённости магнитного поля H следующим образом:

$$\rho = \frac{m v c}{e H}, \quad (2)$$

где e — заряд электрона, m — его масса (в свою очередь зависящая от скорости v). Итак, с помощью магнитного поля можно заставить электрон двигаться по замкнутому пути — по окружности. Но именно в этом и состояла, как мы видели, задача, вставшая перед конструктором индукционного ускорителя электронов. Следовательно, решение её может заключаться в том, чтобы применить в приборе выбранное надлежащим образом магнитное поле. И здесь возникла заманчивая мысль: нельзя ли тем магнитным полем, которое обязательно должно быть создано в приборе, чтобы индуцировать электрическое поле, воспользоваться также и в качестве того управляющего магнитного поля, которое будет удерживать движущиеся электроны всё время на одной и той же замкнутой круговой орбите? Напряжённость H индуцирующего магнитного поля должна непрерывно меняться во времени (иначе будет $\frac{d\Phi}{dt} = 0$ и не будет индукции), и если бы речь шла об электроне, скорость которого неизменна, то траекторией его движения в таком поле, как показывает формула (2), была бы не окружность, а кривая с постепенно изменяющейся величиной ρ , т. е. медленно свёртывающаяся (при $\frac{dH}{dt} > 0$)

или развёртывающаяся (при $\frac{dH}{dt} < 0$) плоская спираль. В результате электроны, совершив сравнительно небольшое число оборотов в вакуумной камере, попали бы на стенки её. Так как, однако, при своём движении в камере электрон непрерывно увеличивает скорость благодаря действию индуцированного электрического поля, он в магнитном поле будет стремиться двигаться по всё менее круто изогнутой дуге окружности. Таким образом, в случае нарастающего магнитного поля и одновременного роста скорости электрона будут проявляться факторы, действующие в противоположные стороны: один — в сторону непрерывного уменьшения радиуса орбиты, другой — в сторону непрерывного увеличения его, и эти две тенденции всегда будут в некоторой степени компенсировать друг друга. После сказанного здесь покажется уже не столь поразительным, что можно, оказывается, добиться полного уравнивания этих двух стремлений — можно подобрать такие условия, при которых электрон, находясь в нарастающем магнитном поле, будет двигаться по некоторой определённой окружности неизменного радиуса, непрерывно набирая скорость. Видероз ещё в 1927 г. показал³, какому условию должна отвечать такого рода «равновесная орбита». Мы приведём здесь простой вывод этого интересного условия.

Радиус кривизны ρ траектории электрона, движущегося в магнитном поле, определяется приводившейся выше формулой (2). Следует

иметь в виду, что в этой формуле H представляет собой напряжённость магнитного поля в том месте, где находится электрон; величина ρ совершенно не зависит, например, от того, какова напряжённость магнитного поля в центре круговой орбиты электрона.

Из формулы (2) следует, что импульс электрона $p (= mv)$ и соответствующая этому импульсу при движении электрона в магнитном поле величина $H\rho$ связаны соотношением:

$$p = \frac{e}{c} H\rho \quad (3)$$

(заметим кстати, что это соотношение позволяет пользоваться величиной $H\rho$ в качестве удобной во многих случаях меры кинетической энергии электронов).

Если ставится задача, чтобы, несмотря на рост магнитного поля H , радиус траектории ρ оставался постоянным, равным, положим, r_0 , то, как показывает формула (3), необходимо добиться того, чтобы импульс электрона p изменялся в точности пропорционально изменению H . Импульс же электрона определяется той силой индуцированного электрического поля, которая ускоряет электрон. В случае аксиально-симметричного магнитного поля напряжённость E индуцированного электрического поля для точек, отстоящих на расстоянии r_0 от центральной оси магнитного поля, будет равна

$$E = \frac{1}{2\pi r_0 c} \frac{d\Phi}{dt}, \quad (4)$$

где Φ — магнитный поток через всю площадь, охватываемую окружностью радиуса r_0 . Таким образом, напряжённость индуцированного электрического поля в некоторой точке орбиты определяется не изменением той напряжённости магнитного поля, какая существует в этой точке, а изменением общего магнитного потока через площадь орбиты. Именно это обстоятельство и оставляет необходимую свободу при выборе нужных нам условий.

Согласно второму закону Ньютона (в релятивистском выражении)

$$\frac{dp}{dt} = eE.$$

Так как мы здесь предполагаем, что осуществлены такие условия, при которых электрон двигается по окружности неизменного радиуса r_0 в плоскости, перпендикулярной к магнитному полю, мы должны в это уравнение подставить то значение E , которое даётся выражением (4). Таким образом,

$$\frac{dp}{dt} = \frac{e}{2\pi r_0 c} \frac{d\Phi}{dt}.$$

Интегрируя это уравнение, мы получаем:

$$p_t - p_0 = \frac{e}{2\pi r_0 c} (\Phi_t - \Phi_0), \quad (5)$$

т. е. изменение импульса электрона за время t пропорционально изменению магнитного потока через площадь орбиты за то же время. Положим теперь, что начальное значение магнитного потока Φ_0 было подобрано в таком соответствии с начальной скоростью электрона, что выполнялось следующее соотношение:

$$p_0 = \frac{e}{2\pi r_0 c} \Phi_0 \quad (6)$$

(ниже мы рассмотрим подробнее, что означает это начальное условие). В этом случае вместо формулы (5) мы получаем:

$$p_t = \frac{e}{2\pi r_0 c} \Phi_t. \quad (7)$$

Обозначим среднее значение напряжённости магнитного поля внутри окружности радиуса r_0 через \bar{H} . По определению имеем

$$\bar{H} = \frac{\Phi}{\pi r_0^2}$$

и можем переписать уравнение (7) следующим образом:

$$p_t = \frac{e}{2c} \bar{H}_t r_0. \quad (8)$$

С другой стороны, мы знаем на основании формулы (3), что при условии $p = r_0$ в любой момент времени t должно выполняться соотношение:

$$p_t = \frac{e}{c} H_t r_0. \quad (9)$$

Следовательно, должно иметь место следующее простое условие:

$$H_t = \frac{\bar{H}_t}{2}. \quad (10)$$

Итак, электрон будет в нарастающем магнитном поле двигаться по круговой орбите неизменного радиуса в том случае, если напряжённость магнитного поля в точках этой орбиты во всякий момент времени будет вдвое меньше средней напряжённости магнитного поля внутри орбиты; в этом случае рост скорости (точнее — импульса) электрона в индуцированном электрическом поле будет происходить всё время пропорционально росту магнитного поля в точках орбиты, так что получится $p = \text{const}$.

Очевидно, что для выполнения условия (10) необходимо создать в центральной области внутри орбиты более сильное магнитное поле, которое к периферии должно убывать. Закон убывания поля по мере удаления от центра не имеет существенного значения: во всяком аксиально-симметричном магнитном поле при достаточной интен-

сивности центральной его части будет существовать окружность (а иногда и две concentрические окружности в данной плоскости), для точек которой будет справедливо условие $H = \frac{\bar{H}}{2}$; радиус этой окружности всецело определяется распределением поля.

Магнитный поток с нужным распределением интенсивности, которое будет сохраняться неизменным для любого момента времени, легко создать, например, в воздушном зазоре между полюсами электромагнита, взяв полюсные наконечники в виде тупоугольных усечённых конусов, обращённых срезанными вершинами друг к другу (разумеется, можно воспользоваться также специально подобранной комбинацией соленоидов, т. е. магнитной системой без железа.).

Мы можем рассмотреть сейчас, каков смысл начального условия (6), полученного нами выше. Как мы уже знаем, в индукционном ускорителе распределение магнитного поля должно быть таково, что для любого момента времени $\bar{H} = \frac{\Phi}{\pi r_0^2} = 2H$. Поэтому условие (6) можно переписать в следующем виде:

$$p_0 = \frac{e}{c} H_0 r_0. \quad (11)$$

Но это — не что иное, как выражение (2), написанное для момента времени t_0 . Таким образом, начальное условие (6) имеет весьма простой смысл: начальная интенсивность магнитного поля H_0 (в точках равновесной орбиты) должна иметь такую величину, чтобы в этом поле радиус кривизны траектории электрона, проходящего на равновесную орбиту по касательной к ней со скоростью $v_0 \left(= \frac{p_0}{m} \right)$, был как раз равен радиусу равновесной орбиты.

Из приведённого выше вывода легко видеть, что условие $H = \frac{\bar{H}}{2}$ является решением поставленной задачи независимо от того, каков именно закон изменения во времени производной $\frac{d\Phi}{dt}$, входящей в выражение (4). Необходимо лишь, чтобы за время процесса ускорения электрона знак её не менялся, иначе изменится и знак напряжённости E индуцированного электрического поля [соотношения (5) и (6) не нарушатся и в последнем случае, т. е. электрон останется на той же равновесной орбите, но он будет замедляться полем E , а не ускоряться].

Наконец, следует особо подчеркнуть, что сформулированное выше условие существования равновесной орбиты в индукционном ускорителе электронов совершенно не зависит от массы электрона. Поэтому, в отличие от того, что имеет место в случае циклотрона, работа бетатрона не нарушается и тогда, когда масса ускоряемой частицы, набравшей скорость, близкую к скорости света, увеличивается во много раз.

УСТОЙЧИВОСТЬ ДВИЖЕНИЯ ЭЛЕКТРОНА ПО РАВНОВЕСНОЙ ОРБИТЕ

Мы показали выше, что при соблюдении определённых начальных условий электрон, выпущенный на некоторую круговую линию, существующую в неоднородном аксиально-симметричном магнитном поле, будет своё дальнейшее движение совершать вдоль этой линии. Будет ли, однако, в реальных условиях это движение по такой «равновесной орбите» устойчивым? В численном примере, приводившемся нами, было подсчитано, что за 1 000 сек. электрон должен проделать в вакуумной камере колоссальный путь протяжением около 300 км. Укажем для сравнения, что в циклотроне длина пути иона — всего порядка 100 м. Если вспомнить, что даже в условиях наилучшего технического достижимого вакуума в камере всегда останется огромное количество молекул газа, с которыми электрону часто придётся сталкиваться на своём длинном пути, то станет совершенно ясным, какое значение приобретают вопросы устойчивости движения электронов по равновесной орбите, вопросы фокусировки, т. е. длительного удержания пучка быстро движущихся электронов вблизи геометрической линии равновесной орбиты. Прибор должен быть наделён такими свойствами, чтобы всякое случайное отклонение электронов с равновесной орбиты вызывало появление достаточных сил, могущих возвратить отклонившиеся электроны на эту орбиту.

Уже первые экспериментаторы, делавшие попытки построить индукционный ускоритель электронов, уделяли большое внимание вопросу об устойчивости движения электронов в приборе и пытались дать теоретический анализ этого вопроса. Рассматривался он и в теоретических работах, но весьма бегло¹⁾. Правильное решение его впервые дано было Стеенбеком¹⁰ в 1935 г. (как уже упоминалось, полученные им выводы были опубликованы — в 1937 г. — только в тексте патента). К таким же результатам, но изложенным более подробно, пришли в своей работе Керст и Сербер¹⁴. Теория указала замечательно простой и эффективный способ стабилизации движения электронов в индукционном ускорителе.

Решая задачу о фокусировке электронов в камере бетатрона, необходимо позаботиться о двух видах фокусировки. Во-первых, нужно обеспечить возвращение на равновесную орбиту тех электронов, которые отклонились от неё по направлению к центру или от центра, но не вышли из плоскости орбиты (радиальная фокусировка). Во-вторых, нужно, чтобы электроны, случайно вышедшие из плоскости орбиты вверх или вниз, возвращались снова в плоскость орбиты (аксиальная фокусировка). Обе фокусировки достигаются путём выбора

1) Работа В. В. Ясинского¹² содержит явно ошибочные выводы и утверждения. В статье Я. П. Терлецкого^{13а} вопрос о стабильности движения электронов рассмотрен лишь вскользь.

В последнее время Терлецкий вернулся к этому вопросу и рассмотрел его подробно и в общем виде^{13б}.

определённого распределения магнитного поля в области вблизи равновесной орбиты. Для радиальной фокусировки необходимо и достаточно, чтобы вблизи орбиты магнитное поле, как функция расстояния от оси, убывало медленнее, чем $1/r$.

В самом деле, положим, что вблизи орбиты закон убывания напряжённости магнитного поля описывается выражением

$$H = \frac{A}{r^n}, \quad (12)$$

и рассмотрим два случая: $n > 1$ и $n < 1$. На рис. 1 кривая F_c изображает центробежную силу, возникающую при движении электрона

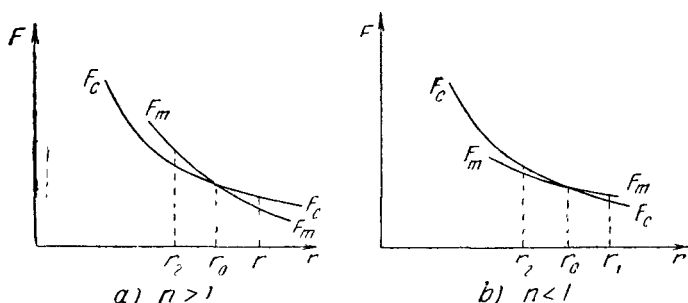


Рис. 1. Распределение интенсивности магнитного поля, необходимое для осуществления радиальной фокусировки электронов.

по круговой траектории, в функции от радиуса последней. Эта кривая — гипербола, так как центробежная сила

$$F_c = \frac{mv^2}{r}, \quad (13)$$

причём скорость электрона v безусловно можно считать величиной постоянной на протяжении, скажем, одного оборота электрона по орбите.

Вторая сила, действующая на электрон в противоположном направлении, т. е. к центру орбиты, — так называемая лоренцова сила, появление которой обусловлено действием магнитного поля на движущийся заряд. Как известно, лоренцова сила

$$F_m = \frac{e}{c} vH. \quad (14)$$

Следовательно, ход изменения F_m в функции от r при заданной скорости v всецело определяется видом зависимости H от r . Кривые на рис. 1 (а и б) изображают F_m для случая $H = \frac{A}{r^n}$ соответственно при $n > 1$ и при $n < 1$. Радиус орбиты электрона, по которой он реально будет двигаться, определяется из условия, что лоренцова и центробежная силы уравниваются друг друга [из этого условия и получается использованное нами выше выражение (2) для радиуса кривизны

траектории электрона при движении его в магнитном поле]. Так как в нашем случае электрон движется по равновесной орбите, то, следовательно, абсцисса точки пересечения кривых F_c и F_m на рис. 1 есть не что иное, как r_0 — радиус равновесной орбиты. Положим, что электрон случайно отклонился от равновесной орбиты и попал в точку, отстоящую от центра на расстоянии $r_1 > r_0$. Тогда, как легко видеть из рис. 1, в случае a центробежная сила окажется превышающей лоренцову силу, и в результате электрон будет ещё дальше смещаться в сторону больших r , т. е. не вернётся больше на равновесную орбиту. Наоборот, в случае b мы получаем при $r_1 > r_0$ $F_m > F_c$, так что лоренцова сила будет возвращать электрон по направлению к равновесной орбите. Аналогичные обстоятельства имеют место и в том случае, когда электрон, сбившись с равновесной орбиты, попадёт в точку, отстоящую от центра на расстоянии

$r_2 < r_0$: в случае a он не возвратится более на равновесную орбиту, в случае b — возвратится на неё.

Приведённые выше графические аргументы, разумеется, не являются строгим выводом и даны лишь ради их наглядности. Однако, и точный вывод приводит к тому же результату: для осуществления радиальной фокусировки в бетатроне необходимо, чтобы в точках равновесной орбиты и в области, близкой к

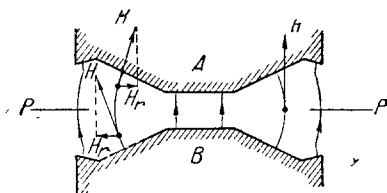


Рис. 2. Происхождение магнитных сил, осуществляющих аксиальную фокусировку электронов.

A, B — разрез полюсных наконечников электромагнита.

ней, показатель степени n [в выражении (12)] был меньше единицы.

Теория показывает, что в этом случае всякий (не чрезмерно сильный) толчок, сбивающий электрон с равновесной орбиты, приводит лишь к тому, что на основное движение электрона по орбите накладывается колебательное движение его около линии орбиты, довольно быстро затухающее, так что в дальнейшем электрон продолжает попрежнему двигаться по орбите.

Что касается аксиальной фокусировки, то она автоматически обеспечивается тем, что в бетатроне магнитное поле в центре сильнее, чем на периферии. Вследствие этого магнитные силовые линии выгибаются в направлении от центра («бочкообразность поля»), так что между полюсами электромагнита существует только одна плоскость — медианная плоскость P (рис. 2), в точках которой магнитное поле не имеет радиальной составляющей. В этой плоскости и будет находиться траектория движения электрона (равновесная орбита), так как легко видеть, что если электрон окажется выше этой плоскости, то радиальная составляющая магнитного поля (H_r на рис. 2) вызовет появление лоренцовой силы, направленной к медианной плоскости, а если электрон окажется ниже её, то лоренцова сила будет направлена вверх, т. е. опять-таки к этой плоскости

(заметим, что подобная же аксиальная фокусировка осуществляется и в циклотроне по отношению к пучку ускоряемых ионов).

Наличие аксиально фокусирующих свойств в неоднородном магнитном поле также приводит — в случае смещения электрона с плоскости P — к появлению колебательного затухающего движения (но уже в вертикальном направлении), которое накладывается на основное движение электрона по орбите. В работе Керста и Сербера¹⁴ вычислены основные параметры радиальных и аксиальных колебаний — их амплитуда, период и затухание — и показано, от каких условий зависят эти величины.

ПРЕРЫВИСТЫЙ ХАРАКТЕР РАБОТЫ БЕТАТРОНА

Процесс увеличения скорости электронов в бетатроне длится до тех пор, пока существует направленное в нужную сторону индуцированное электрическое поле E или, другими словами, пока продолжается нарастание магнитного потока Φ (так как напряжённость поля E пропорциональна $\frac{d\Phi}{dt}$). Ясно, что это нарастание не может длиться безгранично долго, так как для каждой магнитной цепи существует определённый технически достижимый предел величины потока Φ . Дойдя до этого предела, приходится остановить нарастание потока и, следовательно, прекратить ускорение электронов. Не угрожает ли это обстоятельство тем, что за ограниченное время электрон не успеет набрать желательную скорость? Отнюдь нет. Действительно, рассмотрим, чем определяется энергия электрона, полученная им за счёт силы индуцированного электрического поля в бетатроне. В этом приборе, как мы знаем, созданы такие условия, что электрон всё время находится на круговой орбите, совершая на ней оборот за оборотом. Используя формулу (9), мы можем для любого момента времени t определить импульс электрона. Эта формула показывает, что импульс электрона не зависит непосредственно от длительности ускорения и в конечном счёте определяется тем значением, до которого доведена к данному моменту напряжённость магнитного поля H_t на орбите, а также конструкцией полюсных наконечников электромагнита, поскольку их размерами и формой однозначно задаётся радиус равновесной орбиты r_0 .

Вряд ли в каком-либо из применений бетатрона может оказаться существенным, что в процессе ускорения электронов неизбежны прерывы. Они лишь приводят к тому, что от бетатрона можно получать быстрые электроны только отдельными, прерывистыми порциями. Можно представить себе две разновидности режима работы бетатрона: либо процесс роста магнитного потока от Φ_0 до Φ_f осуществляется однократно и соответственно получается одна отдельная порция ускоренных электронов, либо же этот процесс повторяется многократно один за другим, и соответственно одна за другой возникают порции быстрых электронов. Режим первого типа применял в своей

установке Видероз. Режим второго типа наиболее просто и рационально осуществляется путём питания обмоток электромагнита ускорителя переменным током, что и сделал Керст в своём бетатроне. При этом магнитный поток между полюсами электромагнита со временем меняется по синусоиде. Следовательно, на протяжении каждого периода существует два таких отрезка времени, в течение которых магнитное поле нарастает (по абсолютной величине), так что в это время можно осуществить индукционное ускорение электронов: это имеет место в первой и в третьей четверти каждого периода (участки AB и CD на рис. 3). Направления магнитного поля в течение этих двух отрезков времени противоположны друг другу; поэтому, если в первой

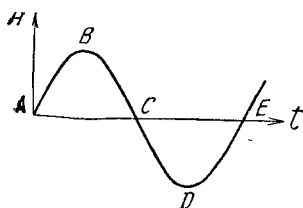


Рис. 3. Напряжённость магнитного поля в бетатроне, как функция времени.

четверти электроны ускорялись, совершая свои обороты вокруг оси прибора, например, по часовой стрелке, то в третьей четверти периода они будут ускоряться, двигаясь по своей орбите против часовой стрелки. Вторая и четвёртая четверти каждого периода (участки BC и DE на рис. 3) являются нерабочим временем бетатрона, так как в это время магнитное поле убывает и электроны могут только тормозиться в соответствующем индуцированном электрическом поле.

В популярно-технической литературе о новом генераторе быстрых частиц нередко встречается ошибочное утверждение, будто бетатрон — разновидность циклотрона, приспособленная для ускорения электронов. Всё изложенное выше показывает, что бетатрон по существу не имеет ничего общего с циклотроном и основан на совершенно другом принципе. Индукционное ускорение нельзя даже назвать многократным, так как электроны в индуцированном поле ускоряются непрерывно от начальной до максимальной скорости.

ПРЕДШЕСТВЕННИКИ КЕРСТА

Идея об использовании вихревого поля для ускорения заряженных частиц, повидимому, впервые была предложена Слепяном. В 1922 г. он запатентовал в США конструкцию рентгеновской трубки¹⁵, в которой электроны ускоряются в индуцированном электрическом поле, двигаясь в нарастающем магнитном поле по спиральному пути. Попыток экспериментального осуществления этой трубки Слепян, повидимому, не делал.

Инженер Видероз в диссертации, представленной в конце 1927 г., изложил теоретический расчёт предложенной им схемы индукционного ускорителя электронов, а также результаты своей экспериментальной работы с установкой такого рода³. Видероз впервые теоретически получил чрезвычайно важный результат о возможности движения электрона в нарастающем магнитном поле по окружности неизменного радиуса.

Брейт, Даль и Тьюв¹⁶ в 1927—1928 гг. построили установку для индукционного ускорения электронов. В ней использовалось очень быстро нарастающее магнитное поле, доходившее до своей максимальной величины (30.000 эрстед) за 10^{-5} сек. Электроны должны были двигаться по спиральному пути и попадать на расположенную в центре мишень. Их максимальная энергия по расчёту равнялась 1,5—2 MeV. В приборе удалось получить жёсткое рентгеновское излучение, но интенсивность его была крайне мала.

Физик Уолтон, работавший в Кембридже в лаборатории Рёзерфорда, опубликовал в 1929 г. результаты своей работы¹⁷, в которой он пытался осуществить ускорение электронов «с помощью непрямого метода, предложенного Рёзерфордом», а именно — с помощью индукционного метода (работа Видероз цитируется в конце статьи Уолтона, но, повидимому, Рёзерфорд предложил идею метода независимо от Видероз). В установке Уолтона вихревое поле создавалось внутри соленоида, на который разряжался конденсатор. Для этого случая Уолтон приводит теоретический расчёт условий, необходимых для осуществления кругового движения электронов; он приходит к тому же результату, который был найден Видероз. В этой установке электроны должны были, согласно расчёту, ускоряться до 540 KeV. На опыте, однако, ускорение электронов не удалось обнаружить.

Рюденберг и Стеенбек¹⁸ в 1933 г. предложили схему устройства рентгеновской трубки с ускорением электронов в вихревом поле. Электроны должны двигаться по спиральному пути и в конце цикла ускорения попадают на мишень, расположенную в центре. Существенным усовершенствованием по сравнению с аналогичными более ранними предложениями является применение магнитного поля, убывающего от центра к периферии, с целью получения аксиальной фокусировки электронов. Впрочем, эта идея не являлась новой, так как в это время уже было известно, что таким способом осуществляется аксиальная фокусировка ионного пучка в циклотроне.

В 1935 г. Стеенбек подробнее рассмотрел теорию работы индукционного ускорителя и, руководствуясь полученными выводами, построил в 1935—1936 гг. экспериментальную установку для индукционного ускорения электронов. Эта установка имеет очень много общего с бетатроном Керста. В ней удалось получить электроны с энергией в 1,8 MeV, но интенсивность пучка была крайне незначительной, и дальнейшие работы были оставлены¹⁹.

А. Бауэрс в своей монографии о сверхвысоких электрических напряжениях, изданной в 1939 г., предлагает оригинальную схему установки для индукционного ускорения электронов²⁰. К этой схеме индукционного ускорителя, возможно, ещё обратятся в будущем конструкторы новых моделей бетатрона, так как она обладает некоторыми благоприятными особенностями.

Отметим, наконец, что и в установке Кельмана, Корсунского и Ланге⁷ в качестве одного из возможных методов ускорения электронов предполагался индукционный метод.

Из работ, более поздних, следует назвать работу Я. П. Терлецкого. В его теоретической статье^{13а}, написанной в 1940 г., рассмотрен частный случай индукционного ускорителя, а именно — ускоритель со строго параллельным магнитным полем. В вопросе об условиях существования равновесной орбиты электронов в вихревом поле автор получил, конечно, тот же результат, что и Видероз. (Отметим, кстати, что замечание автора, будто расчёт Видероз сделан неточно и не релятивистски, является необоснованным.) Вариант ускорителя с использованием параллельного магнитного поля нельзя считать удачным, так как в нём отсутствует аксиальная фокусировка электронов.

Все перечисленные попытки практического осуществления индукционного ускорителя электронов были безуспешными. Одна из них, а именно — работа Видероз — имеет, однако, большой исторический интерес, и мы приведём некоторые данные об его опытах. Ознакомление с установкой Видероз даёт наглядное представление о том, каким шагом вперёд является бетатрон по сравнению с уровнем 1927 г.

Для электромагнита своей установки Видероз использовал сердечник мощного трансформатора. Обмотка электромагнита состояла из 16 катушек по 480 витков проволоки диаметром 1 мм, причём все катушки были соединены параллельно.

В воздушном зазоре электромагнита помещается вакуумная камера прибора. В связи с тем, что воздушный зазор выгоднее делать возможно более узким (чтобы заданную величину магнитного потока получить с наименьшим количеством ампер-витков), желательно, чтобы камера в центральной части, где магнитное поле должно быть наиболее сильным, имела минимальную толщину. Выполняя это условие, Видероз придал своей камере вид бублика: центральная её часть вовсе изъята (эта область, находясь внутри круговой орбиты электронов, всё равно является нерабочим пространством камеры), и в отверстие бублика вводятся выступы полюсных наконечников электромагнита. Сечение последних можно видеть на рис. 4, где схематически показана вся установка Видероз. Камера сделана из стеклянной трубки диаметром 15 мм; наружный диаметр тороида равен 160 мм. Диффузионный насос поддерживает в камере высокий вакуум порядка 10^{-6} мм Hg.

Источник электронов — электронная пушка — помещён в отдельный отросток камеры на довольно большом расстоянии от местоположения равновесной орбиты электронов. С помощью системы вспомогательных соленоидов и откидного экрана, покрытого люминесцирующим веществом (сернистым цинком), пучок электронов из пушки может быть сфокусирован так, чтобы он попадал в камеру по касательной к окружности равновесной орбиты.

Путём подбора ширины воздушных зазоров δ_1 и δ_2 (рис. 4) Видероз добился того, что условие $\bar{H} = 2H$ выполнялось в его установке для окружности диаметром 14,5 см. Другими словами, Видероз задал радиус равновесной орбиты r_0 равным 7,25 см.

Дальнейший этап предварительной юстировки прибора — установление правильных начальных условий, т. е. выполнение соотношения (11), полученного нами выше.

Начальная скорость электрона v_0 известна, поскольку известен потенциал на аноде электронной пушки (он составлял около 20 kV). Нужное значение начального магнитного потока задавалось с помощью реостата R (рис. 4), причём обмотка электромагнита питалась постоянным током при напряжении в 500 V.

Работа установки должна была, как предполагал Видероз, протекать следующим образом. После включения магнитного поля (поток Φ_0) включается заранее отрегулированная электронная пушка, доставляющая электроны на равновесную орбиту. Попадая в постоянное во времени магнитное поле надлежащей величины, электроны двигаются в вакуумной камере по окружности радиуса r_0 , описывая на ней оборот за оборотом с постоянной скоростью (пока не утратится в заметной степени их начальная кинетическая энергия — в результате столкновений с молекулами газа в камере). Вскоре после впуска пучка в камеру включается рубильник E (рис. 4). Ток в обмотке электромагнита при этом быстро возрастает, так что уже через несколько десятых долей секунды плавятся предохранители G , и ток выключается. За это время магнитный поток возрастает от Φ_0 до некоторого Φ_1 , а электроны, равномерно двигавшиеся по орбите, за это же время, продолжая двигаться по той же орбите (ибо выполнено условие $\dot{H} = 2H$), ускоряются за счёт сил индуцированного электрического поля до соответствующего значения импульса p_1 (по расчёту Видероз — до энергии ~ 6 MeV).

Рубильник E сочленён с другим рубильником (F) таким образом, что цепь F замыкается через 0,1 сек. после замыкания цепи E . Включённая в цепь F катушка D даёт добавочное магнитное поле, заставляющее электроны уйти с равновесной орбиты и попасть на наружные стенки камеры. Последние покрыты изнутри сернистым цинком, и свечение его под ударами быстрых электронов позволило бы, по замыслу Видероз, установить факт получения электронов с ожидаемой большой кинетической энергией.

Опыты Видероз не увенчались и не могли увенчаться успехом. Очевидно, прежде всего, что порочна идея доставки электронов на орбиту из далекого источника. Траектория электронов в постоянном магнитном поле не может иметь вид отрезка прямой, переходящего затем в замкнутую окружность. В действительности при таких усло-

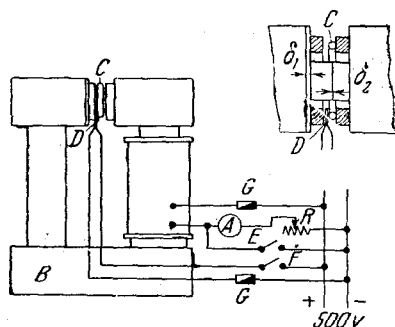


Рис. 4. Схема устройства установки Видероз.

B — электромагнит, C — вакуумная камера, D — плоская проволочная катушка.

виях траекторией будет симметричная петля, так что электроны, совершив примерно один оборот вокруг центра камеры, обязательно попадут на стенки её. Второй грубой ошибкой Видероз было его предположение, будто электроны с энергией в 20 keV могут длительно (например, 1 сек. или больше) обращаться в камере по окружности неизменного радиуса, когда магнитное поле во времени постоянно (первый этап опыта). Легко подсчитать, что при вакууме порядка 10^{-6} мм Нг такие электроны полностью израсходуют свою энергию на ионизацию молекул газа уже за малые доли секунды. Наконец, даже если бы это обстоятельство было учтено, Видероз не мог бы добиться того, чтобы электроны действительно двигались по окружности, описывая на ней многократно один оборот за другим; в своём теоретическом анализе проблемы индукционного ускорения электронов Видероз не нашёл решения вопроса о необходимых условиях стабильности движения электронов по равновесной орбите, а не зная этих условий, не позаботился о нужной форме полюсных наконечников электромагнита. Характерны следующие слова статьи Видероз, заканчивающие разбор возможных путей стабилизации движения электронов на орбите. «Во всяком случае все дальнейшие исследования... должны быть посвящены проблеме стабилизации».

ПЕРВЫЙ БЕТАТРОН КЕРСТА

Свой первый прибор Керст монтировал в Иллинойском университете около года и закончил сборку его 15 июля 1940 г. Этот прибор был рассчитан на ускорение электронов приблизительно до 2 MeV. Он имеет весьма небольшие размеры и свободно умещается на столе, как видно из рис. 5. На рис. 6 показаны форма и размеры сердечника электромагнита.

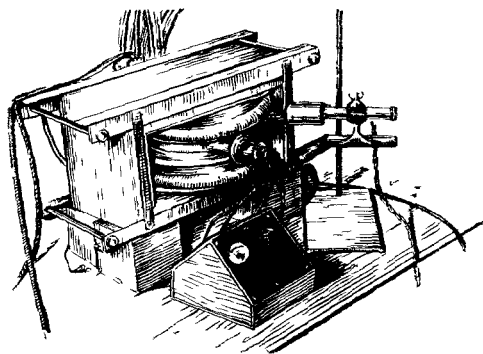


Рис. 5. Общий вид первого бетатрона.

Обмотка последнего питается переменным током. Поэтому весь сердечник во избежание больших потерь на токи Фуко должен быть не сплошным; он собран, подобно сердечникам трансформаторов, из большого числа тонких пла-

стинок кремнистой стали («трансформаторного железа»). Особенно тщательно собраны из радиально расположенных пластин полюсные наконечники; это обеспечивает совершенную аксиальную симметрию магнитного поля в воздушном зазоре.

Ускорительная вакуумная камера прибора представляет собой стеклянный бублик, сечение которого, соответствующее форме полюсных

наконечников электромагнита, изображено на рис. 6. Внешний диаметр камеры равен всего 20 см. С помощью химического серебрения внутренняя поверхность камеры покрыта тонким слоем серебра; слой этот заземляется, и это предохраняет от накопления статического заряда на поверхности стекла¹⁾.

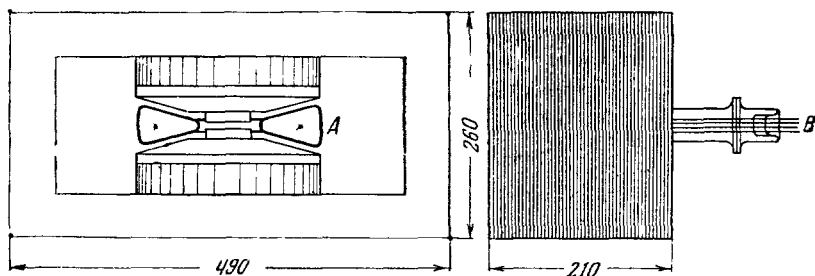


Рис. 6. Размеры электромагнита первого бетатрона.

А — вакуумная камера (в разрезе), В — вводы к электродам электронной пушки.

Форма полюсных наконечников электромагнита обеспечивает такое распределение магнитного поля, при котором радиус равновесной орбиты r_0 равен 7,5 см (рис. 7). Для характеристики исключительной эффективности метода магнитной фокусировки пучка в камере бетатрона укажем, что прибор ещё может нормально функционировать при столь невысоком вакууме, как $2 \cdot 10^{-5}$ мм Нг²⁾.

Обмотка электромагнита питается от небольшого генератора, мощностью ~ 4 kW, дающего переменный ток с частотой 600 Hz и эффективным напряжением около 80 V. Вследствие большой самоиндукции обмотки электромагнита непосредственное питание её переменным током связано с чрезвычайно низким значением $\cos \varphi$ и было бы крайне невыгодным. Поэтому Керст применяет резонансную схему питания обмотки, изображённую на рис. 8. Ёмкость батарей конденсаторов подбирается таким

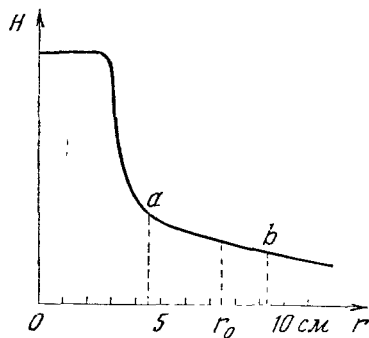


Рис. 7. Распределение напряжённости магнитного поля в первом бетатроне, как функция расстояния от центральной оси.

r_0 — радиус равновесной орбиты; на участке ab поле убывает по закону r^{-3} .

¹⁾ Камеру бетатрона нельзя делать из металла или вообще из проводящего материала, так как в этом случае она представляла бы собой замкнутую обмотку трансформатора, компенсирующую тот магнитный поток, который должен дать индуцированное электрическое поле.

²⁾ В этом приборе, как и в последующих моделях, камера работает на постоянной откачке, т. е. при установке имеется система вакуумных насосов.

образом, чтобы собственная частота полученного колебательного контура равнялась частоте питающего тока (600 Hz).

Для работы бетатрона численное значение частоты питающего тока не играет существенной роли. Мы уже указывали, что конечная энергия электронов, ускоренных в бетатроне, не зависит от длительности процесса ускорения. При повышении частоты уменьшается длительность ускорения (так как она равна $1/4$ периода), и уменьшается, стало быть, общее число оборотов электрона в камере за время ускорения, но зато соответственно увеличивается тот прирост энергии, который электрон получает за один оборот (так как эта величина пропорциональна $\frac{dH}{dt}$). В результате и получается независимость конечной энергии электронов от частоты питающего тока. Имеется, однако, ряд соображений, делающих желательным применение воз-

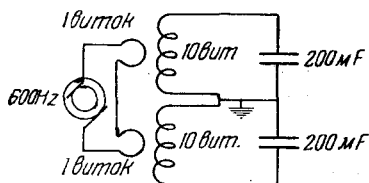


Рис. 8. Резонансная схема питания обмоток электромагнита бетатрона.

можно большей частоты, т. е. меньшей длительности рабочего такта бетатрона. Например, при меньшей общей длине пути электрона в камере уменьшается число столкновений с молекулами газа. С другой стороны, приходится брать не слишком высокие частоты, так как с ростом частоты сильно возрастают потери — главным образом, в железе — и, следовательно, затрудняется задача охлаждения магнита. Характерно, что, начав с 600 Hz, Керст в более крупных моделях прибора перешёл на более низкие частоты питающего тока.

Источником электронов, подлежащих ускорению, служит миниатюрная электронная пушка, расположенная снаружи равновесной орбиты, на расстоянии 9 см от её центра. Фокусирующие электроды пушки устроены таким образом, что она посылает в камеру два лентообразных пучка электронов, направленных в противоположные стороны. Электроны из одного пучка ускоряются в течение первой четверти каждого периода, а электроны из второго пучка — в течение третьей четверти. Об этой возможности мы уже упоминали раньше. Напряжение на аноде электронной пушки, определяющее входную скорость электронов v_0 , равно примерно 600 V. Заметим, что это — наибольшее из напряжений, которые подводятся к прибору, генерирующему электроны с энергией более 2 MeV!

Выполнение условия $n < 1$ (о котором мы говорили выше; см., например, рис. 1), сообщая магнитному полю вблизи орбиты фокусирующие свойства и обеспечивая тем самым стабильность движения электронов по равновесной орбите, позволяет удачно решить ещё один весьма существенный для работы бетатрона вопрос — вопрос о впуске электронов, о доставке их на равновесную орбиту. В этой проблеме содержатся две задачи. Прежде всего, необходимо решить, в каком месте вакуумной камеры поместить электронную пушку. Оче-

видно, невозможно расположить её на самой равновесной орбите, ибо в таком случае электроны после первого же оборота будут наталкиваться на пушку и дальнейшего их ускорения не будет. Следовательно, пушка должна помещаться либо снаружи, либо внутри равновесной орбиты. Но будут ли в таком случае электроны, вылетая из пушки, двигаться так, чтобы в конце концов попасть на равновесную орбиту? Теоретический анализ показывает, что это будет иметь место, если создано такое распределение магнитного поля вблизи орбиты, при котором выполняется условие $n < 1$. В этом случае электроны, выходящие из пушки в надлежащий отрезок времени и с надлежащим направлением начальной скорости (подробнее мы скажем об этом ниже), будут двигаться по сложной траектории в виде пульсирующей плоской спирали, асимптотически сближающейся с равновесной орбитой. Эта траектория — результат сложения затухающего колебательного движения электрона около линии равновесной орбиты с его круговым движением вокруг оси камеры. Через некоторое время электрон попадает на равновесную орбиту и в дальнейшем по ней и движется («захватывается орбитой»). На рис. 9 схематически показан примерный вид траектории электрона в первое время после вылета его из пушки [этот рисунок относится к определённому значению n ($n = \frac{3}{4}$) и к определённым начальным условиям].

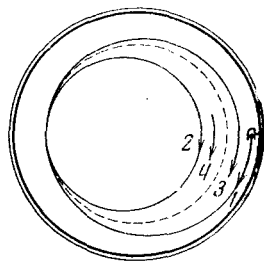


Рис. 9. Вид начального участка траектории электрона. Пунктиром показана равновесная орбита.

Вторая часть проблемы впуска электронов заключается в следующем: как обеспечить в бетатроне выполнение начального условия (11), которое мы получили выше? Электромагнит бетатрона питается переменным током; следовательно, магнитное поле непрерывно изменяется, и поэтому начальное условие:

$$mv_0 = p_0 = \frac{e}{c} H_0 r_0$$

выполняется точно лишь для некоторого бесконечно малого промежутка времени, в течение которого H проходит через фиксированное значение H_0 . Можно было бы думать поэтому, что прибор практически вообще не будет работать при таких условиях. Но и здесь фокусирующие свойства магнитного поля в бетатроне позволяют выйти из затруднения. Наличие их значительно смягчает начальное условие (11): существует не одно значение, равное H_0 , а целая область значений напряжённости магнитного поля на орбите, при которых электроны с фиксированной входной скоростью v_0 ещё фокусируются магнитным полем прибора и доставляются на равновесную орбиту. Другими словами, электроны из пушки могут попадать на равновесную орбиту в течение отрезка времени конечной длительности. Обратимся для пояснения к рис. 10. В тот момент, когда синусоидально меняющееся

магнитное поле проходит через значение $H=0$, электроны из пушки будут двигаться прямолинейно и ударяться в стенки камеры (линия a на рис. 10). В некоторый следующий момент напряжён-

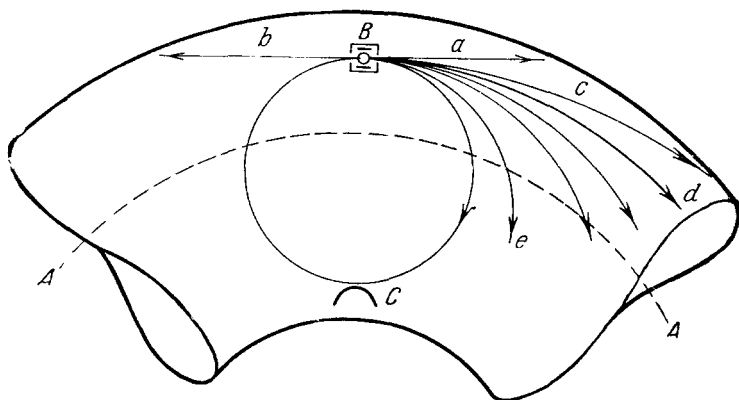


Рис. 10. Пути электронов, вылетающих из пушки в разные моменты времени. AA — равновесная орбита, B — электронная пушка, C — мишень.

ность магнитного поля будет уже отличной от нуля, хотя и малой, и электроны, вышедшие в этот момент из пушки, под действием этого поля полетят по криволинейной траектории c , но также ударятся в стенку камеры. Наконец, настанет такой момент, когда

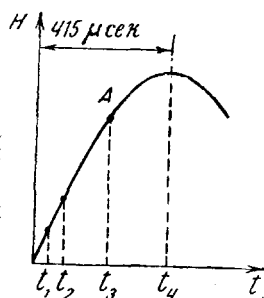


Рис. 11. Существенные моменты времени на протяжении рабочего такта бетатрона.

в течение некоторого малого отрезка времени — в течение «рабочего интервала впуска» — напряжённость магнитного поля будет такова, что электроны, влетающие в это время в камеру, не будут достигать стенки (траектория d), пойдут по спиральному пути, попадут на равновесную орбиту и будут участвовать в процессе ускорения.

В следующие моменты времени возросшее ещё больше магнитное поле начнёт уже слишком сильно загибать траектории электронов, как показано, например, линией e . Такие электроны также будут ударяться о стенки камеры или об электроды пушки и таким образом «выходить из игры». Приведём некоторые цифры. Весь отрезок времени от

момента, когда напряжённость магнитного поля равна нулю, до момента, когда она достигает максимальной величины, длится, очевидно, одну четверть периода, что при частоте в 600 Hz составляет $1/2400$ сек. или 415 μ сек. (см. рис. 11). Рабочий интервал впуска длится от момента $t_1=0,9$ μ сек. до момента $t_2=1,6$ μ сек., т. е. всего около $0,2\frac{0}{10}$ общей длительности рабочего такта бетатрона!

Нужно, таким образом, иметь в виду, что в этой модели прибора на орбиту может быть доставлена для дальнейшего ускорения всякий раз лишь сравнительно очень небольшая порция электронов.

Теперь мы подошли к проблеме вывода электронов. Электрон в надлежащее время вылетел из пушки в камеру, попал на равновесную орбиту и двигался по ней в течение четверти периода, т. е. 415 μ сек., непрерывно ускоряясь; совершив за это время примерно 260 000 оборотов и пройдя путь общим протяжением около 125 км, он набрал максимальную для данного прибора скорость, определяемую величиной радиуса равновесной орбиты и максимальным значением напряжённости магнитного поля на орбите. Теперь необходимо увести этот электрон с равновесной орбиты и тем или иным способом использовать, так как после момента, когда магнитное поле достигло максимума и дальше начинает убывать, бессмысленно держать электрон на орбите: индуцированное электрическое поле в это время направлено уже в противоположную сторону, и электрон начнёт в нём замедляться, теряя накопленную скорость.

Так как речь идёт об очень кратковременных процессах, то совершенно очевидно, что вывод ускоренных электронов с орбиты должен быть сделан автоматическим. В приборе Керста эта задача решена также весьма остроумно. Ускоренные электроны не выводятся наружу, а используются внутри камеры: они направляются к небольшой вольфрамовой пластинке (С, рис. 10), которая служит мишенью или антикатодом. Ударяясь о мишень, быстрые электроны тормозятся в ней, в результате чего возникает рентгеновское излучение, как в обычных рентгеновских трубках. Бомбардируемая электронами прерывисто и поочередно с двух сторон (в конце 1-й и в конце 3-й четверти каждого периода) мишень испускает рентгеновские лучи поочередно в двух противоположных направлениях, с частотой 1200 очень коротких импульсов в 1 сек. Таким образом, окончательной продукцией прибора является свободно проходящий наружу сквозь стенки вакуумной камеры прерывистый лучок жёстких рентгеновских лучей.

Как же, однако, заставить ускоренные электроны в нужный момент сойти с равновесной орбиты и попасть на мишень? Для этого, очевидно, необходимо нарушить прежнее распределение магнитного поля и тем сместить равновесную орбиту в нужную сторону, в данном случае — в сторону резкого уменьшения её радиуса. Электроны в этот момент сойдут с прежней орбиты и по быстро сокращающейся спирали будут стремиться к новой равновесной орбите: двигаясь по спирали, они заденут мишень и дадут начало рентгеновскому излучению. Керст осуществляет автоматически синхронизированные изменения радиуса равновесной орбиты следующим образом. К центральной части каждого из полюсных наконечников электромагнита прикреплён диск диаметром 50 мм, сделанный из прессованной железной пыли, сцементированной жидким стеклом. Магнитные свойства этого материала таковы, что в этих дисках магнитное насыщение достигается при гораздо меньших значениях напряжённости магнит-

ного поля, чем в остальных частях сердечника. Когда в конце четверти периода напряженность магнитного поля подходит к максимуму, поле в центре делается по сравнению с полем на периферии более слабым, чем прежде; при этом новым пространственным распределении интенсивности магнитного поля радиус равновесной орбиты уменьшается, что обеспечивает попадание электронов на мишень.

По расчёту электроны в первом бетатроне Керста должны ускоряться до энергии в 2,3 MeV (это определяется тем, что максимальная напряженность на линии орбиты составляет 1250 эрстед и радиус орбиты равен 7,5 см). Керст исследовал поглощение в свинце рентгеновских лучей, испускаемых мишенью, и эти измерения подтвердили расчётную цифру достигаемой электронами скорости. Это — прямое доказательство того, что прибор действительно работает и сообщает электронам ту энергию, на которую он был рассчитан.

В полном соответствии с теорией рентгеновского излучения при релятивистских скоростях электронов излучение из мишени бетатрона оказалось обладающим резкой пространственной асимметрией: большая часть рентгеновских квантов излучается в том направлении, в каком летели к мишени электроны, и очень мало квантов излучается в перпендикулярных к этому направлениях. Наличие резко локализованного, направленного пучка рентгеновских лучей — очень ценная особенность бетатрона. Пучок рентгеновских лучей из мишени первого бетатрона Керста в оптимальном направлении был по интенсивности эквивалентен γ -излучению от 1 г радия.

Резюмируя, мы можем сказать, что описанная нами модель бетатрона в сущности представляет собой чрезвычайно изящную конструкцию высоковольтной (но маломощной) рентгеновской трубки. Вместо постройки громоздкого повышающего трансформатора со вторичной обмоткой из 260 000 витков, который мог бы дать переменное напряжение в 2,3 MV, а также постройки выпрямителя и вакуумной рентгеновской трубки на такое напряжение, — создан компактный прибор, в котором соединены в одно целое повышающий трансформатор, выпрямитель и ускорительная трубка, причём роль вторичной обмотки трансформатора играет сам электронный лучок, описывающий по одной и той же линии необходимые 260 000 оборотов. Ещё Видероз образно назвал свой индукционный ускоритель электронов лучевым трансформатором (Strahlentransformator).

ПОСЛЕДУЮЩИЕ МОДЕЛИ БЕТАТРОНА

Добившись прекрасных результатов с первым своим прибором, Керст сразу же задумал создать большую установку для генерирования электронов с энергией в 100 MeV. Фирма «Дженерал электрик» согласилась предоставить конструкторский и производственный аппарат своих исследовательских лабораторий (г. Скенектеди) для сооружения такой установки. В качестве промежуточной ступени решено

было сконструировать под руководством Керста бетатрон на 20 MeV²¹. Постройка этой установки была закончена в 1941 г.¹⁾

Второй бетатрон имеет уже довольно солидные размеры, хотя конечно, они гораздо меньше, чем у циклотрона, способного дать протоны той же энергии. Общий вид бетатрона на 20 MeV представлен на рис. 12. Вес установки составляет около 3,5 т. Электромагнит имеет в длину 1,5 м, в ширину 0,5 м и в высоту 0,9 м. Полусные наконечники имеют диаметр 480 мм; приблизительно таков же и наружный диаметр стеклянной вакуумной камеры. В этом бетатроне радиус равновесной орбиты равен 19 см. В каждом цикле ускорения электроны совершают около 350 000 оборотов, проходя путь длиной в 420 км.

В первые месяцы работы второго бетатрона были получены электроны с энергией в 13 MeV, а к концу 1941 г. удалось получить полное расчётное ускорение, т. е. ускорение электронов до 20 MeV. Скорость электрона, соответствующая такой энергии, меньше скорости света всего на $0,03\%$! Это, несомненно, наибольшая скорость, когда-либо полученная человеком. Более того, рентгеновские кванты, возникающие при ударе таких электронов о мишень, по своей энергии ($E_{\max} = 20 \text{ MeV}$) превышают наиболее жёсткие γ -кванты, известные и использованные в экспериментальной практике ядерной физики, а именно — γ -лучи с энергией 17 MeV, возникающие при облучении лития протонами. По ионизирующему действию резко направленный пучок рентгеновского излучения из мишени бетатрона эквивалентен более чем 1 кг радия. Быть может, не лишним будет напомнить, что годовая добыча радия во всём мире меньше этого количества. Можно привести ещё следующую цифру: интенсивность рентгеновского излучения в пучке (при энергии электронов в 20 MeV), измеренная с помощью толстостенной ионизационной камеры, составляет 50 рентген в минуту на расстоянии в 70 см от мишени.

Направленность пучка рентгеновских лучей от бетатрона характеризуется тем, что они производят фотографический эффект только в пределах конуса с углом при вершине в 6° .

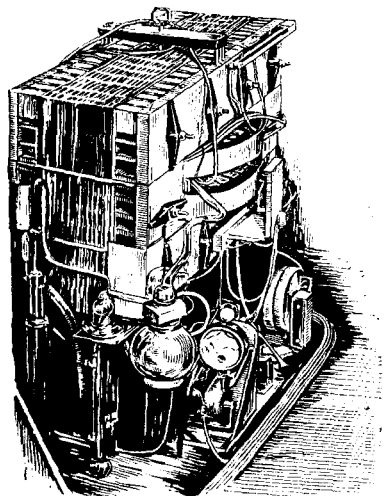


Рис. 12. Общий вид бетатрона, генерирующего электроны с энергией в 20 MeV.

¹⁾ Появившееся в этот период название новой установки — «реотрон» — вскоре было заменено гораздо более удачным нынешним её названием.

В бетатроне на 20 MeV сделан ряд технических нововведений по сравнению с первой моделью. Пушка в этом бетатроне посылает в камеру пучок электронов только в одном направлении. Таким образом, только одна четверть периода, а не две, является рабочим тактом прибора. Мишенью служит тыльная сторона пушки, так что, в отличие от первого бетатрона, мишень находится снаружи орбиты, и в конце процесса ускорения электронов радиус равновесной орбиты должен быть не уменьшён, а увеличен. Способ резкого изменения радиуса орбиты в этой установке несколько изменён. Увеличение радиуса (расширение орбиты) в надлежащие моменты времени достигается с помощью синхронизированного пропускания импульсов тока через специальную обмотку, расположенную в пазах на поверхности полюсных наконечников. Ламповая радиотехническая схема, индуктивно связанная с магнитным полем бетатрона, посылает импульс тока в эту «расширительную обмотку» в любой желаемый момент первой четверти каждого периода, например, в момент, соответствующий точке А на рис. 11. Это позволяет получать от бетатрона, по желанию, не только электроны с энергией в 20 MeV, но и электроны любой наперёд заданной энергии ниже этой максимальной, так как в зависимости от значения магнитного поля в моменты окончания цикла ускорения (т. е. включения расширительной обмотки) будет меняться и энергия электронов, отброшенных в эти моменты на мишень [см. выше уравнение (9)].

Обмотка электромагнита питается, как и в первой модели, с помощью резонансной схемы. Питающий ток имеет частоту 180 Hz; применён ферромагнитный утроитель частоты, включённый в городскую сеть¹⁾.

Самое существенное усовершенствование, внесённое Керстом в технику работы второго бетатрона, касается впуска электронов в прибор. Опыт работы с первым бетатроном показал, что непрерывный выпуск электронов в камеру весьма неблагоприятно отражается на интенсивности рентгеновского излучения, даваемого бетатроном. Нет никакой надобности засорять камеру электронами, не участвующими в процессе ускорения; пушка должна посылать в камеру электроны только в течение рабочего интервала впуска (т. е. от момента t_1 до момента t_2 , см. рис. 11). Это и сделано во втором бетатроне. Большую часть времени пушка остаётся без напряжения, и электронный пучок не выходит из неё в камеру. С помощью радиотехнической схемы, работающей синхронно с изменениями магнитного поля электромагнита, на электроды пушки подаются импульсы напряжения ($U_{\max} = 15-20$ kV), так что пушка в надлежащий момент времени посылает в камеру «короткую очередь» электронов; это происходит 180 раз в 1 сек. Импульсная подача напряжения на электроды пушки, несомненно, имеет своим результатом ещё одно благоприят-

1) Американский стандарт частоты тока в сети — 60 Hz.

ное обстоятельство: начальная скорость электронов v_0 при этом не фиксирована, она растёт в соответствии с формой импульса напряжения, а так как в это же время растёт и магнитное поле, то это приводит к некоторому увеличению длительности рабочего интервала впуска, что означает увеличение средней во времени интенсивности электронного пучка, падающего на мишень. Судя по данным, приводимым Керстом²¹, рабочий интервал впуска у второго бетатрона действительно длится гораздо большую часть периода, чем у первого бетатрона.

Существует более эффективный способ увеличения средней во времени интенсивности электронного пучка в камере: максимальное повышение частоты тока, питающего электромагнит, насколько это допускается конструкцией последнего. Средняя интенсивность электронного пучка растёт пропорционально этой частоте, если только будет обеспечен достаточный ток эмиссии из нити электронной пушки.

Относительно *мгновенной* интенсивности электронного пучка на орбите необходимо отметить, что основным лимитирующим эту интенсивность фактором является пространственный заряд, обуславливающий кулоновское отталкивание электронов. В работе Керста¹¹ сделана грубая оценка того максимального тока, который ещё может иметь место при заданном магнитном поле.

В бетатроне на 20 MeV средний во времени ток на мишень по расчёту может достигать до 1 μ A.

В современных высоковольтных рентгеновских трубках имеют место в тысячи раз большие значения электронного тока. Тем не менее интенсивность пучка рентгеновских лучей от бетатрона может даже значительно превышать получаемую в трубках, так как при переходе к электронам больших энергий помимо соответствующего увеличения энергии квантов сильно возрастает и выход излучения, и степень его направленности.

Сооружение бетатрона на 100 MeV было начато в том же 1941 г. Такая колоссальная энергия, как 100 MeV, далеко превосходит всё, что могло бы в настоящее время потребоваться для целей терапии или дефектоскопии. Но для науки пуск в эксплуатацию бетатрона на 100 MeV сулит перспективы, которые даже трудно пока оценить.

Энергия электронов в 100 MeV уже приближается к энергиям космических электронов. Такие процессы, как рождение мезона, известные пока только из наблюдений над космическими частицами, требуют затраты энергии, равной примерно 80 MeV (такова собственная энергия мезона, в соответствии с уравнением Эйнштейна: $E = mc^2$, если принять, что масса мезона в 160 раз больше массы электрона). Таким образом, можно надеяться, что третий бетатрон сможет стать источником искусственно созданных в лаборатории мезонов, что может оказаться решающим для полного выяснения природы мезонов. Мы не будем здесь пояснять подробно, почему

именно эта проблема считается одной из центральных проблем современной физики¹⁾

Постройка бетатрона на 100 MeV в настоящее время, вероятно, уже закончена (пуск его в эксплуатацию был намечен на весну

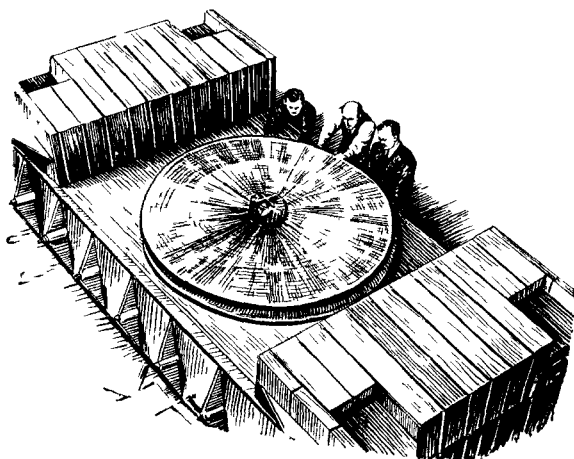


Рис. 13. Нижняя половина сердечника электромагнита бетатрона, рассчитанного на получение электронов с энергией в 100 MeV.

1943 г.) Подробных данных об этой установке ещё нет. Известно, что вес электромагнита нового бетатрона — 125 т. Вакуумная камера представляет собой тороид эллиптического сечения, собранный из 12 отлитых из специального кварцевого стекла секций²²; наружный диаметр камеры равен 1,8 м. Вся установка помещается в специальном здании со стенами метровой толщины вокруг

бетатрона для защиты работающих от высоковольтных рентгеновских лучей и электронов. Контроль и наблюдение за работой установки производится из соседнего помещения с помощью перископа и соответствующих приборов. На рис. 13 показана часть сердечника строящегося бетатрона.

Ниже мы приводим таблицу основных параметров всех трёх бетатронов

Таблица

Максимальная энергия электронов в MeV	2,3	20	100
Радиус равновесной орбиты в см	~ 7,5	~ 19	~ 75
Максимальная сила магнитного поля на орбите в эрстедах	1250	3600	4450
Частота питающего тока в герцах	600	180	60
Максимальная напряженность индуцированного электрического поля на орбите в вольтах на сантиметр	~ 0,35	0,77	1,26

¹⁾ В последнее время опубликовано сообщение²³ о предстоящем сооружении в США «послевоенного бетатрона» на 250 MeV.

Продолжение табл. 1.

Максимальный прирост энергии электрона за один оборот в электрон-вольтах	~ 17	92	594
Общая длина пути электрона за время ускорения в километрах	125	417	1250
Вс. электромагнита	~ 150 кг	3,5 т	125 т
Мощность питания электромагнита в киловаттах . .	< 4	26	~ 500
Ёмкость батареи конденсаторов в резонансной цепи питания в микрофарадах	400	5,5	110

МАКСИМАЛЬНАЯ ЭНЕРГИЯ ЭЛЕКТРОНОВ, ДОСТИЖИМАЯ С ПОМОЩЬЮ БЕТАТРОНА

Большой интерес представляют следующие вопросы: возможно ли создание бетатронов, способных генерировать электроны с энергиями, значительно превышающими 100 MeV? Какие трудности возникают при этом и каковы возможные пути их преодоления? Керст был слишком оптимистичен, утверждая, что с помощью бетатрона можно получить электроны сколь угодно большой энергии. В принципе верное, это утверждение ошибочно практически. Мы видели, что по мере возрастания той максимальной энергии электронов, которую должен дать бетатрон, весьма быстро увеличиваются размеры всей установки. От настольного прибора на 2,3 MeV, весившего ~ 150 кг и потреблявшего мощность меньше 4 kW, приходится в случае генерирования электронов в 100 MeV перейти к сооружению установки весом более 125 т, потребляющей около 500 kW мощности. Разумеется, и эти цифры ещё не представляют собой чего-либо неприемлемого. Громоздкость и высокая стоимость такого бетатрона не может считаться существенным недостатком, если учесть, что бетатрон — пока единственный генератор, в котором можно получать рекордно высокие энергии электронов. Такие установки, конечно, будут уникальными; как и современный сверхмощный циклотрон, они будут достоянием крупных научно-исследовательских лабораторий.

Однако, при дальнейшем повышении энергии электронов рост размеров и мощности питания бетатрона приводит уже к серьёзным конструктивным трудностям. Например, при кинетической энергии электронов $K_{\max} = 300$ MeV величина $H\rho$ должна быть равна 10^6 эрст·см (для релятивистских скоростей электронов справедлива простая формула: $K = 300 H\rho$, где K — в eV, H — в эрстедах, ρ — в сантиметрах). Трудно рассчитывать на получение переменных магнитных полей H на линии орбиты, превышающих 5000 эрстед (т. е. магнитных полей в центре орбиты, превышающих примерно 12—15 тысяч эрстед). Следовательно, радиус равновесной орбиты должен быть не менее 200 см ($r_0 = \frac{10^6}{5 \cdot 10^3}$). В соответствии с этим

вес электромагнита бетатрона на 300 MeV должен составлять 2—2,5 тысячи тонн, а мощность питания — около 6000 kW. Для сравнения укажем, что электромагнит единственного в мире циклотрона-гиганта в Беркли (Калифорния), в котором предполагается получить дейтоны с энергиями до 100 MeV, весит 4000 т, при радиусе полюсных наконечников 234 см, и мощность питания его равна 2900 kW.

Очень большим недостатком бетатрона на 300 MeV является и то, что для резонансной схемы питания обмотки электромагнита потребуется колоссальная батарея конденсаторов, общей ёмкостью в 700 μF , способная работать при напряжениях порядка 35 kV.

Размеры собственно бетатрона и общая кубатура всей установки могут быть значительно снижены путём радикального изменения режима её работы. С помощью специального генератора можно получать в соленоиде импульсные магнитные поля до 10^5 эрстед, если ограничиться площадью небольших размеров. Если такое поле использовать для индукционного ускорения электронов, взяв радиус равновесной орбиты равным, положим, 5 см, то мы получим $Hr = 5 \cdot 10^5$ эрстед·см и $K_{\text{max}} \approx 150$ MeV. Правда, процесс ускорения электронов нельзя будет повторять очень часто, т. е. быстро один за другим. Но вместо камеры и электромагнита огромных размеров мы будем в этом случае иметь дело с миниатюрной камерой диаметром в 12—15 см и системой небольших соленоидов (соленоиды для подобного применения должны обладать высокой механической прочностью во избежание разрушения от усилий, возникающих при прохождении через них тока огромной силы). Совершенно отпадает надобность в батарее конденсаторов. Генератором для импульсного питания подобного бетатрона может служить машина того типа, который сконструировал акад. П. Л. Капица для своих исследований магнитных свойств тел в сверхсильных магнитных полях.

Имея в виду мощность, которая потребуется от импульсной машины, необходимо брать по возможности малый радиус равновесной орбиты и соответственно возможно большие значения магнитного поля H . Применение больших магнитных полей наталкивается, однако, на одну трудность, имеющую принципиальный характер. Расчёт показывает, что в этих условиях существенное значение приобретает так называемое радиационное торможение электронов. При движении по окружности, т. е. при наличии центростремительного ускорения, электрон затрачивает часть своей энергии на излучение электромагнитных колебаний. Это обстоятельство приводит к тому, что энергия электрона может повышаться в бетатроне лишь до определённого предела, зависящего от радиуса траектории электрона и от напряжённости магнитного поля на этой траектории.

Затронутый вопрос представляет большой интерес и ещё не обсуждался на страницах журналов. Поэтому мы приведём вкратце основные относящиеся к нему результаты, полученные Л. А. Арцимовичем.

Если не анализировать подробно характера движения электрона в бетатроне при наличии радиационного торможения, то условие окончания процесса ускорения электрона напишется очень просто: скорость электрона в индуцированном электрическом поле перестанет возрастать, когда потеря энергии на 1 см пути дойдёт до величины, равной приросту энергии на 1 см пути, т. е.

$$eE = \Delta W_{\text{радиация}}. \quad (15)$$

Формула для радиационных потерь энергии электрона была получена И. Я. Померанчуком в его работе, касавшейся электронов в космических лучах^{23а}. Эта формула имеет следующий вид:

$$\Delta W_{\text{радиация}} = \frac{2}{3} \rho_0^2 \left(\frac{K}{m_0 c^2} \right)^2 H^2,$$

где $\rho_0 = \frac{e^2}{mc^2} = 2,8 \cdot 10^{-13}$ см (классический радиус электрона), K — кинетическая энергия электрона.

Подставив в условие (15) соответствующие выражения для E и $\Delta W_{\text{радиация}}$, можно получить окончательно следующую формулу:

$$K_{\text{пред}} = 1,3 \cdot 10^{15} \frac{f}{H_{\text{max}}^2}, \quad (16)$$

где $K_{\text{пред}}$ — предельная кинетическая энергия (в eV), которую можно сообщить электрону в бетатроне, H_{max} — амплитудное значение магнитного поля на равновесной орбите, f — частота тока, питающего электромагнит.

Однако, как уже сказано, условие (15) получено без учёта реальных условий движения электрона в бетатроне^{23б}. В действительности наличие радиационного торможения гораздо раньше нарушит рабочий процесс в бетатроне, чем наступит равенство прироста и убыли энергии, записанное в виде уравнения (15). Радиационное торможение приводит к тому, что радиус орбиты электрона в магнитном поле бетатрона не остаётся постоянным: орбита начинает сокращаться, и электрон движется не по окружности, а по свёртывающейся спирали. Условие, определяющее предельную энергию электрона, достижимую в бетатроне, можно получить, задавшись тем наибольшим значением сокращения радиуса орбиты, которое ещё можно допустить в камере данной конструкции. Расчёт показывает, что оптимальные результаты получаются следующим путём: необходимо укорачивать относительную длительность процесса ускорения, уводя электроны с равновесной орбиты раньше того момента, когда магнитное поле достигнет максимума т. е. раньше конца первой четверти периода. Это связано с тем обстоятельством, что прирост энергии электрона (величина eE) делается всё меньше и меньше по мере приближения к указанному моменту, так как напряжённость индуцированного электрического поля E , как показывает

формула (4), при питании электромагнита синусоидальным переменным током с частотой f меняется по закону косинуса:

$$E = \frac{1}{2\pi r_0 c} \frac{d\Phi}{dt} = E_{\max} \cdot \cos 2\pi f t = E_{\max} \cdot \cos 2\pi \frac{t}{T}$$

и, следовательно, при $t = \frac{T}{4}$ она становится равной нулю.

Относительную длительность рабочего такта в бетатроне удобно характеризовать величиной того фазового угла $\varphi = 2\pi \frac{t}{T}$, при котором электроны уводятся с орбиты (т. е. при котором включается расширительная обмотка). Расчёт даёт следующую формулу:

$$\frac{\Delta r}{r_0} = 6,4 \cdot 10^{-16} \frac{K_{\max} H_{\max}^2}{f(1-n)} \frac{\frac{3}{8} \varphi - \frac{1}{4} \sin 2\varphi + \frac{1}{32} \sin 4\varphi}{\sin \varphi}, \quad (17)$$

где Δr — сокращение радиуса равновесной орбиты, обусловленное наличием радиационного торможения электронов, K_{\max} — та кинетическая энергия, которую приобрёл бы электрон, двигаясь по окружности радиуса r_0 в магнитном поле, достигающем до величины H_{\max} , если бы радиационное торможение отсутствовало; n — характеристическое число в законе убывания магнитного поля в области равновесной орбиты [см. формулу (12)].

По конструктивным соображениям трудно допустить относительное изменение радиуса орбиты, превышающее 20%. Приняв $\frac{\Delta r}{r_0} = 0,2$, $f = 50$ Hz, $n = 3/4$ и $K_{\max} = 300$ MeV, можно с помощью формулы (17) получить приводимую ниже табл. 2, в которой $K = K_{\max} \times \sin \varphi$ означает предельную кинетическую энергию электрона, достижимую при соответствующей напряжённости магнитного поля на орбите (H_{\max}).

Таблица 2

H_{\max} в эрстедах . .	$7,1 \cdot 10^4$	$4,1 \cdot 10^4$	$3 \cdot 10^4$	$2,08 \cdot 10^4$	$1,53 \cdot 10^4$	$1 \cdot 10^4$
φ в градусах	23,5	30	37	44,5	53	64
K в MeV	120	150	180	210	240	270
r_0 в сантиметрах . .	14	24,4	33,3	48	65,3	100

Эти цифры показывают, в частности, что при больших магнитных полях габариты камеры, конечно, значительно уменьшаются, но приходится брать малый фазовый угол конца ускорения, и в соответствии с этим довольствоваться конечной энергией электронов, в несколько раз меньшей, чем та, какую можно было бы получить в той же установке при отсутствии потерь энергии на излучение. Эти же цифры показывают, что если не переходить к сверхсильным магнитным полям, т. е. примириться с огромными размерами, которые приобретает «ортодоксальный» бетатрон при желании получить

в нём электроны всё более высоких энергий, то радиационное торможение электронов ещё не представляет собой существенной помехи при таких энергиях, как 300—500 MeV, так что в принципе нет препятствий к сооружению соответствующих установок.

Необходимо остановиться хотя бы вкратце на следующей интересной детали вопроса о роли радиационных потерь энергии в работе бетатрона. Замкнутый в виде окружности виток проволоки, по которому течёт постоянный ток, разумеется, не излучает в пространство никаких электромагнитных колебаний. Почему же совокупность электронов, заполняющих некоторую круговую орбиту и движущихся в одном направлении по этой орбите, будет излучать эти колебания? Оказывается, причина этого заключается в том, что плотность потока электронов на орбите сравнительно столь незначительна, что заметную роль играют флуктуации плотности. Если бы плотность потока электронов была все время одинаковой для всех участков их круговой орбиты, то излучение не имело бы места, так как интерференция колебаний, связанных с электронами, находящимися в диаметрально противоположных точках орбиты, приводила бы к взаимному гашению излучения. Кулоновское взаимное отталкивание электронов является фактором, ведущим к уравниванию плотности потока электронов на орбите, к подавлению флуктуаций этой плотности. Но если электронов в пучке сравнительно мало, то их кулоновским взаимодействием можно пренебречь, и тогда величина флуктуаций даётся законом Пуассона. В этом случае, как показывает произведённый Л. А. Арцимовичем расчёт, N электронов на орбите теряют на излучение энергию $\Delta W = N \cdot \Delta \omega$, где $\Delta \omega$ — радиационная потеря энергии при движении отдельного электрона по той же орбите.

НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ, ВЫПОЛНЕННЫЕ С ПОМОЩЬЮ БЕТАТРОНА

Бетатрон, как инструмент для научных исследований, является ценным дополнением к циклотрону. Последний приспособлен для ускорения тяжёлых частиц, но не пригоден для ускорения электронов. Бетатрон даёт возможность ускорять электроны, причём могут быть получены такие энергии частицы, каких циклотрон дать не может. В бетатроне, разумеется, могут быть ускорены и тяжёлые заряженные частицы, например, протоны, но в соответствии с огромной разницей в массах протона и электрона значительно уменьшается достижимая в данной установке энергия. Например, в бетатроне на 20 MeV, где $H\rho = 6,82 \cdot 10^4$ эрстед·см (см. табл. 1), конечная энергия протонов составляла бы всего $\sim 0,2$ MeV.

Установка, рассчитанная на генерирование электронов с энергией, до 20 MeV, сооружение которой в лабораториях компании «Дженерал Электрик» было закончено во второй половине 1941 г., была затем перевезена на территорию Иллинойского университета, где

и началось использование её для научных исследований. До сих пор опубликованы лишь довольно немногочисленные сообщения о некоторых полученных результатах. Мы вкратце изложим их.

Тормозное рентгеновское излучение, возникающее в мишени бетатрона, имеет непрерывный спектр с верхней границей, равной энергии падающих на мишень электронов. В лаборатории Керста разработано несколько методов управления моментом включения расширительной обмотки бетатрона, т. е. методов изменения конечной энергии электронов, которую они приобретают к моменту удара о мишень. Один из этих методов, позволяющий с большой точностью отрегулировать бетатрон на генерирование электронов с наперёд заданным значением максимальной кинетической энергии, был использован в работе Болдуина и Коха^{24a}, которые определили для ряда элементов так называемый порог реакции фоторазложения ядра. Такая реакция, иначе называемая реакцией типа (γ, n) , заключается в том, что γ -фотон, обладающий достаточной энергией, столкнувшись с ядром атома, вырывает из него нейтрон. Состав образовавшегося нового ядра в большинстве случаев соответствует неустойчивой системе ядерных частиц, т. е. ядро оказывается искусственно радиоактивным. Наличие радиоактивных излучений, установленное с помощью счётчика Гейгера или другого способа, позволяет констатировать тот факт, что имела место реакция (γ, n) . Величина энергетического порога этой реакции, т. е. наименьшая энергия γ -квантов, при которых реакция ещё осуществляется, представляет большой интерес, так как это — мера энергии связи нейтрона в данном ядре.

Сняв кривую активности образца, облучавшегося рентгеновскими лучами от бетатрона, в функции от максимальной энергии рентгеновских квантов (которую, повторяем, в бетатроне можно плавно изменять по желанию), легко определить порог реакции (γ, n) . Болдуин и Кох получили следующие результаты:

Ядро и период полураспада	C_6^{11} (21 мин.)	O_8^{15} (2 мин.)	Fe_{26}^{53} (9 мин.)	Cu_{29}^{62} (10 мин.)	$Mo_{42}^{(91,92)}$ (17 мин.)
Порог реакции (γ, n) , в результате которой образуется данное ядро (в MeV)	18,7—19,5	16,3—16,7	14,1—14,3	10,8—10,9	13,3—13,7

Авторы указывают, что полученные ими цифры верны с точностью до 40 keV. Такие точные измерения порогов реакции (γ, n) — измерения в области столь высоких энергий γ -квантов, как 19—20 MeV, осуществлены впервые, так как только бетатрон предоставил такую возможность. Следует заметить, что приведённые результаты весьма

неожиданны: известно, что энергия связи нейтрона в ядре составляет в среднем 6—8 MeV, цифры же, указанные выше, все значительно превышают эту величину¹⁾.

Другая работа, выполненная с помощью бетатрона, — исследование поглощения жёстких рентгеновских лучей в различных веществах. Теоретический расчёт поглощения таких лучей был дан в ряде работ, но экспериментальная проверка результатов была выполнена (совсем недавно) только для фотонов с энергией, не превышающей 2,5 MeV²⁵.

Теория показывает, что при повышении энергии γ -квантов вступает в действие добавочный механизм их взаимодействия с веществом — так называемое рождение пар электрон — позитрон; эти две частицы получают энергию γ -кванта, сам же γ -квант перестаёт существовать. Рождение пар начинается примерно при энергии фотонов в 1 MeV, и при дальнейшем росте энергии фотонов вероятность такого процесса возрастает. Это приводит к тому, что рост энергии γ -квантов не всегда приводит к возрастанию их проникающей способности: начиная с некоторой оптимальной энергии γ -квантов, дальнейшее повышение их энергии приводит не к снижению, а к увеличению коэффициента поглощения этих лучей в веществе. Предсказания теории были проверены с помощью бетатрона Адамсом и Кларком²⁶. Исследовалось поглощение наиболее жёсткой части спектра тормозного излучения мишени. Детектором прошедших сквозь поглотитель жёстких γ -квантов служило искусственно радиоактивное ядро Si^{62} , образующееся в реакции $\text{Si}^{63}(\gamma, n)\text{Si}^{62}$, порог которой равен, как мы видели, приблизительно 10,8 MeV. В качестве поглотителей исследованы Al, Pb и другие вещества. Получены следующие линейные коэффициенты поглощения τ :

Поглотитель	Be_4	C_6	Al_{13}	Fe_{26}	Pb_{82}
τ (см ⁻¹)	0,0278	0,0292	0,0601	0,234	0,635

С точностью до 10^{-1} эти цифры совпадают с теоретическими значениями, рассчитанными по Гейтлеру. Отдельные измерения показали, кроме того, что для свинца уменьшение проникающей способности γ -лучей начинается при $E_\gamma > 3$ MeV.

Следует заметить, что ход кривой коэффициента поглощения γ -лучей в функции от их энергии существенно зависит от метода измерения интенсивности излучения, прошедшего поглотитель: применяется ли для этого счётчик или ионизационная камера и т. д., это связано с тем, что за поглотителем имеются не только прошедшие сквозь него первичные γ -кванты, но и электроны и вторичные γ -кванты — продукты взаимодействия излучения с веществом.

¹⁾ В более поздней заметке^{24b} те же авторы приводят значения порога ядерного фотоэффекта ещё для пяти ядер; эти цифры лежат в пределах между 9,3 и 11,6 MeV.

Эффект снижения проникающей способности, наступающего при некотором значении энергии γ -квантов, казалось бы, уничтожает надежду на промышленное использование высоковольтных бетатронов для просвечивания металлических деталей такой толщины, какая раньше уже оказывалась недоступной для исследования с помощью рентгеновских лучей. Здесь, однако, следует помнить, что имеются два благоприятных обстоятельства: 1. концентрация всех γ -квантов из мишени бетатрона в узкий пучок, имеющая место при больших энергиях падающих на мишень электронов, и 2. очень высокий к.п.д. образования рентгеновского излучения при этих энергиях: около 65%, энергии электронного пучка, падающего на мишень, превращается в энергию рентгеновских лучей при работе на 20 MeV. В силу этих обстоятельств пучок лучей, выходящий из камеры бетатрона, обладает настолько большой интенсивностью, что даже после очень большого поглощения в толстом слое вещества может остаться ещё вполне достаточно интенсивности, чтобы была возможна рентгеноскопия данного объекта. Строители бетатрона на 100 MeV предполагают использовать его, в частности, для нужд военной промышленности, а именно — для просвечивания самых толстых броневых плит²². Кроме того, имея в своём распоряжении установку, позволяющую генерировать рентгеновские лучи с энергией от 1 до 100 MeV, можно будет установить, до какого предела ещё имеет смысл повышать напряжение в рентгеновских установках, конструируемых для целей дефектоскопии.

Наконец, с помощью бетатрона выполнено исследование в области рентгенотерапии²⁷. Работая с высоковольтными рентгеновскими лучами, с максимальной энергией в 5, 10, 15 и 20 MeV, и используя в качестве модели тканей человеческого тела стопку деревянных пластин, из которых одна имела отверстие со вставленной в него небольшой ионизационной камерой, авторы получили кривые интенсивности ионизирующего действия рентгеновских лучей в функции от глубины, считаемой от фронтальной поверхности модели. Другими словами, были экспериментально определены глубинные дозы облучения. Оказалось, что распределение ионизации при использовании столь жёстких рентгеновских лучей обладает рядом особенностей, весьма благоприятных для глубинной терапии. Максимальная доза получается на глубине 3—4 см, причём она может быть в несколько раз больше, чем доза на поверхности. С ростом энергии рентгеновских квантов максимум ионизации смещается в глубину модели. Авторы указывают, что ещё более ценным средством для глубинной терапии был бы пучок электронов с энергией 25—30 MeV. Ионизация достигала бы максимума на глубине 7—8 см, и разрушительное действие могло бы быть хорошо локализовано внутри тела, так как электроны проникают на определённую глубину (~ 10 см) и не дальше. Однако, жёсткие электроны, в большом количестве вылетающие из камеры бетатрона за счёт рассеяния из электронного пучка и из мишени, не сконцентрированы в пучок, — они летят во

всех направлениях и поэтому не могут быть использованы для практических целей.

Бетатрон является прекрасным источником направленного пучка весьма жёстких рентгеновских квантов, что чрезвычайно удобно и для целей ядерных исследований и для целей рентгеновской дефектоскопии. Однако, и получение управляемого пучка быстрых электронов является столь же актуальной задачей физики. Несомненно, в дальнейшем конструкция бетатронов будет позволять выводить пучок электронов из камеры наружу, так что бетатрон будет не только рентгеновской установкой особого типа, но и источником пучка электронов, обладающих колоссальными энергиями.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ф. Ф. Ланге и В. С. Шпинель, Изв. АН СССР, сер. физ., **4**, № 2, 353, 1940.
2. Н. С. Хлебников, Успехи физич. наук, **22**, 427, 1939.
3. R. Wideröe, Arch. f. Elektrotechnik, **21**, 387, 1928.
4. D. H. Sloan a. W. M. Coates, Phys. Rev., **46**, 539, 1934.
5. G. Isnig, Ark. f. Math., Astron. och Physik, **18**, No 30, H. 4, 45, 1925.
6. J. W. Beams a. H. Trotter, Phys. Rev., **45**, 849, 1934.
7. В. М. Кельман, М. И. Корсунский и Ф. Ф. Ланге, ЖЭТФ, **9**, 944, 1939.
8. E. O. Lawrence a. M. S. Livingston, Phys. Rev., **40**, 19, 1932.
9. В. И. Векслер, ДАН, **43**, 346, 1944. См. также ДАН, **44**, 393, 1944.
10. M. Steenbeck, DRP № 698867, 1940 (заявка 1935 г.); USP, № 2103303, 1937 (заявка 1936 г.).
11. D. W. Kerst, Phys. Rev., **60**, 47, 1941.
12. В. В. Ясинский, ЖЭТФ, **5**, 983, 1935.
13. Я. П. Терлецкий. а) ЖЭТФ, **11**, 96, 1941; б) Journ. Phys. USSR, **9**, № 3, 1945 (в печати).
14. D. W. Kerst a. R. Serber, Phys. Rev., **60**, 53, 1941.
15. J. Slepian, USP № 1645 304, 1927 (заявка 1922 г.).
16. G. Breit, O. Dahl a. M. A. Tuve. См. в статье: L. A. Bauer a. J. A. Fleming, Carnegie Institution of Washington, Year Book № 27, 209, 1928.
17. E. T. S. Walton, Proc. Camb. Phil. Soc., **25**, 469, 1929.
18. R. Rüdenberg u. M. Steenbeck, DRP № 656 378, 1938 (заявка 1933 г.).
19. M. Steenbeck, Naturwiss., **31**, 234, 1943.
20. A. Bouwers, Elektrische Höchstspannungen. J. Springer, 1939, стр. 83.
21. D. W. Kerst, Rev. Sci. Instr., **13**, 387, 1942.
22. H. Asbury, Popular Science, **141**, No 6, 58, 1942.
23. а) И. Я. Померанчук, ЖЭТФ, **9**, 915, 1939; б) Д. Иващенко и И. Померанчук, ДАН, **44**, 343, 1944.
24. G. C. Baldwin a. H. W. Koch, а) Phys. Rev., **63**, 59 (A), 1943; б) Phys. Rev., **63**, 462 (A), 1943.
25. A. A. Petruskas, L. C. Van Atta a. F. E. Myers, Phys. Rev., **63**, 389, 1943.
26. G. D. Adams a. R. K. Clark, Phys. Rev. **63**, 60 (A), 1943.
27. H. W. Koch, D. W. Kerst a. P. Morrison, Radiology, **40**, 120, 1943.
28. (G. M. Aïm y) Sci. News Letter, **45**, 372, 1944.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ШУМА ПРОПЕЛЛЕРА

Е. А. Непомнящий

ВВЕДЕНИЕ

Борьба с шумом представляет собой задачу огромной практической важности и очень часто — серьёзную и трудную научно-техническую проблему. Одной из таких задач является исследование и заглушение шума самолёта.

За прошедшее десятилетие очень интенсивно проводилась научно-исследовательская работа по изучению шумов самолёта, которая привела к выяснению основных свойств издаваемых им звуков. Естественно, что прежде всего надлежало ответить на вопрос: каковы источники шума самолёта, как велико значение каждого из них в общем шуме и какой из них, следовательно, должен быть подвергнут тщательному и систематическому исследованию в первую очередь.

При полном заглушении одного из двух равногромких источников шума общий уровень громкости понизится всего лишь приблизительно на 3 db¹⁾; при разнице в шумности двух источников на 5—10 db менее громкая компонента будет практически полностью замаскирована более громкой.

Эти замечания определяют, очевидно, порядок и требуемую степень заглушения каждого из источников шумов самолёта. Установлено, что этими источниками являются: пропеллер, мотор, несущие поверхности, различного рода стойки, растяжки и т. д.; наиболее громки первые два источника.

Не останавливаясь здесь на свойствах шума мотора самолёта, укажем, что источниками его являются: всасывание, выхлоп, крыльчатка нагнетателя, шестерни редуктора, клапаны и прочие механические элементы, причём в большинстве случаев уровень шума выхлопа мотора сравним с шумом пропеллера.

Имея в виду достигнутые успехи в области применения глушителей шума выхлопа и всё нарастающую шумность пропеллеров, можно утверждать, что исследование шума, производимого пропеллером, представляет в настоящий момент наиболее актуальную проблему в общем комплексе вопросов шумоглушения самолёта.

¹⁾ Грубо говоря, 1 db представляет едва осязаемую на слух разницу в громкости двух звуков.

Настоящая статья знакомит читателя с вопросами звукообразования пропеллера, основными свойствами этого звука и методами его расчёта.

Заметим, что исследованием всех этих вопросов начали заниматься за границей более 20 лет тому назад, но особенно интенсивно работа в этом направлении велась за последние годы. В СССР эти работы были поставлены Н. Н. Андреевым, в лаборатории которого они получили своё развитие.

1. ПРИЧИНЫ ЗВУКООБРАЗОВАНИЯ ПРОПЕЛЛЕРА

По сложности издаваемого звука пропеллер занимает особое место среди известных источников шума. Эта сложность определяется тем, что звукообразование пропеллера может быть связано с самыми различными физическими процессами, происходящими в окружающем его пространстве.

Различные источники шума пропеллера порождают звуки, весьма отличающиеся по своим свойствам, что значительно запутывает общую картину и затрудняет исследование.

Одним из таких источников звука являются периодические возмущения среды лопастями пропеллера. Процесс образования этого звука таков.

Вследствие обтекания воздухом лопасти пропеллера у её поверхности устанавливается некоторое распределение давлений, а именно, с одной (выпуклой) стороны лопасти создаётся уменьшение, а с другой (вогнутой) — увеличение давления по сравнению с атмосферным; разность этих давлений и определяет силу тяги пропеллера. Это распределение давлений несётся вместе с лопастью пропеллера, и если мы представим себе, что на пропеллере помещён микрофон, то последний не воспримет звука, так как по отношению к нему давление неизменно.

Иначе обстоит дело для неподвижного микрофона или уха неподвижного наблюдателя; давление, несомое вращающейся лопастью пропеллера, то приближается, то удаляется от наблюдателя; следовательно, то усиливается, то ослабевает в зависимости от переменного расстояния, т. е. микрофон и ухо воспримут звук. Исключение будет в том случае, если наблюдатель находится на прямой, совпадающей с осью вращения пропеллера: в этом случае расстояние от наблюдателя давления, несомого лопастью пропеллера, остаётся неизменным. Опыт, если только он поставлен в чистых условиях отсутствия каких-либо отражений, отчётливо подтверждает такое заключение.

Тот же процесс образования звука можно представить себе несколько иначе.

Вырежем мысленно в плоскости вращения элемент среды. При каждом прохождении лопасти через этот элемент на него со стороны лопасти будут действовать силы (сила тяги, сила сопротивления вращению),двигающие этот элемент приблизительно перпендикулярно

к плоскости вращения; кроме того, в месте прохождения лопасти конечной толщины воздух будет раздвигаться в обе стороны.

Акустически можно уподобить этот элемент среды некоторому телу, которое одновременно и вибрирует, как твёрдое тело, и пульсирует, периодически раздуваясь и сжимаясь.

Каждый такой элемент воздуха является, таким образом, источником образования акустических колебаний во всём пространстве.

Очевидно, что спектр звука, обусловленного этим периодическим процессом, состоит из синусоидальных звуков, частоты которых кратны основной частоте, равной произведению числа оборотов пропеллера на число его лопастей.

Этот звук принято называть «звуком вращения». Но кроме звука вращения, образование которого возможно и в идеальной жидкости,

в реальной жидкости, вследствие вихреобразования возле лопастей пропеллера, возникает так называемый «вихревой звук».

Впервые раздельное наблюдение звука вращения и вихревого звука было произведено в лаборатории Н. Н. Андреева.

При этом воспользовались весьма простым, но

чрезвычайно остроумным методом: помещали микрофон поблизости от плоскости вращения, недалеко от конца лопасти; в этом положении звук вращения весьма силен по сравнению с вихревым звуком.

На рис. 1 представлен спектр звука вращения, снятый анализатором Родмана. Отдельные пики, расположенные справа от пика, обозначенного цифрой ноль, представляют отдельные гармоники звука вращения; малые нерегулярности на пиках обусловлены следами вихревого звука. Осциллограмма (рис. 2), относящаяся к тому же опыту, также показывает вполне определённую периодичность; и здесь мелкие нерегулярности обусловлены наличием слабого вихревого звука.

Если микрофон расположить по оси вращения пропеллера, то вследствие выше указанной симметрии звук вращения вовсе не будет действовать на микрофон и последний запишет чистый вихревой звук; рис. 3 даёт осциллограмму последнего; нерегулярный характер колебаний в вихревом звуке выступает на ней весьма ярко. В соответствии с этим и спектр вихревого звука, изображённый на рис. 4, имеет вид сплошного спектра, содержащего непрерывное множество различных частот.

В литературе есть указания на возможность появления звука вследствие упругих колебаний лопасти и вала. Однако, ни в одном случае в обычных условиях эксплуатации пропеллера звук от вибраций нами не наблюдался.

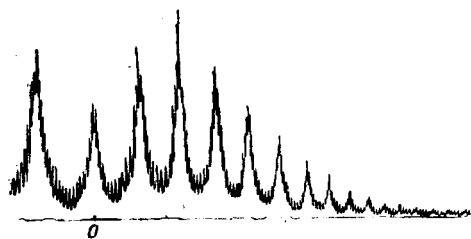


Рис. 1. Спектрограмма звука вращения.

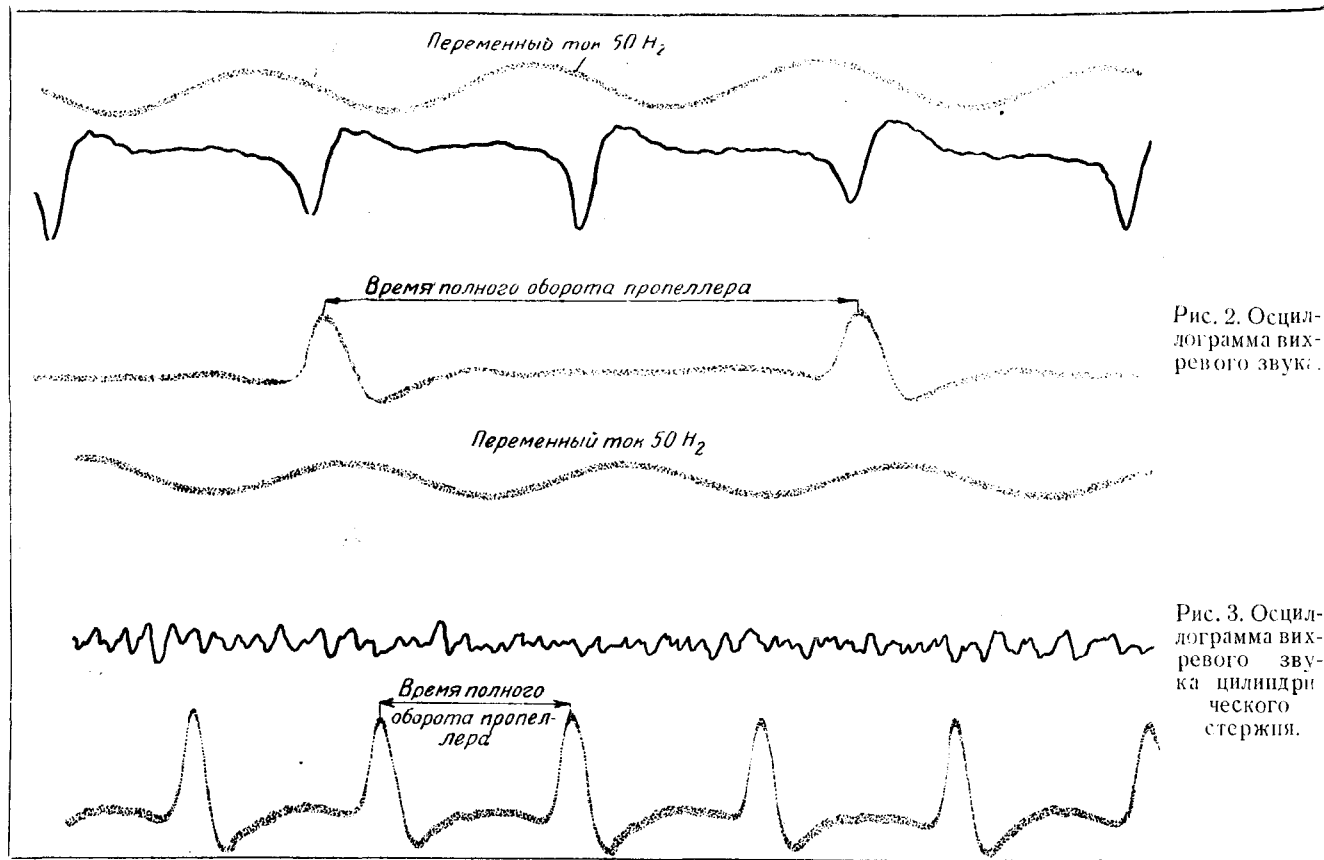


Рис. 2. Осциллограмма вихревого звука.

Рис. 3. Осциллограмма вихревого звука цилиндрического стержня.

В лаборатории Н. Н. Андреева были произведены некоторые работы для выяснения этого вопроса. Была проделана теоретическая работа по установлению возможности возникновения автоколебаний лопасти пропеллера за счёт наличия падающей части в функции зависимости сопротивления вращению от скорости вращения пропеллера. Оказалось, что такого рода колебания возникнуть не могут. Далее были поставлены опыты, при которых искусственно возбуждались довольно большие вибрации лопастей. В этих условиях было обнаружено некоторое повышение шума модели пропеллера, однако, в практической эксплуатации пропеллера эти условия отсутствуют.

Во всяком случае колеблющийся пропеллер представляет собой звуковую антенну порядка выше нулевого. При малых ширинах лопастей по сравнению с



Рис. 4. Спектрограмма вихревого звука пластины.

возможными здесь длинами волн сами условия излучения, как это известно из акустики, будут неблагоприятными. Кроме того, наблюдавшиеся на практике частоты колебаний пропеллера очень низки. Например, Кар-

тер¹⁾ приводит для частот колебаний значения 10—20 Hz, которые лежат ниже звуковых частот, воспринимаемых ухом.

Поэтому звукообразование от колебаний лопасти при решении общей задачи о шуме пропеллера может не рассматриваться, во всяком случае до тех пор, пока не будут изучены и достаточно заглушены главные источники этого шума — звук вращения и вихревой звук.

При сверхзвуковых скоростях движения отдельных элементов лопасти, превышающих местную скорость звука, возможно образование поверхностей сильного разрыва или, как их иначе называют, ударных волн. Процесс образования и распространения этих волн находится в связи с новыми, ещё не изученными акустическими явлениями в пространстве, окружающем пропеллер.

В связи с повышающимися концевыми скоростями пропеллеров, изучение этого источника звука крайне желательно; пока же в шуме современных пропеллеров этот звук отсутствует.

Франкль недавно решил задачу об аэродинамике пропеллера при наличии сверхзвуковых концевых скоростей. Весьма вероятно, что это решение позволит разобраться и в акустических явлениях пропеллеров с такими концевыми скоростями.

Большинство исследований касается изучения звука вращения и вихревого звука, всегда присутствующих в спектре общего шума пропеллера. Ниже будут изложены основные свойства и закономерности этих звуков.

1) Carter, Airscrew blade vibrations, I. A. S., 749, 1937.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ВИХРЕВОГО ЗВУКА

При обтекании твёрдого тела реальной жидкостью можно говорить о некотором «пограничном слое», прилегающем к телу; в этом слое сосредоточено действие вязкости. Стекая с тела, пограничный слой, как говорят, распадается, и при этом образуются вихри; этот процесс происходит довольно нерегулярно. Интенсивность образующихся вихрей зависит от характера обтекания, т. е. от формы лопасти и скорости набегающего потока.

Импульсы, связанные с вихреобразованием, являются источниками звука. На этот факт указал ещё Струхаль¹ при исследовании звуковых колебаний струн. Он обнаружил, что периодический отрыв воздуха и связанное с ним вихреобразование являются причиной возникновения звука, причём частота одного звука связана со скоростью и диаметром струны следующим безразмерным соотношением:

$$\frac{Nd}{V} = \text{const.} = 0,185$$

N — частота звука, d — диаметр струны, V — скорость движения).

Исследованию частот вихреобразования позади круглого цилиндра посвящено очень много работ²⁻¹². В результате этих исследований установлена зависимость безразмерной частоты $\frac{Nd}{V}$ от числа Рейнольдса $Re = \frac{Vd}{\nu}$ (ν — кинематический коэффициент вязкости). Для числа $Re > 1000$ частота $\frac{Nd}{V}$ от Re практически не зависит и равна 0,2.

Тщательному исследованию был подвергнут вопрос о частотах вихреобразования позади гладких пластин; несколько менее исследован тот же вопрос для крылообразных профилей при различных углах атаки¹⁾.

Различные авторы¹¹⁻¹³ предлагают значение универсальной безразмерной частоты $\frac{NL}{V}$, равное от 0,165 до 0,180, справедливое для углов атаки в области $20^\circ < \alpha < 90^\circ$. Здесь $L = b \sin \alpha + \delta \cos \alpha$ (b — ширина пластины, δ — толщина пластины, α — угол атаки).

В области малых углов атаки имеет место сильная зависимость частоты от числа Re , и произведённые измерения ещё не полны. Всё же эти работы значительно облегчают задачу изучения вихревого звука пропеллера. Можно предполагать, что вихревой звук пропеллера обязан своим происхождением совокупному процессу вихреобразования позади его отдельных элементов, находящихся на разных расстояниях от оси вращения. Поэтому-то в отличие от линейчатого спектра, получающегося при вихреобразовании позади тел, обтекае-

¹⁾ Угол атаки — угол между направлением скорости потока и прямой, соединяющей переднюю и заднюю кромки профиля лопасти.

мых плоским потоком жидкости с постоянной скоростью, спектр вихревого звука пропеллера оказывается непрерывным, ибо с известным приближением можно считать, что каждый элемент будет образовывать вихри со своей частотой, соответствующей его скорости и геометрическим особенностям.

Характер спектра будет определяться величинами звукового давления, зависящими от интенсивности вихреобразования для отдельных частотных полос этого спектра.

Впервые исследование вихревого звука было проведено Стоувелом и Демингом¹⁴.

В этой работе наибольший интерес представляют изменения спектров. Объектом исследования Стоувела и Деминга был звук, излучаемый

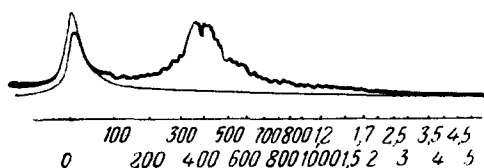


Рис. 5. Спектрограмма вихревого звука.

круглым цилиндрическим стержнем с диаметром ~ 12 мм, длиной ~ 60 см, вращающимся с различными скоростями в пределах 1080—1450 об/мин. Указанные авторы пользовались анализатором NASA; полученные ими спектры непрерывны, с максимумом

интенсивности в некоторой полосе частот. Полагая, что максимальное излучение соответствует концу стержня, Стоувел и Деминг получили совпадение этой частоты с безразмерной зависимостью Струхала $\frac{Nd}{V} = 0,185$.

Более полное исследование этого вопроса было проделано автором¹⁵ в лаборатории Н. Н. Андреева. Здесь были произведены измерения спектров вихревого звука круглых и эллиптических цилиндрических стержней, пластины и модели пропеллера. Приёмником звука служил пьезокварцевый микрофон; анализ производился разработанным в лаборатории анализатором Родмана¹⁶. Характерная для всех изменений спектрограмма приведена на рис. 5. Она относится к круглому цилиндрическому стержню, диаметром 2 см и длиной около 60 см, вращающемуся со скоростью 27 об/сек. Применённая при опытах методика измерений позволила с достаточной точностью производить отсчёт той частоты спектра, на которой интенсивность звука максимальна.

На рис. 6 нанесён график зависимости частоты от числа оборотов n_s для стержней разного диаметра. В результате этих измерений можно считать, что для цилиндрических стержней $\frac{Nd}{V} \approx 0,20$, где

N — частота максимальной интенсивности в спектре, относящаяся к элементу, расположенному на 0,8—1,0 длины стержня.

Точно такой же характер спектра получен при измерениях звука: вращающейся пластины и модели пропеллера. На рис. 7 изображена.

спектрограмма вихревого звука модели пропеллера. На рис. 8 отложены значения безразмерной частоты $\frac{NL}{V}$ для различных углов атаки.

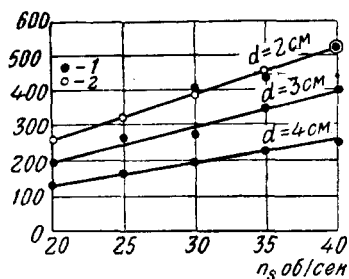


Рис. 6. Зависимость частоты вихревого звука цилиндра от числа оборотов.

1 — круглый цилиндр, 2 — эллиптический цилиндр.

При этом явление относится к некоторому концевому элементу ($R=0,9$,

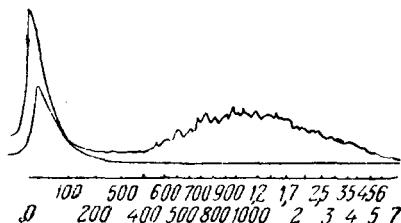


Рис. 7. Спектрограмма вихревого звука модели пропеллера.

R_0 для пропеллера) и за характерный размер принято число

$$L = b \sin \alpha + \delta \cos \alpha.$$

Из графиков видно, что в области больших углов атаки соотношение $\frac{NL}{V} = \text{const.}$ соблюдается для различных углов атаки.

Формула $N = \frac{\text{число } V}{b \sin \alpha + \delta \cos \alpha}$ объясняет большое различие в спектре вихревого звука моделей пропеллеров, осевых вентиляторов, натуральных пропеллеров, работающих на земле и в воздухе.

Для вентилятора, например, наиболее выраженные частоты вихревого звука лежат в области 200—400 Hz. Для пропеллеров, работающих на земле при обычных углах атаки, эти частоты лежат также в области 200—400 Hz. Когда же рассматривается пропеллер на летящем самолёте, частоты вихревого звука будут занимать область 2000—4000 Hz, так как угол атаки данного пропеллера сильно уменьшается в полёте по сравнению с вращением на неподвижном самолёте.

Интересным свойством вихревого звука пропеллера является картина направленности или распределение его вокруг пропеллера.

Стоувел и Деминг исследовали направленные свойства вихревого звука вращающегося цилиндрического стержня. Они установили, что максимум общей интенсивности излучается в направлении оси вращения; в плоскости вращения интенсивность звука спадает до нуля; тогда в этом направлении остаётся только звук вращения.

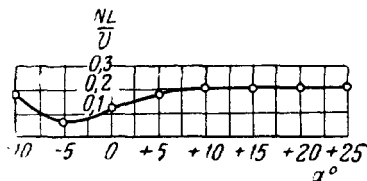


Рис. 8. Зависимость безразмерной частоты $\frac{NL}{V}$ модели пропеллера от угла атаки.

Практически такой же результат был получен Эрнстхаузен¹⁷ для случая излучения от симметрично профилированного стержня, вращающегося с нулевым углом атаки. На рис. 9 изображены характеристики направленности, снятые Эрнстхаузен¹⁷ для различных скоростей вращения в широком диапазоне изменения скорости. В его опытах концевые скорости U доходят до значений, соответствующих натуральным пропеллерам.

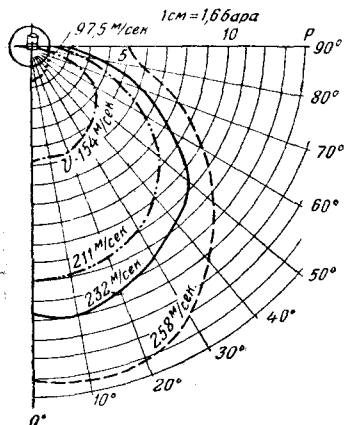


Рис. 9. Характеристики направленности вихревого звука.

были произведены измерения звука модели пропеллера для На рис. 10 представлена зависимость уровня интенсивности от скорости вращения винта, диаметром 0,8 м, при различных углах установки.

Кроме кривых для различных углов установки здесь нанесена кривая $40 \lg V$, соответствующая квадратичной зависимости звукового давления от скорости.

Такая зависимость выведена Н. Н. Андреевым из простых соображений размерности и довольно хорошо оправдывается в разных случаях, в особенности для пропеллера с уровнем шума 90—100 db. То обстоятельство, что кривые для малых углов атаки лежат параллельно кривой $40 \lg V$, свидетельствует о независимости безразмерной величины давления

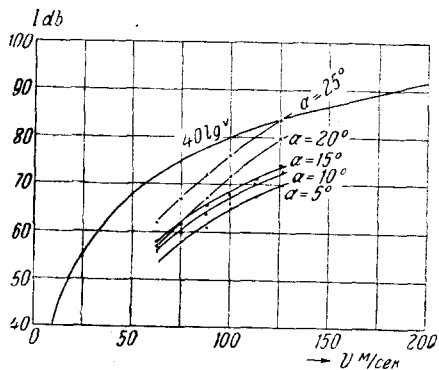


Рис. 10. Зависимость уровня интенсивности вихревого звука модели пропеллера от скорости вращения.

¹⁷ Уровень интенсивности звука $I = 20 \lg \frac{p}{p_0}$, где p — звуковое давление, p_0 — давление на пороге слышимости, принимаемое равным $2,04 \cdot 10^{-4}$ бара (для нормальных значений температуры и давления).

$\frac{P}{\rho V^2}$ от скорости, или числа Эйлера от числа Рейнольдса. При $\frac{P}{\rho V^2}$

больших углах этого не наблюдается. При таких углах уже наступает срыв струй с элементов лопасти, и естественно предположить, что более сильное нарастание интенсивности звука от скорости связано именно с этим интенсивным вихреобразованием. Для проверки этого предположения были сняты те же зависимости для случая вращающихся цилиндрических стержней, являющихся особенно удобным объектом исследования вследствие интенсивного вихреобразования. При этом оказалось, что ход кривой соответствует ходу кривых для больших углов модели пропеллера.

Исследования показали, что уровень интенсивности вихревого звука вблизи пропеллера и звука вращения в тех направлениях прослушивания, где они присутствуют оба, приблизительно одного порядка. В случае пропеллера на летящем самолёте, когда углы атаки очень малы, уровень интенсивности вихревого звука несколько меньше, чем звука вращения. Кроме того, выше указано, что частоты вихревого звука пропеллера на летящем самолёте будут порядка 2000—4000 Hz.

Последнее обстоятельство весьма существенно для оценки роли вихревого звука по сравнению со звуком вращения пропеллера при прослушивании летящего самолёта с земли.

Известно, что атмосфера обладает свойством поглощать звук, причём с возрастанием частоты звука это поглощение увеличивается. Так, например, для нашей оценки можно принять поглощение для звука с частотой 3000 Hz порядка 15—20 db на 1 км для обычных значений относительной влажности воздуха. Если иметь в виду, что звук вращения с частотами 50—200 Hz практически не поглощается атмосферой, то становится ясным преобладающее значение звука вращения в общем шуме пропеллера на больших расстояниях от летящего самолёта. К такому же выводу пришли Стоувел и Деминг¹⁹ при своих весьма интересных исследованиях шума двухлопастного пропеллера. Полученные в результате всех изложенных выше исследований закономерности вихревого звука пропеллера могут быть использованы при рассмотрении вихревых шумов других подобных источников. Сюда могут быть отнесены вихревые шумы вентиляционных установок, всякого рода вращающихся предметов, несущих поверхностей, различных стоек и расчалок на самолёте.

Кстати заметим, что самолётные вихревые шумы при возрастании скоростей полёта будут всё увеличиваться и могут иметь некоторое значение в общем шуме самолёта.

3. СПЕКТР ЗВУКА ВРАЩЕНИЯ ВБЛИЗИ ЛОПАСТИ ПРОПЕЛЛЕРА

Если поместить измеритель звукового давления вблизи лопасти вращающегося пропеллера, то записываемый при его помощи звук будет определяться давлением только близлежащих элементов лопасти.

Записывающими приборами могут быть осциллограф и всякого рода анализаторы. Первый прибор покажет изменение давления со временем; с помощью второго это давление представляется зависимым от частоты, т. е. получается спектрограмма. Для понимания физических процессов, связанных с звукообразованием, желательно прежде всего изучить переменное поле давления вблизи пропеллера.

Первые экспериментальные работы в этом направлении были проделаны, повидимому, японцами Обата, И. Иозиды, У. Иозиды²⁰, которые накопили большое количество осциллограмм звука различного типа моделей винтов. Эти измерения дали ясное представление о характере колебаний давления возле лопасти, которые собственно и являются источниками звука вращения. Дальнейший шаг в исследовании этого вопроса мог быть сделан после теоретической работы Б. П. Константинова, проделанной в 1934 г. в лаборатории Н. Н. Андреева. Здесь был поставлен вопрос о возможности вычисления импульса звука для случая вращающегося круглого цилиндрического стержня с помощью применения известного в аэродинамике метода расчёта давления возле бесконечного круглого цилиндра, движущегося в потенциальном потоке несжимаемой жидкости. Для этого на малых (1—2 диаметра цилиндра) расстояниях от поверхности цилиндра вычислялось распределение давления, представляющего собой, в зависимости от времени, связанного со скоростью вращения элемента стержня, периодически изменяющийся звуковой импульс, который может быть разложен в линейчатый спектр методом Фурье.

Произведённые опыты показали весьма хорошее совпадение с расчётом и формы импульса, и спектра. Позднее Эрнстхаузен¹⁷ вычислил импульс звука для элемента симметрично профилированного стержня. При этом он также вычислял распределение давления возле симметричного профиля, пользуясь плоским потенциальным потоком несжимаемой жидкости.

Для расчёта поля давления профиль заменялся диполем, на который накладывался параллельный поток. Форма рассчитанного импульса оказалась в согласии с опытом. Приближение к реальным профилям было сделано в лаборатории Н. Н. Андреева. Здесь были проделаны систематические вычисления импульсов и спектров звука для винтов с профилями Жуковского²¹. При вычислении давления вносилась поправка Прандтля-Глауэрта на сжимаемость¹⁾. На рис. 11 изображены импульсы для различных расстояний η от элемента ло-

1) Поправка Прандтля-Глауэрта заключается в том, что влияние сжимаемости учитывается соответствующим увеличением толщины профиля, а именно: распределение давления по профилю с толщиной δ в сжимаемой жидкости,

характеризуемой значением числа $B_a = \frac{V}{c}$, соответствует тому же в несжи-

маемой жидкости, но уже для профиля с толщиной $\frac{\delta}{\sqrt{1 - B_a^2}}$.

пасти модели пропеллера. Можно видеть сглаживание импульса при удалении от профиля.

Максимальное разрежение при удалении от профиля изменяется обратно пропорционально расстоянию; это хорошо согласуется с опытом. На больших расстояниях (более диаметра винта) производить расчёт невозможно из-за наличия влияния поля давления соседней лопасти¹⁾.

Разлагая импульс в ряд Фурье, получаем спектр звука, т. е. звуковое давление для каждой из дискретных частот. Оказывается, что на малых от лопасти расстояниях, при удалении от неё, спектр значительно обедняется обертонами.

Кроме этого, были установлены зависимости звукового давления от различных параметров элементов лопасти. Эти зависимости характеризуются следующими цифрами: от увеличения угла атаки на 1° давление увеличивается на 7% , возрастание относительной толщины профиля на 1% (по отношению к хорде) увеличивает давление на 16% . Эти зависимости удовлетворительно подтверждаются экспериментом на моделях. Мы должны здесь напомнить, что все эти результаты относятся к давлению, создаваемому действием отдельного элемента лопасти, а не всего пропеллера.

4. ЗВУКОВОЕ ПОЛЕ ПРОПЕЛЛЕРА

Изучение звукового поля на больших, по сравнению с диаметром, расстояниях от пропеллера представляет наибольший и непосредственный интерес.

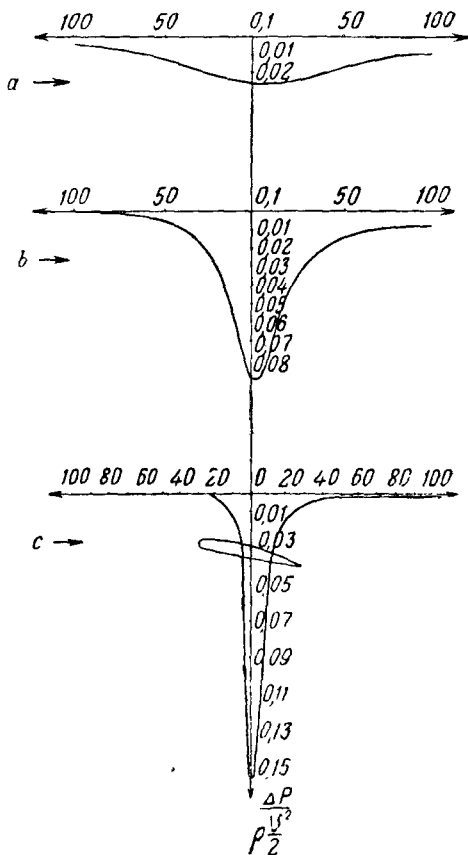


Рис. 11. Импульсы давления на различных расстояниях от элемента лопасти пропеллера.

¹⁾ Это явление известно в литературе как «эффект решётки».

В 1919 г. Линам и Вебб²², исследуя зависимость звука от скорости вращения пропеллера, обнаружили, что звук этого источника обладает направленностью, т. е. распределяется вокруг пропеллера согласно определенным закономерностям, но отнюдь не равномерно, как это может наблюдаться при рассмотрении точечного излучателя.

Для определения характера направленности звука они акустическое воздействие пропеллера отождествили действием совокупности акустических источников и стоков. При этом сила таких источников, распределённых по дискам впереди и позади пропеллера, изменяется периодически с частотой, равной основной частоте звука вращения. Фазовые соотношения источников и стоков определялись вращением пропеллера. Совокупность источников и стоков составляют в данном случае диполи с осями, параллельными оси вращения пропеллера.

В этом случае амплитуда звукового давления пропорциональна выражению, определяющему характер направленности:

$$J_{mz} \left(\frac{3mz \omega R_0}{2c} \sin \vartheta \right) \sin \left(\frac{3mz \omega R_0}{4c} \cos \vartheta \right),$$

где J_{mz} — функция Бесселя первого рода mz -го порядка, m — номер гармоники, z — число лопастей, c — скорость звука, R_0 — радиус пропеллера, ω — частота вращения, ϑ — угол между радиусом-вектором из центра вращения в точку наблюдения и направления полета.

Из этого выражения видно, что характеристика направленности должна быть симметричной относительно плоскости вращения и звуковое давление должно обращаться в нуль в направлениях плоскости вращения ($\vartheta = 90^\circ$). И то, и другое опытом не подтверждается.

Другим предположением Линама и Вебба было представление о пропеллере только как о совокупности источников. В этом случае характеристика направленности определится выражением

$$J_{mz} \left(\frac{3mz \omega R_0}{2c} \sin \vartheta \right).$$

Характеристика направленности будет при этом опять симметричной относительно плоскости вращения. Вычисленные по упомянутым теориям характеристики направленности изображены на рис. 12.

Пэрис²³ скомбинировал обе эти теории, заменив пропеллер совокупностью диполей и источников. После целого ряда весьма искусственных предположений он пришёл для характеристики направленности к выражению

$$J_{mz} \left(\frac{3mz \omega R_0}{2c} \sin \vartheta \right) \{ 2,6 - 2 \sin (6mz \omega R_0 \cos \vartheta) \},$$

которое удовлетворительно описывает полученную им же для основного тона экспериментальную характеристику направленности. Как видно, настоящие теории не дают возможности вычислить абсолютное

значение звукового давления и не устанавливают связи акустических характеристик пропеллера с его аэродинамическими свойствами.

Искусственность предпосылок является также большим недостатком изложенных теорий. Изложение количественных теорий целесообразно начать с более поздней, как полное учитывающей особенности звукообразования пропеллера. Существовавшие ранее теории могут быть получены как частные случаи этой общей теории, которая, однако, не является самостоятельной, а находится в определённой связи с ранее существовавшими.

Эта количественная теория была разработана Е. А. Непомнящим¹⁸ в 1941 г. Основные гипотезы, которые положены в основу расчёта, таковы.

1. Для вычисления звукового поля вокруг пропеллера с достаточной точностью можно воспользоваться линейным волновым уравнением:

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} - c^2 \Delta \varphi = 0, \quad (1)$$

где звуковой потенциал φ связан с давлением и скоростью соотношениями:

$$p = \rho_0 \frac{\partial \varphi}{\partial t}; \quad V = \text{grad } \varphi. \quad (2)$$

В этом случае для m -й гармоники звукового потенциала в некоторой точке пространства M справедливо выражение

$$\varphi_{mM} = -\frac{1}{4\pi} \iint_S (V_n)_S \frac{e^{-jkr}}{r} dS + \frac{1}{4\pi\omega\rho} \iint_S (p)_S \frac{\partial}{\partial n} \left(\frac{e^{-jkr}}{r} \right) dS, \quad (3)$$

позволяющее вычислить φ_{mM} , если будут известны величины нормальных скоростей V_n и давление p на некоторой поверхности S , охватывающей пропеллер на таком расстоянии от него, что вне её можно считать распространение звука совершающимся согласно (1).

В первом приближении за граничную поверхность S принималась поверхность пропеллера.

2. Граничные возмущения V_n и p на поверхности лопастей можно вычислить на основании плоского движения сжимаемой идеальной жидкости или же задавать соответствующие экспериментальные значения.

Выражение (3) показывает, что действие воздушного винта эквивалентно в акустическом отношении совокупному действию источников (первый член) и диполей (второй член), интенсивность и момент которых определяются свойствами пропеллера. Соответственно с этим

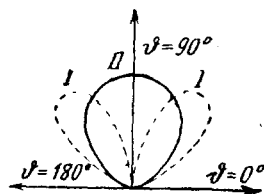


Рис. 12. Характеристики направленности по теории Линама и Вебба.

I — первая теория, II — вторая теория.

разделим суммарное излучение на излучение нулевого порядка (источники — нормальные скорости) и излучение первого порядка (диполи — давление).

Выражению (3) можно придать иной вид:

$$\varphi_{nM} = -\frac{1}{4\pi} \iint_S V_{nm} \frac{e^{-jkr}}{r} dS + \frac{1}{4\pi\omega\rho} \iint_S [dX_n \cos(r, x) + dY_n \cos(r, y) + dZ_n \cos(r, z)] \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{e^{-jkr}}{r} \right), \quad (4)$$

где dX, dY, dZ — компоненты сил давления, действующих со стороны пропеллера на соприкасающийся с ним элемент поверхности среды. Периодически действующие силы и нормальные скорости могут быть представлены в виде:

$$\left. \begin{aligned} dX_m &= -\frac{dQ(R)}{dR} \frac{R}{a} K_{Qn} e^{j m z \omega t - j m z \theta - j \eta_m \sin \theta} dR d\theta, \\ dY_m &= \frac{dQ(R)}{dR} \frac{R}{a} K_{Qn} e^{j m z \omega t - j m z \theta - j \eta_m \cos \theta} dR d\theta, \\ dZ_m &= -\frac{dP(R)}{dR} \frac{R}{a} K_{Pn} e^{j m z \omega t - j m z \theta - j \varepsilon_m} dR d\theta, \\ V_{nm} &= V K_{Vnm} e^{j m z \omega t - j m z \theta - j \chi_m}. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Здесь $Q(R)$ и $P(R)$ — сила сопротивления вращению и сила тяги элемента лопасти на расстоянии R от оси вращения; a — проекция ширины лопасти на плоскость вращения; m — номер гармоники; z — число лопастей; ω — частота вращения пропеллера; θ — полярный угол в плоскости вращения; $V = \sqrt{(\omega R)^2 + V_0^2}$ — полная скорость элемента лопасти (V_0 — скорость полёта самолёта); K_{Qm}, K_{Pm}, K_{Vam} — гармонические коэффициенты, представляющие собой модули разложения в ряд Фурье кривых распределения вдоль проекции a сил $Q(R), P(R)$ и нормальных скоростей V_n ; $\eta_m, \varepsilon_m, \chi_m$ — начальные фазы этих разложений. Период, по которому разлагаются эти граничные импульсы, равен $\frac{2\pi}{z\omega}$.

В результате некоторых вычислений для амплитуды некоторой гармоники звукового давления в точке пространства $M(r_0, \theta)$ получено выражение:

$$\begin{aligned} |\bar{p}_m| &= \frac{mz\bar{U}_c^2}{r_0} \left| \int_{\bar{r}}^1 \left\{ K_{Vnm} \cos \chi_n \sqrt{\bar{V}_0^2 + \bar{R}^2} + \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + j \frac{4K_{Qn} dT(\bar{R})}{\pi^3 a R^2 d\bar{R}} \cos \eta_m - j \frac{4K_{Pm} \bar{U}_c \cos \theta}{\pi^2 a} \times \right. \right. \\ &\quad \left. \left. \times \frac{dP(\bar{R})}{d\bar{R}} \cos \varepsilon_m \right\} \right| J_{mz} (mz \bar{U}_c \bar{R} \sin \theta) \bar{R} d\bar{R}, \quad (6) \end{aligned}$$

где введены относительные величины: $\bar{p}_m = \frac{n_m}{c^2}$, $\bar{U}_c = \frac{\omega R_0}{c}$ — относительная концевая скорость; $\bar{r}_0 = \frac{r_0}{R_0}$ — относительное расстояние до центра пропеллера; $\bar{R} = \frac{R}{R_0}$; $\bar{V} = \frac{V}{\omega R_0} \sqrt{V_0^2 + \bar{R}^2}$, $\bar{p} = \frac{p}{R_0}$ — радиус нерабочей части пропеллера; $\bar{a} = \frac{a}{R_0}$, $dP(\bar{R}) = \frac{dP(\bar{R})}{\rho n_s^2 D_0^4}$, $dT(\bar{R}) = \frac{dT(\bar{R})}{\rho n_s^3 D_0^3}$ — элементарная мощность; n_s — число оборотов в секунду; D_0 — диаметр пропеллера.

Кроме того, здесь J_{mz} — функция Бесселя первого рода, ϑ — угол прослушивания, т. е. угол между радиусом-вектором r_0 из центра вращения в аупункт и направлением полёта самолёта. Формула (6) является расчётной формулой для звукового давления. Её можно значительно упростить, если воспользоваться теоремой о среднем вместо трудоёмкого интегрирования вдоль по радиусу пропеллера.

Тогда выражение для уравнения интенсивности примет вид:

$$I_m = S(mz, \bar{U}_c, \vartheta) + 10 \lg [(0,1785 + 0,1347 \lambda) K_{V_{am}}^2 + (0,3055 \frac{K_{Qm} \cos \eta_m}{za} \beta - 0,4053 \frac{K_{pm} \cos \varepsilon_m \bar{U}_c \cos \vartheta}{za} a)^2] - 20 \lg \bar{r}_\Delta, \quad (7)$$

где $a = \frac{P}{\rho n_s^2 D_0^4}$ — коэффициент тяги; $\beta = \frac{T}{\rho n_s^2 D_0^5}$ — коэффициент мощности; $\lambda = \frac{V_0}{n_s D_0}$ — относительная поступь пропеллера; $\bar{r}_\Delta = \frac{r_0}{R_0} \cdot \frac{1}{\Delta}$ — «приведённое расстояние» ($\Delta = \frac{\rho}{\rho_0}$ — относительная плотность воздуха); $S(mz, \bar{U}_c, \vartheta)$ — «функция излучения», определяющая главную зависимость уровня интенсивности звука от скорости и числа лопастей.

Нужно указать, что формула (7) получена для значения среднего радиуса $\bar{R}_{cp} = 0,65$, которое для больших значений чисел mz должно быть увеличено, соответственно чему изменится и формула (7).

С некоторой степенью точности можно принять следующие значения среднего радиуса для различных чисел: $mz = 2$, $\bar{R}_{cp} = 0,65$; $mz = 3$, $\bar{R}_{cp} = 0,7$; $mz = 4$, $\bar{R}_{cp} = 0,75$; $mz \geq 6$, $\bar{R}_{cp} = 0,8$.

Для большей точности расчёта нужно, конечно, пользоваться формулой (6), так как величина звукового давления очень чувствительна к изменению \bar{R}_{cp} , однако для практических расчётов по оценке шумности пропеллеров с успехом может быть применена формула (7). Производство расчёта значительно облегчено тем, что

составлены графики для функции излучения S и для гармонических коэффициентов, в зависимости от параметров дужки пропеллера.

Прежде чем приступить к дальнейшему изложению закономерностей звука вращения и обсуждению соответствия их с экспериментальными данными, остановимся кратко на теоретических работах, предшествовавших изложенной выше.

В 1936 г. Л. Я. Гутиным²⁴ предложена весьма остроумная и простая теория расчета звукового поля пропеллера, которая явилась первой серьезной попыткой рационального изучения этой проблемы. Автор исходил из следующих предпосылок. Известно, что на каждый элемент пропеллера действуют сила тяги и сила сопротивления вращению. На элемент среды, прилегающей к лопасти пропеллера, действуют периодически возмущающие силы, равные по величине силам тяги и сопротивления вращению и противоположные им по направлению.

При определении звукового поля Гутин пользуется выражением для звукового потенциала от сосредоточенных сил:

$$\varphi = \frac{i}{4\pi\rho kc} \left(X \frac{\partial}{\partial x} + Y \frac{\partial}{\partial y} + Z \frac{\partial}{\partial z} \right) \frac{e^{-jkr}}{r}, \quad (8)$$

где компоненты сил X , Y , Z вычисляются в зависимости от тяги и момента сопротивления. Если точка наблюдения отстоит далеко от плоскости вращения, то получается следующее выражение для амплитуды некоторой гармоники звукового давления:

$$|p_m| = \frac{mz\omega}{2\pi cr_0} \left\{ \left[-P \cos \vartheta + \frac{c}{\omega R_1^2} M \right] J_{mz}(kR_1 \sin \vartheta) \right\}, \quad (9)$$

где P — сила тяги пропеллера; M — момент сопротивления; R_1 — некоторый средний радиус, принимаемый Гутиным равным 0,7 от радиуса винта и зависимым от распределения аэродинамических сил вдоль по лопасти.

Расчеты звукового поля по этой, весьма изящной, формуле дали удовлетворительное совпадение с измерениями Кемпа для основного тона; для второй и более высоких гармоник теория расходится с опытом, причём это расхождение значительно увеличивается с увеличением номера гармоники. Это несоответствие вытекает из несовершенства теории и расчёта.

Расчёт звукового поля проводится здесь по формуле (8), которая представляет только одну часть решения волнового уравнения, а именно, ту часть, которая определяется силами, действующими на среду [сравнить с формулой (4)]. Вторая часть решения, т. е. излучение нулевого порядка, здесь не учитывается. Анализ же излучения нулевого порядка показывает, что учитывать его надо как для основного тона, так и, особенно, для гармоник. Ниже будет ясно показано значение нулевого излучения. Кроме этого несовершенства теории, расчёт высших гармоник страдает неточностью вследствие

произвольности в задании аэродинамических сил по ширине лопасти. В практически встречающихся случаях эти ошибки могут быть уже существенными для первой и второй гармоник. С принципиальной стороны эти недостатки теории Гутина были преодолены в 1937—1938 гг. в лаборатории Н. Н. Андреева²¹.

Однако, громоздкость вычисления и отсутствие в построенной здесь теории прямой связи акустических характеристик пропеллера с его аэродинамическими параметрами не дали возможности использовать эту теорию для практических расчётов. Но, с другой стороны, она сыграла известную роль в создании вышеизложенной теории, в которой пространство, окружающее винт, было разделено на две части: непосредственно прилегающую к пропеллеру и удалённую от него. Вычисление давления и скоростей вблизи пропеллера проводилось согласно уравнениям плоского движения, идеальной несжимаемой жидкости и вносилась поправка Прандтля-Глауэрта на сжимаемость. Вычисленные таким образом источники возмущений на некоторой граничной поверхности служили граничными условиями при решении волнового уравнения для пространства, удалённого от пропеллера. В более точном расчёте граничная поверхность выбиралась на таком расстоянии от плоскости вращения пропеллера, чтобы, с одной стороны, был возможен расчёт по уравнениям плоского движения и, с другой стороны, возмущения на ней были бы малы настолько, чтобы оказались справедливыми линейные акустические уравнения. Расчёт звукового поля привёл к удовлетворительному совпадению с опытом.

Несколько позднее, в 1938 г., Эрнстхаузен и Вильмс²⁵ предложили расчёт звука вращения, основанный на аналогичных предположениях. Они воспользовались полным решением волнового уравнения, т. е. формулой (3). Выразив нормальную скорость через толщину лопасти, а разность давлений через циркуляцию вокруг соответствующих элементов лопасти, они получили следующую формулу для потенциала в некоторой точке пространства:

$$|\varphi_{mm}| = -mz\omega K_m \left[\int_0^R \delta f_1(R) j_{mz} \left(mz \frac{U}{c} \sin \vartheta \right) R dR + \right. \\ \left. + j \frac{2\pi}{mc} \int_0^{R_0} \Gamma \cos \vartheta f_2(R) J_{mz} \left(mz \frac{U}{c} \sin \vartheta \right) R dR \right],$$

где K — коэффициент разложения в ряд Фурье прямоугольного импульса; $f_1(R)$ и $f_2(R)$ — некоторые функции распределения нормальных скоростей и циркуляции вдоль лопасти; δ — толщина лопасти; U — окружная скорость.

Вычисленная по этой формуле характеристика направленности получается симметричной относительно плоскости вращения. Причина этого расхождения теории с экспериментом состоит в допущенных

авторами ошибок, основная из которых заключается в неправильном представлении излучения первого порядка. Совершенно правильно выразив разрыв потенциала через циркуляцию элемента или его подъёмную силу, они не разложили ее на силу тяги и силу сопротивления вращению, а направили её по направлению силы тяги пропеллера. Это обстоятельство и обусловило, главным образом, ошибку как качественную, так и количественную.

В 1938 г. Деминг²⁶ рассмотрел задачу о звуке пропеллера с элементами без подъёмной силы, т. е. задачу о нулевом излучении. Он исходил из соотношения Рейли

$$d^2\varphi = \frac{1}{2\pi} \frac{\partial \varphi}{\partial n} \frac{e^{-jkr}}{z} dS$$

и пришёл к следующему выражению для амплитуды звукового давления

$$|p_m| = \frac{\rho_0 m z H R_0 A_{mz}}{z_0} \Pi K^2 U^2 J_{mz} (k R_0 \sin \vartheta),$$

где H и K — эмпирические коэффициенты, определяемые из эксперимента; Π — некоторая функция от формы и размеров профиля, которую Деминг приближённо полагает равной $\Pi = \frac{a}{b}$ ($a = \frac{z}{2}$ — полутолщина, b — хорда); $A_{mz} = \frac{m z^2 b^2}{4\pi R^2}$ — коэффициент разложения прямоугольного импульса в ряд Фурье.

Экспериментальная проверка этой теории показала хорошее совпадение расчёта с экспериментом для первых трёх гармоник. Для более высоких гармоник Деминг вводит дополнительные эмпирические множители для получения совпадения с экспериментом.

Не лишне будет отметить, что возможность сопоставления теории нулевого излучения с измерениями звука от пропеллера с симметричными профилями затрудняется тем обстоятельством, что этот пропеллер, поглощая мощность на своё вращение в реальной среде, будет создавать ещё звук, обусловленный излучением первого порядка (силы). На это обстоятельство Деминг не обратил внимания.

Позднее Деминг²⁷ сделал попытку усовершенствования теории Гутина, которая свелась к тому, что он, разложив функцию Бесселя в ряд и введя распределение аэродинамических сил вдоль радиуса пропеллера, проинтегрировал выражение для амплитуды звукового давления по радиусу. Полученное при этом различие с теорией Гутина даёт незначительные количественные расхождения, но, конечно, не изменяет расчёта с принципиальной стороны и не устраняет известных недостатков гутинского расчёта. Большой интерес представляют измерения Деминга, произведённые на сопоставления с теорией, которыми мы ниже и воспользуемся с этой же целью.

Деминг производил свои измерения над моделью двухлопастного пропеллера, диаметром 2,9 м, лопасть которого имела в сечениях

профиля *RAF* и была установлена под углом 5° . Замеры делались на расстоянии 25 м от оси пропеллера; при снятии диаграмм направленности поддерживалось постоянное число оборотов $n = 1700$ об/мин. и измерения производились по окружности через 15° . Звук воспринимался электродинамическим микрофоном и после соответствующего усиления записывался автоматическим анализатором тонов. Аппаратура была тщательно градуирована и допускала измерение абсолютных значений звукового давления с точностью до 5% . Условия измерений были специально подобраны. На рис. 13 нанесена полярная диаграмма по измерениям Деминга для одной из трёх

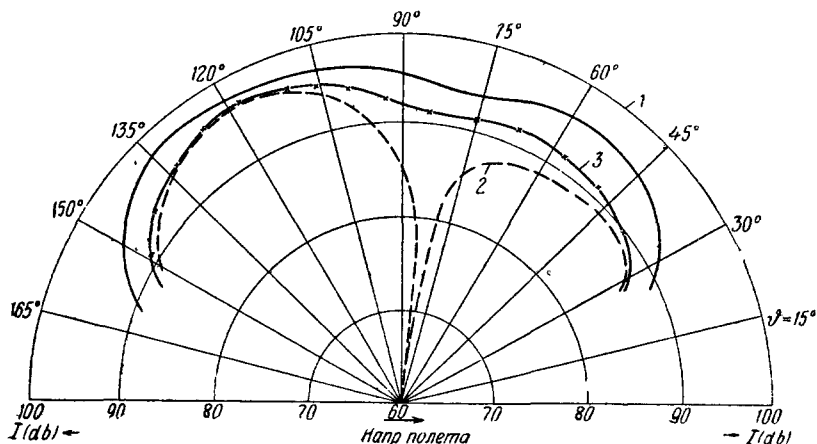


Рис. 13. Поларная диаграмма для основного тона звука вращения.

1 — эксперимент, 2 — теория Гутина, 3 — теория Непомнящего.

гармоник звука вращения (первая гармоника) и соответствующая расчётная кривая, вычисленная по теориям Гутина и Непомнящего, причём звуковое давление пересчитано на уровни интенсивности и отложено в децибалах. Для второй гармоники получается аналогичная кривая; несколько иначе выглядит направленность третьей гармоники (рис. 14).

Рассмотрение этих кривых приводит к заключению, что теория удовлетворительно описывает детали характеристик направленности и даёт хорошее количественное совпадение расчёта с экспериментом, особенно в направлениях максимального излучения звука.

Из этих же кривых следует, что учитывать излучение нулевого порядка необходимо и для основного тона; оно объясняет отсутствие в действительности нулевого значения амплитуды звукового давления в направлениях, отличных от $\vartheta = 0^\circ$ и $\vartheta = 180^\circ$, тогда как по теории Гутина получается побочный спад звука до нуля в направлении $0^\circ < \vartheta < 180^\circ$.

Кроме полярных диаграмм Деминг произвёл измерения звукового давления для четырёх гармоник при различных скоростях вращения.

Интересно сопоставить относительный ход зависимости звукового давления от окружной скорости, получающийся из расчёта и эксперимента.

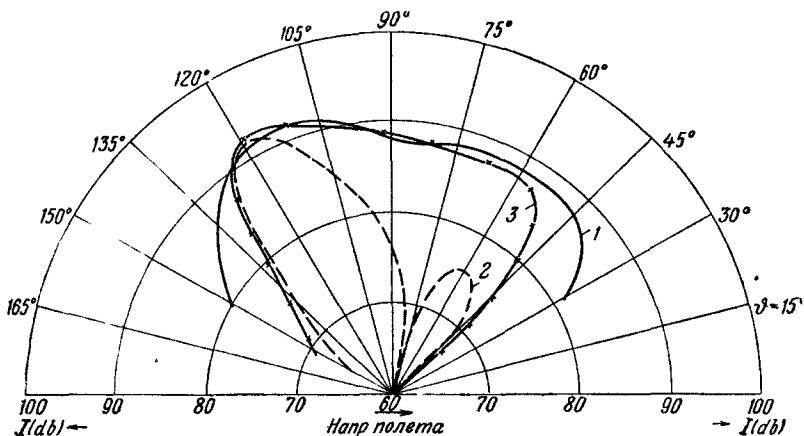


Рис. 14. Полярная диаграмма для второго обертона.
1 — эксперимент, 2 — теория Гутина, 3 — теория Непомнящего.

Выше было указано, что зависимость звука от окружной скорости и числа лопастей определяется функцией излучения $S(mz, \bar{U}_c, \vartheta)$.

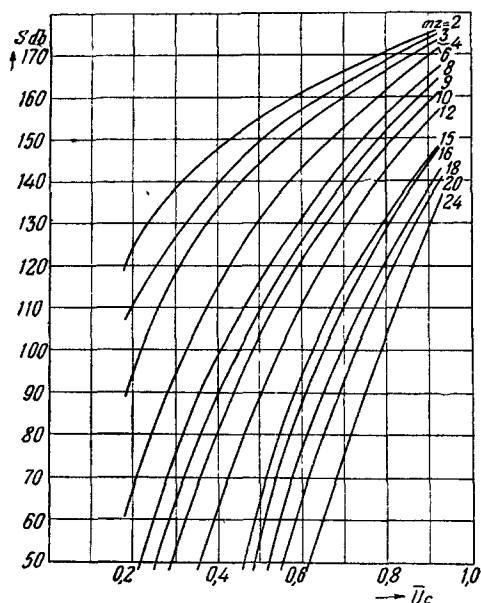


Рис. 15. График функции излучения $S(mz, \bar{U}_c, \vartheta)$ для направления прослушивания $\vartheta=90^\circ$.
Зависимости звука от скорости. Совпадение получается очень хоро-

шо. На рис. 15 для иллюстрации приведена функция излучения S для значения угла прослушивания $\vartheta=90^\circ$ (плоскость вращения).

Из графика видно, что для данного направления ϑ зависимость от окружной скорости различна для различных чисел mz , причём несущественно, за счет чего изменилось mz — из-за числа лопастей или из-за рассмотрения другой гармоники. Деминг измерял различные гармоники спектра под разными углами ϑ . На рис. 16 нанесены экспериментальные зависимости Деминга и соответствующие определённым углам ϑ и числам mz теоретические кривые за-

шее за исключением больших значений скоростей, где экспериментальные кривые идут немного выше теоретических. Это отклонение может быть объяснено влиянием сжимаемости при больших скоростях, которое не учитывается представленными теоретическими кривыми, но, вообще говоря, может быть учтено в данной теории. В области малых скоростей зависимость уровня интенсивности от скорости более сильная, чем при больших скоростях (рис. 16). Поэтому желательно произвести сравнение теории с измерениями при малых скоростях.

На рис. 17 даны экспериментальные зависимости уровня интенсивности от окружной скорости, снятые на моделях двухлопастных пропеллеров при различных углах установки лопастей. Представленные уровни интенсивности могут быть отнесены только к основному тону, т. е. числу $mz=2$ и направлению $\vartheta=90^\circ$. Кривые рис. 17 сняты в лаборатории Н. Н. Андреева на металлической модели, диаметром 0,8 м; имеются аналогичные определения Обата, Кавада, У. Иозиды и И. Иозиды²⁸ на метровой модели пропеллера. На графике отложен отрезок теоретической кривой, который, как это видно, достаточно параллелен экспериментальным кривым; это указывает на совпадение теории с опытом и при малых скоростях вращения.

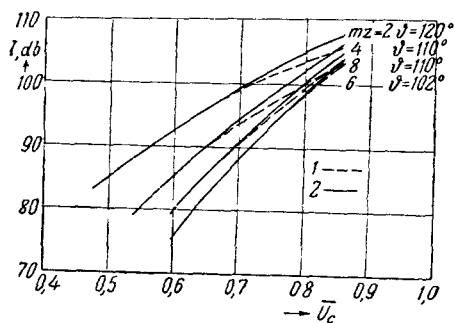


Рис. 16. Зависимость уровня интенсивности звука вращения от окружной концевой скорости для различных чисел mz и углов ϑ .
1 — эксперимент, 2 — теория

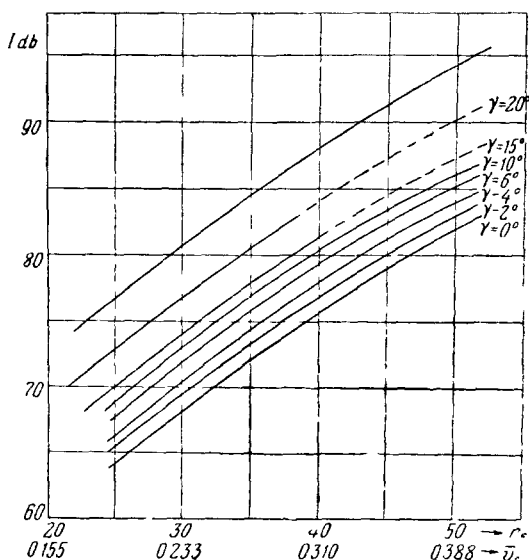


Рис. 17. Зависимость уровня интенсивности звука вращения модели пропеллера от окружной концевой скорости.

Эти сопоставления опытных зависимостей с функциями излучения $S(mz, \bar{U}_c, \vartheta)$ указывают на соответствие теории и опыта по зависимости звука от окружной скорости \bar{U}_c , угла прослушивания ϑ и числа mz . Зависимость интенсивности звука от шага, толщины и ширины лопасти определяется, главным образом, через изменение от этих параметров коэффициентов мощности β и тяги α , которые линейно входят в выражение для звукового давления.

Ширина лопасти, кроме того, оказывает известное влияние на распределение гармоник в спектре. Это влияние проявляется через отношение ширины граничного импульса τ и периода разложения T .

Грубо говоря, для первых гармоник звуковое давление изменяется пропорционально изменению $\frac{\tau}{T}$, т. е. оно возрастает приблизительно пропорционально ширине лопасти.

Вернёмся к кривым рис. 15.

Из них можно сделать весьма любопытный вывод: при малых окружных скоростях в спектре звука преобладает только основной тон; при больших скоростях удельный вес высших гармоник значи-

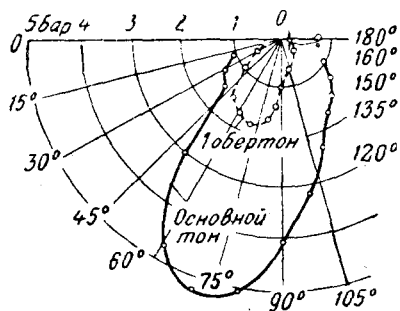


Рис. 18. Характеристика направленности звука четырёхлопастного пропеллера, измеренная с земли при полёте самолёта.

тельно повышается и они могут преобладать в спектре звука пропеллера. Это свойство звука вращения подтверждается всеми известными измерениями. Эрнстхаузен и Вильмс²⁵ подтвердили этот факт своими измерениями звука пропеллера на летящем самолёте. Измерения производились с помощью быстро действующего спектрометра Сименса и Гальске. Были испытаны двух-, трёх-, четырёхлопастные пропеллеры с различными окружными скоростями.

Характеристики направленности снимались при движении самолёта по прямой, причём показатель углов наблюдения был автоматически связан со спектрометром. В дальнейшем нужно было осуществить пересчёт показаний на одинаковое расстояние. Для примера приведём характеристику направленности для четырёхлопастного пропеллера (рис. 18). Скорость вращения авторы не приводят, а характеризуют её как «среднюю». Вероятно, что конечная скорость была порядка 0,8 от скорости звука.

Из рис. 18 видно, что характеристики направленности необычно (для случая работы пропеллера на земле) повернуты в направлении полёта самолёта. Этот спад характеристики направленности можно объяснить некоторым запаздыванием звука относительно момента

фиксирования самолёта с земли и характеризовать углом $\Delta\theta = \frac{V_0}{c}$ (V_0 — скорость полёта).

Для построения истинной картины направленности необходимо, следовательно, вносить эту угловую поправку, которая при обычных скоростях полёта может достигать $15—20^\circ$.

В случае движущегося самолёта необходимо ещё вносить поправку на изменение частоты вследствие эффекта Допплера, которая может достигать $\pm 20—30\%$ для практически интересных случаев.

В заключение можно сказать, что, хотя основные свойства звука пропеллера и его закономерности довольно всесторонне изучены, однако, налицо ещё много важных и интересных вопросов, требующих внимания и теоретиков, и экспериментаторов. К этим вопросам можно, пожалуй, отнести: изучение интенсивности вихревого звука, акустических явлений при сверхзвуковых скоростях отдельных элементов лопасти, более систематическое исследование звука пропеллера на летящем самолёте, вопросы всякого рода интерференции и, конечно, в поле зрения каждого исследования должны лежать вопросы распространения звука в реальной атмосфере.

ЛИТЕРАТУРА

1. Strouhal, Wied. Ann., **5**, 216, 1878.
2. H. Benard, C. R., **147**, 839, 1908; **156**, 1003, 1913; **156**, 1225, 1913.
3. Th. v. Karman u. H. Rubach, Physik. Z., **13**, 49, 1912.
4. Krüger u. A. Lauth, Ann. Physik, **44**, 801, 1914.
5. Krüger, Ann. Physik, **60**, 279, 1919.
6. E. F. Relf, Phil. Mag., **42**, 173, 1921.
7. Richardson, Proc. Phys. Soc., **36**, 153, 1924.
8. A. Thom, Rep. and Mem., p. 1373, 1930.
9. Tyler, Phil. Mag., **11**, 849, 1931; **14**, 990, 1932.
10. C. Camichel a. P. Dupin, J. Rheology, **3**, 4, 1932.
11. Blenk, Fuchs u. Liebers, Luftforschung, **12**, 38, 1935.
12. R. Lehnert, Physik. Z., **13—14**, 476, 1937.
13. A. Fege a F. C. Johansen, Proc. Roy Soc., **116**, 170, 1927.
14. E. Z. Stowell a. A. F. Deming, JSA, **7**, 190, 1936.
15. Е. А. Непомнящий, Журнал технич. физики, **10**, 1800, 1940.
16. М. И. Родман, Журнал технич. физики, **5**, 8, 2, 1935.
17. W. Ernsthausen, Luftforschung, **13**, 1936.
18. Е. А. Непомнящий, Труды ЦИАМ, вып. 39, 1941.
19. E. Z. Stowell a. A. F. Deming, JSA, **7**, 190, 1936.
20. Obata, I. Iosida, U. Iosida, Rep. Aeron. Res. Inst. (Tokyo), № 132, 1935; № 134, 1936.
21. Е. А. Непомнящий, Журнал технич. физики, **9**, 1227, 1939.
22. E. I. Lynam a. H. A. Webb, Aeron. Res. Comm. Rep. a. Met., № 596, 649, 1919.
23. E. T. Paris, Phil. Mag., **15**, 99, 1932.
24. Л. Я. Гутин, Журнал технич. физики, **6**, 899, 1936.
25. W. Ernsthausen u. W. Wilms, Akust. Z., **1**, 20, 1939.
26. A. E. Deming, NACA, Tech. Notes, s. 605, 1937.
27. A. E. Deming, JSA, июль, 1940.
28. Obata, Kawada, I. Iosida, U. Iosida, Rep. Aeron. Res. Inst. (Tokyo), 141, 1936.

ЭЛЕКТРООПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КОЛЛОИДОВ

Э. В. Шпольский

1. Известно, что прозрачные изотропные тела под действием электрического поля становятся двоякопреломляющими с оптической осью, параллельной направлению поля (эффект Керра). Если поэтому поместить исследуемое вещество в плоский конденсатор и пропустить через него пучок света, линейно-поляризованный николем с плоскостью колебаний, составляющей 45° с направлением поля, то выходящий пучок окажется поляризованным эллиптически. Эллиптическая поляризация наблюдается потому, что компоненты с колебаниями, параллельными полю и перпендикулярными к нему, распространяются с различной скоростью; вследствие этого в выходящем пучке обнаруживается разность фаз между этими взаимно-перпендикулярными компонентами:

$$\varphi = 2\pi \frac{(n_p - n_n)l}{\lambda}, \quad (1)$$

где n_p и n_n — показатели преломления обыкновенной и необыкновенной компонент, l — длина пути света и λ — длина волны. Двойное преломление может быть положительным или отрицательным в зависимости от знака разности показателей преломления $n_p - n_n$. Опыт показал, что сдвиг фазы с большой точностью пропорционален квадрату напряжённости электрического поля. Характерной для эффекта является постоянная Керра B , которая определяется электрооптическими свойствами самого вещества

$$B = \frac{n_p - n_n}{\lambda E^2}. \quad (2)$$

Величина этой константы для чистых веществ очень мала. Наибольшую величину она имеет у жидкостей, но и в этом случае её порядок величины $10^{-8} - 10^{-5}$, например:

	$B \cdot 10^7$
Бензол	0,60
Сероуглерод	3,21
Хлороформ	3,46
α -монобромнафталин	10
Нитротолуол	123
Нитробензол	220

В недавнее время выяснилось, что большинство коллоидов и суспензий, а также некоторые белковые соединения обнаруживают огромный электрооптический (а также магнитооптический) эффект. Постоянная Керра в этих случаях превосходит таковую для нитробензола в 10^3 — 10^7 раз. В то время, как для получения сдвига фаз в 2π в случае нитробензола требуются поля, приближающиеся к пробивному напряжению, и очень большие длины пути,—в упомянутых аномальных случаях получаются разности фаз, в несколько раз превосходящие 2π в полях порядка 100 В/см (или в 1000 гаусс для магнитооптического эффекта) и при длине пути всего в немного сантиметров. Из таких аномальных в электрооптическом отношении веществ замечательны коллоидные растворы пятиокси ванадия, растворы белков вируса мозаичной болезни и в особенности коллоидные растворы бентонита² (бентонит — особого рода глина, встречающаяся в большом количестве также и у нас в СССР). Ввиду того что замечательные электрооптические свойства коллоидных растворов и белков представляют выдающийся интерес с самых разнообразных точек зрения, в том числе и с практической, мы изложим в дальнейшем результаты работ в этом направлении, выполненных американским физиком Г. Мюллером в Массачусетском технологическом институте. Результаты этих работ опубликованы пока, главным образом, в виде коротких предварительных сообщений. Однако, метод исследования и применение бентонита для исследования электрических полей описаны полностью.

2. Многие из коллоидов, обнаруживающих аномально высокие значения постоянной Керра, непригодны для практических применений по следующим причинам⁴: а) они недостаточно прозрачны; б) эффект Керра в этих коллоидах обнаруживает насыщение и несмотря на то, что постоянная Керра велика для малых значений поля, максимальное достижимое значение разности фаз оказывается меньшим, чем получаемое даже с нитробензолом; в) благодаря существованию проводимости коллоиды заметно нагреваются уже в слабых полях; это нагревание ведёт к возникновению конвекционных потоков, дающих в свою очередь двойное преломление течения⁵, которое накладывается на электрооптический эффект и искажает его.

Указанные недостатки наименее сказываются в особом образе приготовленных коллоидных растворах бентонита, ввиду чего именно эти растворы и были главным образом использованы Мюллером. Тем не менее и в случае бентонита применение постоянных электрических полей невозможно, так как коллоидные частицы несут электрический заряд, вследствие чего они перемещаются в поле и коагулируют на одном из электродов. Ввиду этого в своих работах Мюллер пользовался переменными полями и совместно с Закманом разработал особую методику исследования эффекта Керра в переменных полях.

Приготовление растворов бентонита и их свойства Мюллер описывает следующим образом: «Водные растворы получаются путём раз-

ведения гелей жёлтого бентонита. Эти гели готовились проф. Д. А. Гаузером и др. Д. С. Ле-Бо. Пригодными оказываются лишь те золи, у которых средний диаметр частиц глины меньше 20 μ . Разведение геля продолжается до тех пор, пока самопроизвольное двойное преломление исчезнет и время релаксации потоков станет меньше 0,01 сек. Это происходит при концентрации около 2% по весу.

Получающаяся желтоватая жидкость прозрачна при толщинах до 10 см . Постоянная Керра для неё при 60-периодном переменном поле составляет около 10 CGSE. Значение насыщения двойного преломления настолько велико, что уже на пути в 1 см сдвиг фаз превосходит 2 π . Насыщение наступает при напряжённостях поля около 150 В/см ; для полей в 100 В/см эффект нагревания становится заметным по истечении около 1 мин. Нагревание не создаёт помех, вследствие того, что для фотографирования достаточно экспозиции в 1 сек. Значение постоянной Керра и величины предельного сдвига фаз меняется в зависимости от величины частиц, концентрации, температуры и частоты электрического поля. При некоторой практике можно научиться легко устанавливать любое подходящее значение постоянной Керра путём увеличения уменьшения концентрации, но большие значения φ могут быть получены лишь при достаточно мелких частицах».

3. Обычный метод, применяемый для изучения эффекта Керра, состоит в том, что возникающий сдвиг фазы φ компенсируется тем или иным компенсатором так, что свет, выходящий из компенсатора, оказывается вновь линейно-поляризованным и может быть погашен анализатором. Сдвиг фазы при этом отсчитывают прямо по показанию компенсатора. В случае переменных полей этот метод, однако, не позволяет найти полную характеристику явления. Если поле меняется по гармоническому закону $E = E_0 \cos \omega t$, то сдвиг фазы, пропорциональный квадрату напряжённости поля, будет

$$\varphi = \varphi_0 \cos^2 \omega t = \frac{1}{2} \varphi_0 (1 + \cos 2\omega t). \quad (3)$$

Таким образом, сдвиг фазы меняется с частотой, вдвое большей частоты поля. Применение соотношения (3), однако, ограничена случаями, когда частота поля такова, что период колебаний $1/\omega$ значительно превосходит так называемое «время релаксаций» частиц, т. е. время, которое требуется частице для того, чтобы перевернуться. Это объясняется тем, что причина эффекта Керра заключается¹ в ориентации под действием поля анизотропных молекул или находящихся в коллоидном растворе взвешенных частиц. Это время зависит от вязкости среды η и радиуса частиц r ; согласно теории Дебая для сферических частиц порядок величины его есть

$$\tau = \frac{8\pi\eta r^3}{kT}.$$

Для водных растворов и для комнатной температуры это даёт

$$\tau \approx 10^3 r^3.$$

Так как частицы бентонита имеют размеры порядка 10^{-5} — 10^{-6} см, то для них $\tau \sim 10^{-12}$ — 10^{-13} сек. Таким образом, при частотах в 100 циклов/сек. соотношение (3) должно быть применимо. Если же наложенное поле имеет высокую частоту, как это нередко бывает при техническом использовании эффекта, то возможны два случая: а) частицы имеют постоянный дипольный момент — в этом случае при достаточно высокой частоте поля частицы не успевают следовать за изменениями поля, и двойного преломления не наблюдается; б) частицы приобретают в поле индуцированный дипольный момент. Именно, в этом случае момент ориентирующей пары пропорционален E^2 , среднее значение этой пары не обращается в нуль при высокой частоте, и возникает некоторое двойное преломление, имеющее, однако, постоянную величину. Можно показать, что в обоих случаях сдвиг фазы выражается следующей общей формулой:

$$\varphi = A + B \cos(2\omega t - \varphi), \quad (4)$$

т. е. состоит из постоянной части, вообще говоря, зависящей от E_0 и ω , и переменной части, амплитуда которой B также зависит от E_0 и ω . Кроме того, изменение фазы φ отстаёт от изменения поля на угол φ , также зависящий от E_0 и ω . Эта формула описывает эффект в обоих вышеуказанных случаях. Для низких частот $A=B$, $\varphi=0$ и (4) переходит в (3); в случае частиц с постоянным дипольным моментом при высоких частотах $A=B=0$ и $\varphi=\pi$. Для неполярных частиц при высоких частотах $B=0$, A не зависит от ω и φ приближается к $\pi/2$.

Мюллер и Закман³ показали применимость формулы (4) в случае коллоидного раствора и одного из вирусов мозаичной болезни следующим опытом. Керровская ячейка, содержащая коллоид, располагалась между скрещёнными поляроидами и освещалась монохроматическим светом ртутной лампы, горевшей при 60 периодах. Для ячейки было использовано переменное поле с частотой, в небольшое число раз превосходившей 60 циклов, и напряжённостью, достаточной, чтобы вызвать смещение фазы в $\pi/2$. Свет, прошедший через ячейку и анализатор, попадал на фотозапись; фототок усиливался и записывался при помощи катодного осциллографа. Образцы такой записи приведены на рис. 1. Основная кривая типа $\sin^2 x$ соответствует 60-периодному изменению интенсивности ртутной лампы; налагающаяся на неё «рябь» обусловлена эффектом Керра. Частота этой ряби вдвое превосходит частоту поля; её амплитуда убывает с увеличением частоты поля и всегда меньше амплитуды основной кривой $\sin^2 x$. Последнее показывает, что $B < A$.

При некоторой критической частоте рябь исчезает и не появляется вновь при значительно более высоких частотах. Из этого сле-

дует, что, начиная с этой критической частоты, переменная часть смещения фазы обращается в нуль, т. е. в формуле (4) $B = 0$, и остаётся только постоянная часть. Эту постоянную часть можно точно измерить обычным путём при помощи компенсатора.

Если, однако, пользоваться компенсатором при частотах ниже критической, то показания его дадут только среднюю величину смещения фазы. Поэтому обычный метод непригоден для исследования эффекта Керра в переменных полях, так как для полной характеристики явления необходимо найти три параметра A , B и ϕ , которые не могут быть определены из одного отсчёта компенсатора.

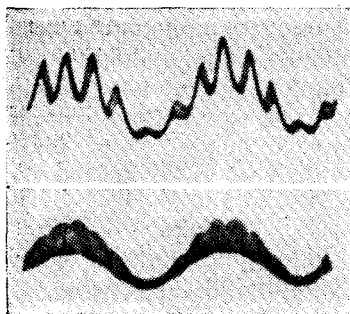


Рис. 1.

4. Анализ визуальных измерений эффекта Керра при помощи компенсатора приводит к следующим результатам. Если между николями, скрещенными под углом в 45° к направлению поля, ввести кроме ячейки Керра ещё и компенсатор, то

средняя интенсивность света, пропускаемого такой системой, равна

$$\bar{I} = \frac{1}{2} I_0 [1 - J_0(B) \cos(kx + A)] \quad (5)$$

где I_0 — интенсивность, пропускаемая параллельными николями при отсутствии поля в ячейке, A и B — постоянные, входящие в формулу (4) для сдвига фазы, J_0 — бесселева функция нулевого порядка, x — смещение клиньев компенсатора, k — калибровочная константа компенсатора. Бесселева функция $J_0(B)$ при малых значениях аргумента, т. е. B , имеет значения, близкие к единице, и формула (5) в этом случае принимает вид

$$\bar{I} \approx \frac{1}{2} I_0 [1 - \cos(kx + A)] \quad (5')$$

Малые значения B получаются всегда при высоких частотах поля, а при низких частотах — в полях слабой напряжённости. При соблюдении этих условий, согласно формуле (5'), должна получиться система минимумов, соответствующих условию

$$kx_n + A = 2\pi n.$$

Отсюда можно определить величину и знак постоянной части смещения фазы A . Однако, амплитуда переменной части B и разность фаз ϕ в формуле (4) не могут быть определены из визуальных наблюдений. Кроме того, и определение постоянной части A становится неточным, когда B достаточно велико.

5. Для определения всех трёх параметров A , B и ϕ Мюллер и Закман разработали удобный фотоэлектрический метод. Сущность этого метода состоит в следующем. Интенсивность света, прошедшего через скрещенные николи и ячейку Керра, равна

$$I = I_0 \sin^2 \varphi = I_0 \sin^2 [A + B \cos (2\omega t - \phi)]. \quad (6)$$

Если этот свет падает на фотоэлемент с линейной характеристикой, то сила фототока выражается аналогичной формулой

$$i = i_0 \sin^2 [A + B \cos (2\omega t - \phi)]. \quad (6')$$

Задача состоит в том, чтобы определить A , B и ϕ , используя форму кривой этого фототока. При этом, однако, возникает следующее затруднение. В коллоидном растворе бентонита постоянная часть смещения фазы A легко может быть сделана равной от $5 \cdot 2\pi$ до $7 \cdot 2\pi$, но вместе с тем, при частоте поля в 60 циклов/сек., имеет большую величину также и B . Если же A и B одновременно велики, то кривая тока становится очень сложной, как это видно из рис. 2, где приведено несколько примеров осциллографической записи фототока.

Дело сильно упрощается, если выбрать такие условия, чтобы A и B были меньше $1/2\pi$. В этом случае правую часть равенства (6) можно разложить в степенной ряд и оставить только первые члены разложения. Это даёт

$$i = i_0 \left[\sin^2 \frac{1}{2} A + \frac{1}{2} B \sin A \cos (2\omega t - \phi) \right]. \quad (7)$$

Формула (7) показывает, что фототок состоит из постоянной части:

$$i_1 = i_0 \sin^2 \frac{1}{2} A$$

и переменной части

$$i_2 = \frac{1}{2} B \sin A \cos (2\omega t - \phi)$$

с амплитудой, равной $\frac{1}{2} B \sin A$. Частота переменной части фототока вдвое больше частоты приложенного поля, а её фаза совпадает с фазой переменной части смещения фазы в эффекте Керра. Постоянную и

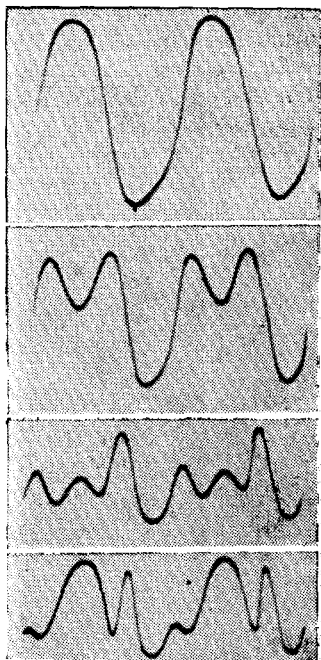


Рис. 2.

переменную части фототока легко измерить отдельно. Именно, если измерять фототок гальванометром, то он будет давать отклонение, пропорциональное постоянной части, а если воспользоваться усилителем переменного тока, то постоянная часть будет задержана конденсатором, а переменная — усилена. Таким путём, зная i_1 и i_2 , можно вычислить A и B .

Осуществить условие, необходимое для указанного разделения (A и $B < \pi/2$), можно просто уменьшив соответственным образом длину керровской ячейки.

Описанный метод позволяет найти также и разность фаз ϕ . Для этого достаточно соединить горизонтальные отклоняющие пластины катодного осциллографа с электродами ячейки Керра, а вертикальные — с усилителем фототока. В результате на экране получится фигура Лиссажу, соответствующая сложению взаимно перпендикулярных колебаний $E \cos \omega t$ и $i_2 \cos (2\omega t - \phi)$. Эта фигура имеет вид, напоминающий букву U , когда $\phi = 0$, и кривую ∞ , когда $\phi = 90^\circ$. На рис. 3 представлена фигура Лиссажу для промежуточного значения разности фаз; величина ϕ определяется по положению точки пересечения на вертикальной оси.

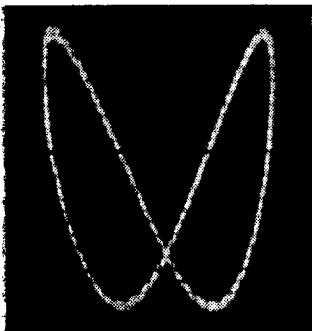


Рис. 3.

6. Большие значения постоянной Керра в случае коллоидных растворов и белков могут быть с удобством применены для изучения электрических полей с помощью электрооптического эффекта. В принципе метод основан на следующих соображениях. Сдвиг фазы при эффекте Керра при прочих одинаковых условиях однозначно определяется напряжённостью поля E

$$\varphi = 2\pi l B E^2, \quad (8)$$

где l — длина пути луча в жидкости. Поэтому, определив в каждой точке φ и направление оптической оси, можно найти величину и направление поля в этой точке. В случае коллоидных растворов, как было указано, легко может быть получено смещение фазы, в несколько раз превышающее 2π , ввиду чего этот метод оказывается практически осуществимым.

Пусть поле образует угол θ с плоскостью колебаний луча, пропущенного поляризатором; тогда интенсивность света, после прохождения через систему поляризатор — ячейка Керра — анализатор, будет ⁷

$$I = \sin^2 2\theta \sin^2 \frac{1}{2} \varphi,$$

где φ — сдвиг фазы вследствие электрооптического эффекта. Из этой формулы следует прежде всего, что во всех точках поля, где $\theta = 0^\circ$ или 90° , $i = 0$. Итак, в случае неоднородного поля должна получиться система тёмных линий, представляющих собой геометрические места точек, в которых направление поля совпадает с направлением поляризатора или анализатора. Эти тёмные линии Мюллер называет «изоклиническими», или «линиями равного наклона». Очевидно, что на них не влияет величина напряжённости поля. Поэтому они имеют второстепенный интерес и от них обычно освобождаются методом, указываемым ниже.

Другая система тёмных линий соответствует значениям сдвига фазы φ , равным 2π или кратным 2π . В соответствии с формулой

$$\varphi = 2\pi l B E^2$$

такие значения сдвига фазы при постоянной длине конденсатора получаются для определённых «критических» значений напряжённости поля E_1, E_2, \dots . Для коллоидных растворов соотношение (8) оказалось неприменимым; для них имеет место несколько более сложное соотношение

$$\varphi = 2\pi B f(E^2), \quad (9)$$

причём вид функции f различен для разных коллоидов. Тем не менее и в этом случае существуют критические значения напряжённости поля, при которых $\varphi = k \cdot 2\pi$. Эти значения, однако, неодинаковы для разных длин волн, ввиду чего получающиеся линии окрашены. Эти линии Мюллер назвал «изохроматическими», или «изодинамическими». При их помощи можно определять напряжённость поля в любой точке следующим образом. Если изменить потенциал электродов в определённое число раз, то во столько же раз изменится напряжённость поля в любой точке. Изохроматические линии при этом будут смещаться. Проследив за этими изменениями под влиянием определённых изменений потенциала, можно сопоставить различным изохроматическим линиям соответствующие им значения E_i .

Для того, чтобы убрать изоклинические линии и оставить только изохроматические, удобно воспользоваться тем, что положение изохромат не зависит от положения скрещённых николей. Но так как при повороте скрещённых николей изоклинические линии соответственно смещаются, то, заставив николи достаточно быстро вращаться, можно убрать изоклинические линии. Ещё проще можно осуществить это с помощью «кругового поляризатора», т. е. системы: поляризатор — пластинка $\frac{1}{4}\lambda$ — ячейка Керра — пластинка $\frac{1}{4}\lambda$ — анализатор. Для этой системы интенсивность пропущенного света пропорциональна $\sin^2 \frac{1}{2} \varphi$, и наблюдаются только изохроматические линии.

Если картина распределения изохроматических линий, совпадающая с картиной распределения линий равной напряжённости поля, фотографуется при длительной экспозиции, то можно получить доста-

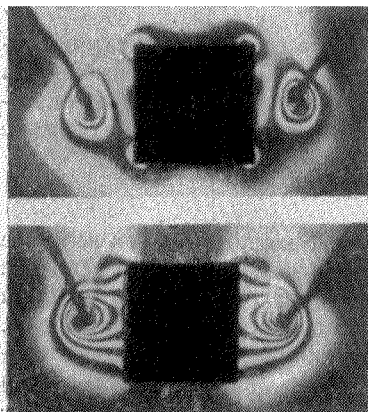
точную резкость, не прибегая к стробоскопическому освещению. Согласно формуле (5), средняя интенсивность, пропущенная системой в присутствии компенсатора, равна

$$\bar{I} = \frac{1}{2} I_0 [1 - J_0(B) \cos(kx + A)].$$

Если компенсатор отсутствует, то эта формула принимает вид

$$\bar{I} = \frac{1}{2} I_0 [1 - J_0(B) \cos A].$$

При достаточно высокой частоте поля B очень мало и $J_0(B) \approx 1$; поэтому для определённых значений A получаются резкие минимумы.



На рис. 4 приведены фотографии поля между двумя параллельными цилиндрами при частоте поля в 10 000 циклов/сек⁻¹. Как видно, картина поля имеет совершенно достаточную резкость.

Метод этот может быть превращён в количественный. На том же примере поля между двумя параллельными цилиндрами Мюллер показал, что по виду изохромат можно определить значение напряжённости поля в средней точке между цилиндрами с точностью до 1%. За деталями мы отсылаем к оригинальной работе⁴.

Рис. 4.

Заслуживает внимания исключительная простота экспериментальных средств, с которыми можно

производить такие исследования поля. Вот как описывает постановку опыта Мюллер: «В наших опытах ячейкой Керра служила стеклянная банка с параллельными окнами размером 6 × 6 см. Electroды представляли собой никелевые стержни около 5 мм диаметром и длиной 50 мм. Они удерживались параллельно друг другу при помощи двух пластинок из люцита. Переменное напряжение подавалось по двум проводам с резиновой изоляцией. Поляризатором и анализатором служили две пластинки поляроида. В качестве источника света применялась ртутная лампа, работавшая на переменном токе. Для наблюдений в монохроматическом свете мы пользовались зелёным светофильтром. При помощи линзы световой пучок делался параллельным, вторая линза фокусировала прошедший свет на объективе фотографической камеры. Экспозиция при применявшейся нами плёнке (Агфа-Суперпан) составляла 1 сек.».

Следует думать, что открытые недавно замечательные электрооптические свойства коллоидов найдут себе разнообразные практи-

ческие применения, тем более, что различного рода недостатки, с которыми связано их применение (нагревание вследствие проводимости и т. п.), могут быть значительно смягчены.

ЛИТЕРАТУРА

1. Обзор старых работ и теория см.
R. Ladenburg, Die elektrische Doppelbrechung. Müller-Pouillet, Lehrbuch der Physik, II Aufl. B. II, 2, p. 2214, Braunschweig, 1929.
 2. J. Errera, Overbeck et Sack, J. de Chimie Physique, **32**, 681, 1935.
 3. H. Mueller and B. Sackmann, Journ. Optical Soc. Am., **32**, 309, 1942.
 4. H. Mueller, Journ. Optical Soc. Am; **31**, 286, 1941.
 5. См., например, Губанов, Успехи физич. наук, XXI, 1939.
 6. П. Дебай, Полярные молекулы. Перев. Н. К. Шолро, М., 1931, стр. 119.
 7. См., например, G. Guhat, Cours d'Optique, p. 429, Masson & Cie Éditeurs, Paris, 1931.
-

ТВОРЧЕСКАЯ РАБОТА ГОСУДАРСТВЕННОГО ОПТИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА

(К 25-ЛЕТИЮ ОСНОВАНИЯ ГОИ)

С. И. Вавилов

Оптический институт был задуман и действительно развивался как научный центр особого характера, не укладывающийся в привычные классификационные рамки. Его нельзя назвать физическим или химическим учреждением, не соответствует он и принятому представлению о техническом, отраслевом институте.

Постепенно изменяясь, он приспособился к реальной и очень сложной совокупности, в которой осуществилась оптика, в широком смысле в слова, в наше время. В программе Института соединились самые общие вопросы учения о свете с бесчисленными задачами разных отраслей промышленности и прежде всего оптико-механической, военного дела и техники вообще. Важное место заняло оптическое стеклоделие и точная оптическая обработка металлов, повлёкшие за собой широкие принципиальные проблемы стеклообразного состояния вещества и другие физико-химические вопросы.

Вопреки многим скептическим и даже мрачным предсказаниям по поводу осуществимости такого разнообразия в одном месте, ГОИ практикой своих 25 лет доказал жизнённость своего круга деятельности и даже его необходимость.

Ещё в 1919 г., на первом годовом собрании Института, Д. С. Рождественский в своей речи назвал ГОИ учреждением нового типа, в котором неразрывно связались научные и технические задачи. «Тесное сотрудничество технических и чисто научных отделов Института, говорил он, открывает как для техники, так и для самого отвлечённого научного эксперимента такие возможности, о которых нам, университетским работникам, не приходилось и мечтать. В экспериментальной оптической мастерской, в вычислительном бюро, в механической мастерской мы в настоящее время имеем научных работников, которые во всеоружии знания ведут к усовершенствованию технических инструментов, к анализу методов производства. С другой стороны, эти же технические органы нам дают приборы высокого совершенства для научных изысканий. Работа всех сотрудников вместе — мастера и учёного — составляет одно органическое целое; оторвать ту или другую часть, науку или технику, значит омертвить «обе». Эту схему, изложенную 24 года назад в качестве программы,

имеем мы в ГОИ и теперь, но уже как практику, проверенную двадцатипятилетней действительной продукцией.

При таком характере Института нелёгкое дело отделить, хотя бы в изложении, теоретическую его деятельность от прикладной или технической. Самое понятие теории должно при этом применяться в сложном и многоярусном виде. Говоря о теории в Оптическом институте, приходится сопоставлять теорию атома и света, скажем с теорией полировального станка или фотографического проявления. Это неизбежно, так как при научном подходе к вопросу любой факт, прибор или операция могут и должны иметь свою «теорию», т. е. анализ или расчёт на основании более простых и общих понятий или закономерностей. Этим наука отличается от простого набора фактов и случайных находок.

С этой точки зрения теоретическая работа ГОИ за 25 лет была очень большой. Лаборатории Института всегда стремились подойти к любой получаемой им задаче с теоретической точки зрения. Так возникала теория объективов, процессов полировки, окраски металлов, «просветления» оптики, светопрочности окраски и очень многого другого. Иногда, и к сожалению не всегда, эта обширная теоретическая работа Института получала свое выражение в специальных монографиях. Таковы книги А. И. Тудоровского «Теория оптических приборов», А. А. Гершуна «Световое поле», «Принципы и приёмы светомаскировки», Г. Г. Слюсарева «Методы расчёта оптических систем», И. В. Гребенщикова (редакция) «Просветление оптики», Д. Д. МаксUTOва «Теневые методы испытания оптических систем», А. Н. Захарьевского «Короткобазные оптические дальномеры», К. В. Никольского «Теория молекул» и пр.

В дальнейшем даётся несколько примеров теоретической деятельности Института, относящихся, так сказать, к разным ярусам, к весьма различным степеням широты. Эти примеры не имеют никакой претензии изобразить всю теоретическую работу ГОИ. Назначение их — пояснить на примерах характер теоретических направлений в Институте, а также их специфическую связанность с прикладными и техническими задачами в ряде случаев.

1. СТРОЕНИЕ ВЕЩЕСТВА И ВОЗНИКНОВЕНИЕ СВЕТА

Война 1914—1918 гг. явилась плотной, на несколько лет задержавшей рост новой физики, т. е. учение о строении вещества, теорию относительности и теорию квантов. После того, как эта плотина была сломлена, началось изумительное развитие физики; свидетелями его были мы все; оно продолжается и по сей день, и следствия его для теории и практики неисчислимы.

Все три переисчисленные направления непосредственно касались кардинальных сторон учения о свете; в частности, вопросы строения вещества были в то же время проблемой возникновения света, проблемой спектров. Не удивительно поэтому, что молодой Оптический

Институт с самого начала в качестве одной из научных целей имел «исследование атома на почве спектрального анализа»¹⁾, и в течение всех 25 лет эта задача не сходила с плана Института, приняв только более общую форму исследования строения вещества методами спектрального анализа. Четверть века — обычно достаточный срок в современной науке, чтобы выяснить ценность научного результата, и сейчас можно с полной объективностью сделать суждение о значении по крайней мере части работ ГОИ для развития учения о строении вещества.

Нужна должная историческая перспектива для правильной оценки первой большой теоретической работы Д. С. Рождественского «Спектральный анализ и строение атомов», содержащей вдохновенный эскиз теории строения простейших атомов на основе первых вариантов теории Бора и Зоммерфельда. Это исследование создавалось в условиях блокады и изоляции советской науки и в той стадии развития наших теоретических представлений, когда у каждого физика имелаась полная уверенность в адекватности механических атомных модельных представлений действительности. Идеи Д. С. Рождественского о необходимости, в случае сложных атомов, всегда иметь в виду их сравнение с водородными термами, о роли магнитных сил в атомной модели и многие другие имели большое эвристическое значение, хотя и получили иную интерпретацию в современной теории атома. Д. С. Рождественский это отчётливо предвидел, когда в 1919 г. писал: «Метод квантования — слепой метод. Он не может нас удовлетворить окончательно. Но нужно держать в уме две вещи. Во-первых, необходимо и выгодно работать с теорией, которая непрерывно ведёт к новым результатам. Во-вторых, если теория и изменится, т. е. процесс квантования выяснится, то все охваченные ею факты во всей их связи, во всей совокупности, будут перенесены на новую почву. Работа объединения не только не пропадает даром, но результаты её сразу осветятся новым светом и станут ещё более ясными и плодотворными, чем теперь». В этом смысле вся серия теоретических работ Д. С. Рождественского, посвящённая строению атомов, — замечательный исторический этап.

От дореволюционной работы Д. С. Рождественского ГОИ получил его интерференционный метод количественного изучения аномальной дисперсии в парах, так называемый метод «крюков». С поразительной точностью этот метод позволяет определять интенсивности линий поглощения и излучения атомов, т. е. на языке теории квантов — вероятности квантовых энергетических переходов в атоме. Первоначальная теория атомов Бора была бессильной в объяснении этой количественной стороны спектров. Серия классических экспериментальных работ по аномальной дисперсии, выполненных самим Д. С. Рождественским и его учениками В. К. Прокофьевым, А. Н. Филипповым

¹⁾ Д. С. Рождественский. Спектральный анализ и строение атомов. Труды ГОИ, вып. 1920.

и многими другими, задавала безукоризненно точно сформулированную задачу будущей теории. Новая квантовая механика разрешила её, и с этого времени систематическое исследование аномальной дисперсии пошло рука об руку с теорией, подтверждая её, контролируя или требуя усовершенствования. Стройная линия работ по аномальной дисперсии составляет общепризнанную заслугу ГОИ, и Институт с основанием избрал в качестве фона своей издательской эмблемы дисперсионные «крюки».

Вместе с экспериментальным изучением свойств атомов в ГОИ не прекращалось развитие теории, позволяющей «рассчитать» атом. Это направление кульминационным своим пунктом имело приближённый способ решения квантовой задачи многих тел, данный В. А. Фоком.

Точное решение задачи многих тел в волновой механике, как, впрочем, и в обычной, представляет громадные трудности. В 1928 г. Хартри предложил решать такие задачи способом, названным им методом «согласованного поля». Он сохранил приблизительно старую боровскую картину электронных орбит, описывая каждую из них отдельной шредингеровской волновой функцией. При этом предполагается, что потенциальная энергия в каждом соответственном уравнении Шредингера происходит от ядра и от заряда прочих периферических электронов, распределённого непрерывным образом.

В. А. Фок в ГОИ коренным образом усовершенствовал метод Хартри, видоизменив его так, что для волновых функций отдельных электронов получались уравнения, отличающиеся от прежних уравнений наличием членов, соответствующих так называемому квантовому обмену. Новый метод получил общее признание и называется обычно в литературе методом Хартри-Фока. В ГОИ этот метод с успехом был применён для расчёта атома натрия.

Решение задач атомной спектроскопии требовало применения самых тонких и сильных экспериментальных спектроскопических средств. На пути к этому воспиталась и выросла обширная спектроскопическая школа и методика ГОИ, позволившая подходить к таким задачам и успешно их разрешать. В связи с этим нельзя не упомянуть о многих работах по сверхтонкому строению спектральных линий, позволивших, в частности, подойти оптическим путём к задачам атомного ядра, изотопии и моментам ядра — механическому и магнитному (работы С. Э. Фриша и других).

После того, как расчёт некоторых более или менее сложных атомов на основе новой квантовой механики дал удовлетворительное согласие с опытом, интерес к принципиальной стороне проблемы ослаб: для данной фазы развития физики она кажется даже исчерпанной. Правильно это или нет, докажет будущее (мне кажется, что неправильно), но, во всяком случае, можно констатировать, что в этом временном исчерпании атомной периферической проблемы важное значение имели экспериментальные и теоретические работы спектроскопической школы ГОИ.

Из длинного, непрерывного ряда работ ГОИ, посвящённых молекулярной спектроскопии и строению молекул, у меня есть возможность упомянуть только об очень немногом, хотя и в этой области исследования Институт занимает важное место.

Принципиально новое слово о молекулах и одновременно о конденсированном, жидком, стеклообразном и кристаллическом состояниях вещества сказано Е. Ф. Гроссом, экспериментально открывшим новое явление в молекулярном рассеянии, теоретически предсказанное Бриллюэном и Мандельштамом. Явление состоит в изменении длины волны рассеянного света на величину порядка отношения скорости звука в данной среде к скорости света в ней. Дальнейшие работы Гросса и его сотрудников показали, что это явление даёт в руки новый способ исследования междумолекулярных связей в телах и может стать основой своеобразного спектроскопического метода изучения жидкостей и кристаллов. Явление, найденное Гроссом, чрезвычайно тонко, и в первое время ряд иностранных авторов пытались его опровергнуть. Однако, экспериментальное искусство Е. Ф. Гросса, выросшее на почве спектроскопических традиций ГОИ, восторжествовало.

Другой спектроскопический метод изучения молекул в конденсированном состоянии, также новый, разработан П. П. Феофиловым в развитие некоторых явлений, ранее найденных мною в области флуоресценции растворов. Степень поляризации флуоресценции органических красителей и других веществ, вообще говоря, может очень резко зависеть от длины волны возбуждающего света, в то время как спектр флуоресценции от неё почти не зависит. Таким образом, к спектрам излучения и поглощения добавляются своеобразные «поляризационные спектры». На очень обширном материале П. П. Феофилов показал, что эти спектры связаны с анизотропией молекул, и потому в сочетании с другими экспериментальными приёмами они дают в руки исследователей новый метод исследования структуры молекул.

Широкий размах интересов Института естественно ведёт нас к проблеме строения вещества от атомов и атомных ядер через молекулы к тому сложному образованию, которое мы называем стеклом. Разнообразными путями и методами подходит ГОИ к исследованию строения этого основного для оптиков материала. Химики ГОИ анализируют стекло своими приёмами, физики пользуются поглощением, рассеянием света, люминесценцией стекла и прочими оптическими признаками; большие результаты дало рентгенографическое исследование строения стекла Н. Н. Валенковым и Е. А. Порай-Кошицем под руководством А. А. Лебедева. Задача ещё далека от окончательного разрешения, но на пути достигнуто немало, в особенности по вопросу о квазикристаллической природе стекла; многое уже перешло из теории стекла в технику.

На почве такого Института, каким был и остаётся ГОИ, безмерная по широте и значению проблема строения вещества не могла оставаться в абстрактной изоляции. Как было блестяще показано в известном докладе Д. С. Рождественского на мартовской сессии Ака-

демии Наук в 1936 г., в ГОИ анализ спектров естественно перерастал в практический спектральный анализ на пользу промышленности, обороне, горному делу. Трудность решаемых экспериментальных задач вынуждала совершенствовать приборы, строить флуоритовые интерферометры, эшелоны, особо светосильные спектрографы, преодолевать препятствия изготовления дифракционных решёток. На этом закалялось приборостроительное мастерство Института, что отражалось потом и на его технических возможностях.

2. ПРИРОДА СВЕТА

Для физики, а для оптики в особенности, свет, после вещества — следующая по важности категория явлений. В настоящее время, после более чем тысячелетних колебаний человеческой мысли во взглядах на природу света, мы располагаем формально-стройной, но с модельной точки зрения трудно постижимой теорией света. Эта теория, как известно, соединяет в себе черты волнового и корпускулярного воззрений, не являясь, однако, ни тем, ни другим. Теоретики ГОИ В. А. Фок, К. В. Никольский и др. не мало поработали над трудностями теории света и квантовой электродинамики. Идеи В. А. Фока во многом вошли в общепринятую теперь теорию света Дирака. Сводка наиболее общих современных представлений о свете дана в книге К. В. Никольского «Фотон».

Из экспериментальных работ ГОИ, имеющих непосредственное отношение к вопросу о природе света, можно указать большую серию исследований, выполненных Е. М. Брумбергом, Т. В. Тимофеевой, З. М. Свердловым и мною по вопросу о визуальных квантовых флуктуациях. Нам удалось доказать существование этих флуктуаций, вызываемых квантовым строением света и квантовым характером поглощения. Изучена статистика этих флуктуаций, а вместе с тем, как попутный результат, получены выводы о свойствах сетчатки человеческого глаза, о её чувствительности в ультрафиолетовом спектре и т. д. Метод флуктуаций позволил зондировать на живом глазе то, что ранее мыслимо было сделать только на мёртвом препарате. Наши опыты дали доказательство квантовой природы света, очевидные в буквальном смысле слова. В 1911 г. эти опыты были повторены американскими физиологами, с тем же результатом, в основном.

В теории света помимо controversy: «волны и корпускулы» есть и стороны, формально прямо вытекающие из классических волновых представлений и современной теории строения вещества, но до сих пор ускользающие от внимания теоретика и экспериментатора. Оптик, например, оперирует без опасения со светящейся точкой, одинаково излучающей во все стороны. Между тем легко доказать, что такая точка не осуществима и что, наоборот, строго говоря, при внимательном анализе оптических явлений необходимо различать точки, соответствующие электрическому диполю, магнитному диполю, квадруполю и т. д. Е. М. Брумбергом и мною было показано теорети-

чески и на опыте, что природа светящейся точки должна резко сказаться в интерференционных опытах типа Юнга-Френеля. Позднее удалось разработать метод установления природы осциллятора, основанный на некоторых свойствах поляризованной флуоресценции. В развитие этого П. П. Феофиловым было показано, что флуоресценция красителей в растворах, точно так же как уранового стекла, соответствует излучению диполей. Таким образом, в оптику вводится не только теоретически, но и в конкретной работе дифференцированное понятие об элементарном излучателе.

Конечно, трудно ожидать от теоретических или экспериментальных работ, касающихся непосредственно природы света, прямых технических результатов. Можно заметить только, что из опытов по визуальным флуктуациям выросла наша методика измерения чрезвычайно малых яркостей, вполне оправдавшая себя при изучении ночного свечения неба, в люминесцентном анализе и сыгравшая основную роль при обнаружении П. А. Черенковым в Академии Наук нового типа видимого свечения электронов, несущихся со сверхсветовой скоростью в среде. Вместе с тем те же флуктуационные опыты дали в руки физиологу и врачу новый способ глубокого изучения глаза в живом состоянии.

3. ДЕЙСТВИЯ СВЕТА

Видное место в работе ГОИ всегда занимали действия света — фотохимия, фотографический процесс и фотолюминесценция. Эти явления давно стали основой соответствующих технических областей, оставаясь, однако, и по сей день во многом невыясненными с принципиальной стороны.

Большое значение в развитии учения о фотохимических процессах получили исследования А. Н. Терениным и его сотрудниками фотохимического распада паров галоидных солей. А. Н. Теренину удалось доказать факт распада молекулы иодистого натрия, при поглощении ультрафиолетового кванта, на возбужденный атом натрия и на атом иода. Таким образом был обнаружен переход под действием света гетерополярной связи в гомеополярную с последующим распадом. С другой стороны, для иодистого таллия был констатирован противоположный процесс: гомеополярная молекула распадалась под действием света на ионы, т. е. атомная связь превращалась в ионную. Установление этих фактов имело большое значение для развития современных представлений о химической связи. Аналогично, в условиях парообразного состояния и освещения монохроматическим светом, удалось анализировать элементарные фотохимические процессы в трёхатомных и четырёхатомных галоидных соединениях. Применённый А. Н. Терениным метод оптического возбуждения, с детальным анализом возникающего при этом свечения, оказался исключительно эффективным и тонким средством исследования элементарных фотохимических процессов.

За последние годы явилась возможность перейти от элементарных процессов к сложным фотохимическим реакциям, происходящим в органических красителях в адсорбированном состоянии. Эти явления представляют большой практический интерес и прежде всего интересуют текстильную промышленность.

Особым или при известных точках зрения более сложным фотохимическим процессом может быть названо явление окраски кристаллов под действием лучей Рентгена и ультрафиолетового света. Сущность его в том, что при поглощении света в кристалле при некоторых условиях может произойти распад кристаллической решётки и выпадение изолированных атомов. Впервые Т. П. Кравец в своей речи на годичном собрании ГОИ в 1929 г. высказал предположение, что первичный фотографический процесс, происходящий в зёрнах — кристаллах эмульсии, т. е. возникновение скрытого изображения, есть в действительности окрашивание кристалликов при поглощении света, вследствие изоляции атомов серебра из кристаллической решётки. То же предположение было высказано независимо и одновременно Р. Полем в Гёттингене. Мысль Т. П. Кравца стала основой обширной серии работ, проводившихся его сотрудниками, в особенности М. В. Савостьяновой в Академии Наук и в ГОИ. При этом с самого начала было замечено, что при освещении кристалликов бромистого серебра атомарно распределённый металл коагулирует и собирается в коллоидальные частицы серебра. Исследование этого процесса и его следствий для фотографического процесса определило характер работ по скрытому изображению в ГОИ, занимающих основное место в теории фотографии.

Фотографический процесс, с теоретической точки зрения, даже в самых простых случаях значительно более сложен, чем процесс возбуждения молекул, спонтанно или вынужденно возвращающихся после этого в начальное состояние. Энергия, выделяющаяся при таком возвращении, в простейшем случае излучается, оставляя так называемую люминесценцию. В ГОИ изучение люминесценции не сходило с программы работ, ввиду её огромного значения для понимания строения вещества и кинетики молекулярных процессов и вместе с тем всё возрастающей технической роли её в светотехнике и военном деле.

Начало изучения люминесценции в ГОИ положено систематической серией работ А. Н. Теренина над резонансным излучением паров ртути, кадмия, таллия, свинца, висмута, цинка, сурьмы и мышьяка. Эти исследования, производившиеся в эпоху наиболее бурной фазы развития учения о строении атома, имели большое значение для установления схем спектральных термов перечисленных элементов и вместе с тем остаются до сих пор образцовыми по своему экспериментальному мастерству и чистоте.

Люминесценция паров, как могучее средство для прослеживания звеньев элементарных фотохимических процессов, постоянно фигурирует в других работах А. Н. Теренина и его учеников.

Вместе с тем в ГОИ проводится систематическая работа по люминесценции значительно более сложного типа, происходящей в сложных молекулах, в жидких или твёрдых растворах или в кристаллах. Лет тридцать назад эти явления, известные почти четыре века, оставались нагромождением эффектных, но почти непонятных фактов. Сейчас многое здесь, хотя далеко не всё, выяснено, упорядочено и теоретически объяснено, по крайней мере, вплоть до некоторых эмпирических постоянных, для теоретического вывода которых потребовалось бы едва достижимое точное знание структуры сложных молекул. На основании диффузионной теории столкновения молекул в жидкости объяснена кинетика тушения люминесценции в растворах посторонними веществами, зависимость поляризации люминесценции от вязкости; представление о квантовых явлениях обмена позволило количественно понять всю группу сложных явлений влияния концентрации люминесцирующих молекул на выход, поляризацию и длительность свечения (С. И. Вавилов, Б. Я. Свешников, А. Н. Севченко, П. П. Феофилов).

Сейчас люминесценция живым потоком вливается в практику, военную и гражданскую, в виде люминесцентных ламп, светящихся шкал, светомаскировочных применений сигнализационных устройств на невидимых лучах, театральной техники, бесконечных видов люминесцентного анализа и. т. д., и связь теоретической работы по люминесценции с запросами техники очевидна.

4. ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ОПТИКА

Переход от широких тем строения вещества и природы света к значительно более узким и специальным вопросам действия света означает спуск на более низкий и узкий теоретический ярус. Опустимся еще ниже, в ещё более специальную область, составляющую, однако, один из важнейших участков оптического фронта: остановимся коротко на теоретической работе вычислителей.

Институту пришлось создавать вычислительное дело почти на пустом месте — без навыков, без традиций — и все же пионеры этого дела А. И. Тудоровский, Е. Г. Яхонтов, Г. Г. Слюсарёв не ограничились механическим копированием известных вычислительных шаблонов; они искали собственную теоретическую дорогу и самостоятельно развили методику расчёта оптических систем на основе теорий aberrаций третьего порядка. Оказалось впоследствии, что теми же путями пошла и западная оптическая мысль. Aberрации высших порядков были впоследствии исследованы Г. Г. Слюсарёвым для склеенного двухлинзового объектива. Удалось получить общие результаты, дающие возможность рассчитать объектив без привычных утомительных тригонометрических проб.

В течение многих лет, до сего времени, вычислители и оптотехники Института ищут путей решения основной задачи о так называемом «качестве изображения». Простые расчёты на основе гео-

метрической оптики дают только то, что можно назвать «скелетом» изображения. Остаётся невыясненным распределение энергии по площади абберационного изображения. Задачу пока решают приближённо. Для случаев, когда позволительно не учитывать специфическое влияние дифракции, решение находилось Г. Г. Слюсарёвым. Учёт дифракций для некоторых задач выполнен Л. П. Морозом, Г. Д. Рабиновичем и Г. Г. Слюсарёвым. Продвинут вопрос о предельном разрешении фотографирующих оптических приборов (с учётом не только влияния объектива, но и фотографической эмульсии), изучено влияние контрастности изображения на разрешающую силу (Л. П. Мороз). Одной из последних работ Д. С. Рождественского было глубокое теоретическое исследование некоторых случаев изображения в микроскопе с учётом интерференционных и дифракционных явлений. Эта работа содержит перспективные практические выводы, имеющие основное значение для дальнейшего усовершенствования микроскопа.

Общую теоретическую основу для конкретной вычислительной работы составляет серия исследований по теории разложения аббераций в ряд и методике вычисления коэффициентов разложения и по отысканию приёмов перехода от геометрических аббераций к волновым. Влияние изменения положения предмета и входного зрачка на коэффициенты аббераций третьего порядка изучено А. И. Тудоровским. Он же разработал векторный метод расчёта хода лучей через системы с плоскими поверхностями, т. е. через призмы.

Из отдельных теоретических вычислительных работ отмечу ещё теорию распределения освещённости изображения в широкоугольных объективах (Г. Г. Слюсарёв) и теорию систем с переменным фокусным расстоянием (Д. С. Волосов).

Углубление теоретических представлений о возможностях оптических систем вместе с громадным эмпирическим материалом, зафиксированным в архиве вычислителей, даёт возможность искать и находить новые пути на этом, казалось бы, исхоженном поприще. Доказательство тому — большие успехи в реализации современных светосильных и широкоугольных объективов, серии оригинальных катадиоптрических систем с неожиданными перспективами (в том числе менисковые системы Д. Д. Максудова), успешное применение асферических поверхностей. Оптико-вычислители явно находятся в фазе большого творческого подъёма, который есть результат расширения теоретического горизонта.

5. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ СВЕТОТЕХНИКА

Светотехника, наука о рациональном освещении, относится, разумеется, к сугубо техническим отраслям знания. Однако, и она должна иметь свою теорию, и ГОИ дал ряд весьма поучительных исследований такого рода. А. А. Гершун показал, что светотехнический расчёт может быть представлен, как задача общей физичес-

кой теории светового поля, под которым понимается пространство, изучаемое с точки зрения распределения в нём потоков лучистой энергии. Светотехнические задачи можно решать на основании представления о световом поле, пользуясь векторным анализом, причём в качестве основной характеристики вводится объёмная плотность световой энергии и так называемый «световой вектор»; определяющий по величине и направлению световое давление (он соответствует среднему значению вектора Пойнтинга). Теория светового поля с успехом применялась в работах советских светотехников и вместе с тем обратила на себя внимание европейской и американской науки. В полемике, завязавшейся с покойным французским академиком Блонделем по поводу принципов учения о световом поле, победителем оказался А. А. Гершун. Американское Оптическое Общество в 1938 г. констатировало, что развитие применения в светотехнике векторных представлений в основном составляет заслугу советских учёных, сотрудников ГОИ В. А. Фока, А. А. Гершуна, М. М. Гуревича и Н. В. Болдырева; книга А. А. Гершуна «Световое поле» издана в США, причём редактор перевода П. Мун пишет: «Теоретическая фотометрия представляет случай „задержанного развития“, и в основном она оставалась неизменной с 1760 г., в то время как остальные главы физики триумфально развивались. Однако, в последние годы растущие запросы современной светотехники сделали беспомощными абсурдно антикварные представления традиционной фотометрической теории. В настоящее время имеется сильное движение за то, чтобы привести теорию светового поля в соответствие с духом физики. Профессор Гершун в Государственном оптическом институте в Ленингарде является одним из пионеров этого движения».

Теория светового поля получила практическое применение при разработке светотехники естественного освещения. Большая работа была произведена по вопросу о распределении света в поглощающих и рассеивающих свет средах. Результаты получили применение при изучении свойств молочных стекол, атмосферы и оптики моря. Работы ГОИ по гидрофотометрии, производившиеся под руководством А. А. Гершуна, дали многое для физики моря и послужили основой решения важных военных задач.

6. ТЕОРИЯ ОТЖИГА ОПТИЧЕСКОГО СТЕКЛА

Оптическое стекло — основной, самый сложный и тонкий материал в оптическом приборе; не удивительно поэтому, что оптическое стекло явилось лейтмотивом ГОИ со времени его возникновения. Институт не ограничился внедрением в промышленность перенятой сначала у английской фирмы Чэнс технологии оптического стекла. За 25 лет он, можно сказать, сверху до низу ревизовал и переиначил эту технологию, очень много передав прямо производству. На почве этого выросли новые теоретические представления об опти-

ческом стекле в целом и относительно отдельных звеньев технологии его получения и обработки. Можно, впрочем, выразиться и иначе: новые теоретические результаты, полученные в ГОИ относительно оптического стекла, иной раз глубоко влияли на технологию.

Я не предполагаю здесь излагать весь сложный комплекс новых теоретических выводов, полученных в ГОИ относительно стекла И. В. Гребенчиковым, Н. Н. Качаловым, А. А. Лебедевым, В. В. Варгиным, А. И. Стожаровым и их сотрудниками. Для этого нужна очень объёмистая книга, которая, надо надеяться, и будет написана в ближайшее время перечисленными лицами. Ограничусь только одним очень показательным примером.

Отжиг оптического стекла — одна из важнейших производственных операций, не имевшая, однако, до работ Института приемлемых объяснений. В основном положительные действия отжига раньше всего приписывались устранению натяжений в стеклянных блоках. А. А. Лебедев круто изменил эту точку зрения. Он доказал, что причиной изменения основных оптических свойств стекла при отжиге являются полиморфные превращения, связанные в силикатных стёклах с известным превращением кварца из α в β -модификацию. Вместе с этим опыты А. А. Лебедева сделали вероятной квазикристаллическую природу стекла. В отличие от представления о стекле, как о переохлаждённой жидкости, можно думать, что стекло есть агрегат псевдокристаллов ничтожных размеров. Этот вывод получил подтверждение в рентгено-спектроскопических исследованиях, о которых ранее уже упоминалось.

Физико-химическая теория отжига, предложенная А. А. Лебедевым, стала основой многих дальнейших работ в этой области у нас и за границей и вместе с тем дала основу для рациональной технологии, применяемой в производстве.

Рамки небольшой статьи вынуждают ограничиться перечисленными примерами теоретической деятельности Института; очень многое и о многих при этом даже не упомянуто. Надеюсь, впрочем, что даже из немногого сказанного ясен особый характер теории в Оптическом институте. ГОИ никогда, с первых ступеней своего развития, даже в самых широких вопросах, не отрывался от заданий и нужд советской практики, никогда не уходил в заоблачные абстрактные высоты так называемого чистого знания, но вместе с тем он всегда боролся с неприкрытым эмпиризмом. Теория, как необходимое условие решения практических вопросов, является и должна остаться в Институте необходимым условием его работы.

ИЗ ИСТОРИИ НАУКИ

ПАВЕЛ НИКОЛАЕВИЧ ЯБЛОЧКОВ

Н. А. Капцов, Москва

«Духовная жизнь народа и её высота соизмеряется теми услугами, которые оказали его деятели в истории культуры всему человечеству; поэтому всякий народ, уважающий себя, дорожающий своим я и любящий его, должен по заслугам ценить своих деятелей и стремиться заставить и весь интеллигентный мир признавать эти заслуги»¹).

31-го марта 1944 г. истекло 50 лет со дня смерти одного из замечательных русских людей прошлого века Павла Николаевича Яблочкова. Великая заслуга П. Н. Яблочкова перед родиной и перед всем человечеством состоит не только в том, что он изобрёл удобный и дешёвый источник электрического света — знаменитую «свечу Яблочкова». Главная и основная заслуга его в том, что он на деле показал возможность обширного повседневного применения электрического тока для освещения и внедрил электрическое освещение на практике в широком европейском масштабе.

Мысли о возможности электрического освещения высказывались давно, с самого открытия первого более или менее мощного источника тока — вольтова столба. Уже профессор физики В. В. Петров, впервые (на несколько лет раньше Деви наблюдавший явление вольтовой дуги), описывая появление этой дуги между двумя угольными стерженьками, говорит: «является между ними весьма яркий белого цвета свет или пламя, от которого оные угли скорее или медленнее загораются и от которого тёмный покой довольно ясно освещён быть может»²) (подчёркнуто нами). Попыток осуществить эту мысль на деле было сделано очень много как по линии применения вольтовой дуги, так и путём использования свече-

¹) Эти слова взяты нами из статьи простого русского человека, телеграфного техника Бухгейма, посвящённой другому русскому пионеру в деле электрического освещения, Александру Николаевичу Лодыгину. Почтово-Телеграфный Журнал, 1900 г., февраль, часть неофициальная, стр. 158.

²) «Известие о гальвано-вольтовых опытах, которые производил профессор физики Василий Петров», С. П. Б., 1803 — см. Сборник к столетию со дня смерти первого русского электротехника академика Василия Владимировича Петрова (1761—1803), Энергоиздат, М.-Л., 1936, стр. 163.

ния раскалённых электрическим током твёрдых тел. Но в последнем случае «тело накала» быстро расходовалось, сгорая или окисляясь в воздухе. Вольтова дуга, в свою очередь, требовала постоянной регулировки расстояния между постепенно укорачивавшимися при горении дуги углями. Наличие изобретённых до появления свечи Яблочкова автоматических регуляторов дуги не решало вопроса: регуляторы эти были очень несовершенны, требовали постоянного вмешательства руки механика. Ими совсем нельзя было пользоваться при включении нескольких «горелок» с вольтовой дугой последовательно. Параллельное использование нескольких «дуг» от одного источника тока было также невозможно потому, что загоралась только та дуга, у которой, пользуясь современной нам терминологией, потенциал зажигания был меньше, чем у остальных. Отсюда возникла задача о «делении электрического света», т. е. задача об использовании по возможности большого числа сравнительно мелких источников света, питаемых одним более или менее мощным источником электрического тока. В современных нам условиях решение этой задачи производится чрезвычайно легко — её просто не существует как таковой, — но в семидесятых годах прошлого века эта задача не только казалась, но и была чрезвычайно трудной и сложной. Недаром крупный русский электротехник — изобретатель В. Н. Чиколев, обходя прямое решение вопроса, предлагал такой практически неприемлемый способ, как буквальное деление света, получаемого от сильного источника, при помощи ряда труб и зеркал. П. Н. Яблочков дал практическое решение этой трудной задачи и притом несколькими способами.

В результате перечисленных трудностей электрическое освещение до изобретения свечи Яблочкова не имело распространения на практике и применялось лишь кратковременно, в торжественных случаях, наподобие фейерверка, в качестве парадной шумихи и дорогой игрушки; применялось оно ещё иногда, в исключительных случаях, для ночного освещения очень важных строительных работ, когда высокая стоимость освещения, сложность его устройства, применение специального источника тока для каждой из «горелок» и необходимость постоянного наблюдения за работой регуляторов не имели значения, так как перекрывались достигаемой путём ночной работы выгодой.

Павел Николаевич Яблочков родился 14 (26) сентября 1847 г. в небогатой помещицкой семье Сердобского уезда Саратовской губернии. Семья Яблочкова, наряду со многими мелкопоместными дворянами, не сумела приспособиться к переходу России на рельсы капиталистического хозяйства, начавшемуся с крестьянской реформы 1861 г. Поэтому, хотя небольшое имение отца и сохранилось за П. Н. Яблочковым до самой его смерти, оно не могло обеспечить ему средства для жизни. Родители послали Яблочкова учиться сперва в гражданскую гимназию в Саратове. Затем, руководствуясь большими способностями и успехами Яблочкова в математических науках,

решили, что он в состоянии выдержать трудные вступительные экзамены в Николаевское военное инженерное училище. Окончание последнего сулило выгодную материально карьеру военного инженера. П. Н. Яблочков, действительно, испытания выдержал и не без успеха окончил курс Инженерного училища в 1866 г. и был назначен младшим офицером в 5-й Саперный батальон в город Киев. В конце 1867 г. он уволился из батальона по болезни и поступил слушателем в «Офицерские гальванические классы» в Петербурге. Пройдя курс Гальванических классов, он отбыл ещё дополнительный год обязательной после их окончания военной службы, в том же 5-ом Саперном батальоне. В начале 1870 г. Яблочков уволился в запас и окончательно порвал с карьерой военного инженера, вопреки желанию родных. Способность и склонность к изобретениям проявлялись у него ещё в Саратовской гимназии, а Инженерное училище и Гальванические классы дали ему довольно солидное техническое образование, особенно в области электротехники. Заветной мечтой Яблочкова было осуществить несколько задуманных им изобретений. Ему удалось поступить начальником телеграфа Московско-Курской ж. д. При телеграфном отделе дороги существовали мастерские. Это предоставляло Яблочкову некоторые экспериментальные возможности. Однако, обязанности начальника телеграфа отнимали у него много времени. В 1873 г. П. Н. Яблочков познакомился с Владимиром Николаевичем Чиколевым. Чиколев имел университетское образование. Он оставил в истории русской электротехники глубокий след, как организатор Электротехнического отдела Московского политехнического Музея и как инициатор издания с 1880 г. известного русского журнала «Электричество», продолжающего своё полезное существование и поныне. Одно из главных изобретений Чиколева, завершённое уже после выхода в свет «свечи Яблочкова», более или менее совершенный «дифференциальный» регулятор вольтовой дуги.

Чиколев был усердным популяризатором науки об электричестве, читал ряд публичных лекций и вёл в Русском техническом обществе «беседы» на электротехнические темы. На одной из таких бесед состоялось знакомство Яблочкова с Чиколевым. Работы Чиколева над регуляторами вольтовой дуги произвели сильное впечатление на Яблочкова. В распоряжении Чиколева были лишь чрезвычайно малые технические возможности. Многие его изобретения так и не были проверены на опыте, другие долго ждали экспериментального осуществления. Яблочков предложил Чиколеву изготовить в телеграфной мастерской, и действительно изготовил, один экземпляр тогдашней стадии дифференциального регулятора Чиколева. Увлечённый, после знакомства с Чиколевым, идеей использования вольтовой дуги в качестве источника света, П. Н. Яблочков сделал в 1874 г. попытку применить последнюю на практике в железнодорожном деле. Он предложил поместить на паровозе царского поезда электрический фонарь при следовании этого поезда из Петербурга в Крым. Достигнутый эффект был удачным, но П. Н. Яблочкову пришлось лично

следить на морозе за горением дуги во всё время ночного хода поезда, и он окончательно убедился в несовершенстве имевшихся систем регуляторов.

Страстное желание иметь больше технических возможностей и больше досуга для исследовательской и изобретательской работы заставило П. Н. Яблочкова решиться на смелый шаг. Он бросил казённую службу и открыл на свои небольшие средства на собственный страх и риск мастерскую физических приборов. Но расчёты его на достаточно большую потребность в этих приборах не оправдались. Он разорился. Возвращаться на военную или гражданскую службу Яблочков не хотел. Родные отказали ему в какой бы то ни было поддержке в продолжении изобретательской деятельности, и П. Н. Яблочков решил уехать в Америку, искать там приложения своим знаниям и способностям. По пути в Америку Яблочков остановился в Париже. Здесь в числе прочих достопримечательностей он посетил мастерскую часов и точных приборов фирмы Бреге (Breguet). Владелец и техническим руководителем этого всемирно известного предприятия¹⁾ был с 1833 г. Луи Франсуа Клемент Бреге, сам просвещённый техник и изобретатель, избранный в 1874 г. экстраординарным членом Парижской Академии Наук за свои научно-технические заслуги.

Луи Франсуа Бреге сильно заинтересовался Яблочковым, предложившим ему приобрести его, Яблочкова, патент на усовершенствованную конструкцию электромагнита. В беседе с Яблочковым Бреге понял, каких крупных достижений можно ожидать от Яблочкова, и предложил ему поступить в свою мастерскую и заняться сборкой и усовершенствованием динамомашин, вместо того, чтобы ехать в неизвестные дали Америки. Вместе с тем, Бреге предоставил П. Н. Яблочкову широкую возможность параллельно с обслуживанием интересов фирмы использовать технические возможности мастерской для работы над своими изобретениями и для своих исследований. Таким образом, П. Н. Яблочков нашёл, наконец, те благоприятные условия для работы над любимым делом, которых он так долго, тщетно добивался. В этих условиях ему вскоре удалось сделать путём изобретения «свечи» излишним применение капризных регуляторов, а также удалось решить и задачу о разделении электрического света и сделать многое другое.

В свече Яблочкова оба цилиндрических угольных электрода дуги помещены не на одной прямой — один против другого, а параллельно друг другу. Если дуга питается переменным током, уголи делаются

¹⁾ Карманные часы со звоном «Брегет» поминает А. С. Пушкин в «Евгении Онегине», когда говорит:

«Онегин едет на бульвар
И там гуляет на просторе,
Пока недремлющий Брегет
Не прозвонит ему обед» и т. д..

одного и того же диаметра; при питании постоянным током положительный уголь должен иметь диаметр в 2 раза больший, чем отрицательный уголь. В этих условиях оба угля укорачиваются при горении дуги с одной и той же скоростью и длина дуги остаётся неизменной. Угли разделены плотно прилегающим к ним слоем изолятора, испаряющегося одновременно со сгоранием углей. «Запалом» дуги первоначально служил специальный небольшой уголёк, соединяющий концы электродов. Вскоре Яблочков заменил этот запал полоской металлического порошка, наносимой на поверхность изолятора между концами электродов. Одновременно Яблочков стал припешивать к веществу изолирующего слоя металлические соединения, образующие такую же полоску на поверхности изолятора при постепенном испарении последнего; это обеспечивало наличие запала при повторном зажигании дуги после того, как она была погашена путём размыкания тока.

Вот как П. Н. Яблочков сам рассказывает об изобретении им «свечи» в докладе, прочитанном в Петербурге на заседании 1-го Отдела Русского технического общества 21 марта 1879 г.¹⁾:

«Первые опыты с электрическим освещением производил я ещё здесь, в России, в 1872 и 1873 гг.; я работал тогда с обыкновенными регуляторами разных систем, затем несколько времени с вышедшей в то время лодыгинской горелкой, с системой накаливания. Около этого времени мне и пришла мысль, имеющая связь с моими последующими работами. Я делал тогда следующие опыты: брал очень тоненькие угольки, помещал их между двумя проводниками, а для того, чтобы уголь не сгорал, я обматывал его волокнами горного льна... Из опытов этих ничего не вышло и притом производил я их с большими перерывами и даже, наконец, совсем бросил, сохранив... мысль о применении глины и других земель к электрическому освещению. Я снова принялся работать только в 1875 г. в Париже и стал употреблять тоже глину и всякие другие пригодные изолирующие вещества, помещая их в вольтову дугу, чтобы поддерживать расстояние между углями. Делая опыты здесь, в России, я употреблял небольшое количество (гальванических)²⁾ элементов и обширных наблюдений поэтому производить не мог. Работая же в Париже у Брегета, мне пришлось иметь дело с большими электрическими машинами; здесь-то я и исследовал свойства этих глин. Находясь в вольтовой дуге при довольно сильном токе, они плавились и затем испарялись, так что трудно было поддерживать горение. Затем я придумал приспособление, которое известно ныне под именем моей свечи, т. е. помещение между углями изолировки, которая испаряется одновременно со сгоранием угля. Изолировка

¹⁾ Записки Русского технического общества, 1879, год 13, вып. 3, стр. 153. В дальнейшем мы будем называть этот документ для краткости просто «Доклад».

²⁾ Вставлено нами. — Н. К.

имеет гораздо большее значение, чем можно было бы предполагать. Она служит не только для того, чтобы удерживать угли на известном расстоянии, но и сообщает кроме того новые свойства самому освещению как относительно ровности горения, так и относительно помещения большого числа источников в одну цепь...». Как и в случае большого числа других крупных изобретений и открытий, людская молва приписывает изобретение свечи Яблочкова счастливому случаю. П. Н. Яблочков сидел, говорит эта легенда, после дневных трудов за столиком одного из парижских кафе, просматривал свои записи и, рядом с уже лежавшим на столике карандашом положил в раздумье параллельно ему другой. При взгляде на эти мирно лежащие рядышком карандаши у Яблочкова вдруг блеснула мысль о возможности решить задачу об электрической горелке без регулятора путём параллельного расположения углей. История науки и техники сохранила ряд подобных легенд. Все мы слышали или читали в своё время об упавшем с дерева яблоке, будто бы сыгравшем такую же роль по отношению к великим открытиям Ньютона. Свеча Яблочкова была изобретена им, конечно, не как следствие случайно положенных на столик карандашей, а как результат многолетней упорной работы. Эта работа одновременно привела П. Н. Яблочкова ещё к одному существенному открытию и крупному изобретению, важность которого Яблочков, к сожалению, недооценил. А именно, вопреки господствовавшему мнению, что сопротивление электрическому току всех твёрдых тел увеличивается с увеличением температуры, П. Н. Яблочков обнаружил в тех опытах, о которых говорится в приведённой выше цитате из «Доклада», что сопротивление глины, каолина, окиси алюминия, окиси циркона и многих других тугоплавких тел уменьшается с увеличением температуры. Если пластинку или стержень из такого тугоплавкого вещества поместить в электрическую цепь и затем подогреть, то это тело начинает пропускать сильный ток и нагревается ещё больше. В результате получается ярко раскалённое «тело накала», не сгорающее в воздухе и более или менее медленно испаряющееся. Пользуясь этим явлением, Яблочков сконструировал специальную лампу накаливания, в которой телом накала служила каолиновая пластинка «Привилегия», т. е. русский патент на эту лампу заявлен им 20/II 1877 г. Впоследствии он на практике осветил такими лампами каюты трёх военных судов¹⁾. Но П. Н. Яблочков был принципиальным противником электрического освещения при помощи ламп накаливания, как это видно из его Публичной лекции об электрическом освещении, прочитанной 4 (16) апреля 1879 г. в Соляном городке в Петербурге²⁾. Яблочков считал превращение энергии электриче-

¹⁾ См. Труды Отд. физич. наук Общества любителей естествознания, т. 1, вып. 1, стр. 17.

²⁾ Публичная лекция Русского технического общества. П. Н. Яблочков — «Об электрическом освещении», С. Петербург, 1879. В дальнейшем мы будем называть этот документ коротко: «Публичная лекция».

ского тока в свет при помощи «накаливания» очень невыгодным делом по сравнению с вольтовой дугой, в которой он приписывал значительную роль в генерации света энергии химических реакций с участием «дешёвого» кислорода воздуха. Поэтому он предлагал пользоваться своей каолиновой лампой накаливания лишь в тех случаях, когда нужен был источник света малой силы (порядка силы света одного газового рожка), так как строить прочные и надёжные «свечи» с такой малой силой света ему не удавалось. Вообще же, он не придавал каолиновой лампе большого значения и не разрабатывал её дальше. А между тем идея этой лампы была та же, что и идея лампы Нернста, запатентованная последним в 1897 г., т. е. двадцать с лишним лет после изобретения Яблочкова. Лампа Нернста получила довольно широкую известность в 1900—1902 гг. и в ряде случаев успешно конкурировала с уже значительно усовершенствованной тогда лампой Эдисона с угольной нитью. Если бы Яблочков обратил больше внимания на свою лампу с каолиновым телом накала, он в дальнейшей истории «электрического освещения по методу Яблочкова» имел бы в руках лишние возможности в борьбе с конкурентами этого метода, в том числе с лампой накаливания Эдисона.

Добившись хороших результатов с вольтовой дугой между двумя угольными электродами, разделёнными изолирующим слоем, П. Н. Яблочков, воспользовавшись возможностями мастерской Бреге, тут же придал своему изобретению техническое оформление, делавшее возможным применение этого изобретения на практике. Это было в начале 1876 г. В это время ему пришлось поехать на выставку физических приборов в Лондон в качестве представителя фирмы Бреге.

В числе прочих экспонатов Яблочков привёз в Лондон также и свою «свечу». «Свеча Яблочкова» имела на выставке большой успех. Тотчас по возвращении с Лондонской выставки Яблочков занялся пропагандой «свечи» в Париже и внедрением её на практике. Бреге не захотел на старости лет заняться новым, несколько чуждым ему делом и отказался от практической реализации изобретения Яблочкова. Но он свёл П. Н. Яблочкова с другим предприимчивым французом техником и изобретателем Денейрузом, имевшим знакомства в денежных кругах. Денейруз предоставил свои мастерские (занимавшиеся изготовлением водолазных приборов) в распоряжение Яблочкова для серийного, как теперь принято выражаться, изготовления «свечей» и всех принадлежностей электрического освещения. При содействии Денейруза в короткое время была создана достаточно мощная акционерная компания под названием «Генеральное общество электрического освещения по методу Яблочкова» (*Société générale d'Électricité procédé Jablotschcoff*). Компания приступила к пробной установке свечей Яблочкова в наиболее фешенебельных магазинах Парижа, в некоторых театрах, на одной из главных улиц Парижа и т. д. Успех превзошёл все ожидания: электрическое освещение по способу Яблочкова оказалось не только лучше, удобнее и безопаснее принятого в то время освещения газовыми горелками

или стеариновыми свечами (в закрытых помещениях), но и значительно дешевле. Контракты на электрическое освещение заключались один за другим. В Лондоне и некоторых других европейских городах возникли самостоятельные акционерные общества для эксплуатации свечи Яблочкова. Для описания этих успехов предоставим слово самому П. Н. Яблочкову. В Публичной лекции он описывает между прочим способ параллельного включения нескольких свечей в одном подсвечнике. В этом случае при первом включении дуга возникает в той свече, у которой наиболее низкое напряжение зажигания (наиболее мало «сопротивление», как выражались тогда); после израсходования углей первой свечи автоматически зажигается следующая по величине напряжения зажигания свеча и т. д. Яблочков на стр. 16 говорит:

«Таким образом, в настоящую минуту освещение совершенно гарантировано как от потухания, так и от разных случайностей. . . . Из установок, действующих на практике с подсвечниками этого рода, можно назвать фонари в Halles Centrales (Центральный рынок Парижа) и в магазине Ville de Paris (крупный парижский магазин „Город Париж“) . . . Всех существующих установок я перечислять не буду, а назову только некоторые: площади Большой Оперы, Французского театра, Place de Bastille (площадь Бастилии), Avenue de l'Oréga (проспект или аллея Оперы — одна из главных улиц Парижа), часть Halles Centrales в Париже, часть набережной Темзы, British Museum (Британский Музей) в Лондоне; площадь Puerta del sol в Мадриде, Place de Dome в Неаполе; устанавливается освещение палаты депутатов в Берлине. В Петербурге первое освещение было установлено в Большом театре. Испытывается в настоящую минуту на Дворцовом мосту, в Гостином дворе и предполагается поставить на площади перед Александринским театром. Это из установок общественных. Но наибольшее число фонарей принадлежат установкам частным. Перечислить их все было бы затруднительно. За последнее время парижское общество выставляло более 100 фонарей в месяц; но я упомяну здесь только об установке в Луврском магазине, как наистарейшей. . .

...После 11-месячного опыта, в продолжении которого было констатиrowано около 22% экономии против прежнего газового освещения, не говоря уже про увеличение света, неизменяемость цветов и другие удобства, было выставлено 86 фонарей. . . Магнито-электрические машины, которые делались прежде по несколько штук в год, стали делаться несколькими десятками в месяц; свечи приготавливались прежде в количестве нескольких десятков, производятся теперь мастерскими в Париже более 8000 в день. Мастерская эта занимает непосредственно более 200 человек».

На Парижской выставке 1878 г. «система электрического освещения по методу Яблочкова» демонстрировалась с большим триумфом во всех деталях в особом павильоне. В европейских технических и популярных журналах того времени можно найти ряд восторжен-

вых описаний этой системы. Электрический свет, осуществлённый по методу Яблочкова, получил громкое название «La lumière du Nord», «La lumière Russe» (Северный свет, Русский свет). Технические и моральные успехи сопровождалась и материальными. В 1879 г. Яблочков приехал в Россию с репутацией денежного человека и европейской знаменитости. По свидетельству Чиколева «его всюду приглашали нарасхват, везде продавались его портреты, в газетах и журналах ему посвящались сочувственные, а иногда и восторженные статьи».

Но пока Яблочков не приобрёл еще этой славы в европейском масштабе, первая его попытка организовать реализацию его изобретения также и в России успеха не имела. Русские толстосумы не захотели рискнуть капиталом, а русские технические круги вначале не только не поддерживали Яблочкова, но встретили первые известия об изобретении свечи даже с некоторым недоброжелательством. В числе этих людей был одно время и Чиколев, утверждавший на своих популярных лекциях, что только дифференциальный регулятор и «дробление света» при помощи труб и зеркал могут дать решение вопроса о массовом электрическом освещении. Лишь в 1878 г. Яблочкову удалось создать в Петербурге акционерную компанию «П. Н. Яблочков-изобретатель и К^о. Товарищество электрического освещения и изготовления электрических ламп и аппаратов в России».

Задачу о разделении электрического света П. Н. Яблочков решил в те же годы наибольших успехов его деятельности тремя различными способами. Во-первых, «свечи» вследствие отсутствия регуляторов можно было включать последовательно по несколько штук. Во-вторых, Яблочков предложил включать в основную цепь тока первичные обмотки ряда индукционных катушек и питать от вторичной обмотки каждой из катушек несколько последовательно включённых ламп (привилегия заявлена 30/XI 1876 г.). Таким образом, Яблочков впервые предложил практическое применение принципа трансформаторов электрического тока. В-третьих, Яблочков воспользовался переменным током и конденсаторами (привилегия заявлена 11/X 1877 г.). Предложенная им схема очень проста с современной нам точки зрения и представляет собой простое разветвление переменного тока с регулировкой силы тока в каждой из ветвей при помощи ёмкостного сопротивления. Но во времена Яблочкова теория переменного тока ещё не была создана. Прежде чем осуществить предложенную им схему, Яблочкову пришлось, как это видно из Публичной лекции, самостоятельно продумать процесс зарядки и разрядки конденсатора, одна из обкладок которого соединёна с источником постоянного тока, а другая с землёй, а затем сообразить, какой характер будут иметь токи в проводах, соединяющих те же обкладки с одним из полюсов машины переменного тока или с землёй при заземлённом другом полюсе машины. Для подтверждения своих соображений, П. Н. Яблочков пытался обнаружить экспериментально весьма быстро протекающий ток зарядки конденсатора от источника постоянного напряжения и,

наконец, действительно обнаружил этот ток, «беря большие поверхности для зарядки и элементы с ничтожным количеством тока».

Яблочков придавал большое принципиальное значение всему этому вопросу, сущность которого он определял, как «превращение динамического электричества в статическое и статического в ток». Об опытах, иллюстрирующих это превращение, он говорит как о «представляющих в настоящее время как научный интерес, так и обширную будущность, пределы которой трудно предвидеть и которая открывается переходом электричества из одного состояния в другое». Представление о «двух состояниях электричества» вполне естественно для Яблочкова, учившегося в шестидесятых годах, и является отголоском весьма медленно и туго отживавшего свой век противопоставления «электрических» и «гальванических» явлений. Заметим, что даже А. Г. Столетов, на десять лет позднее, считает нужным в 1889 г. отметить особо, что при исследовании актино-электрического эффекта он решил перейти от электричества высокого напряжения к электричеству низкого напряжения¹⁾.

Таким образом, П. Н. Яблочков выступает здесь перед нами не только как крупный изобретатель, но и как физик, успешно разбирающийся в неизвестном ему вопросе. Что касается представлений Яблочкова о вольтовой дуге, то освещение при помощи дуги он сравнивает с освещением путём накаливания, как получение света со сгоранием углей и без сгорания их, и видит в этих способах два различных случая превращения других видов энергии в энергию света. Свечение газа в дуге он рассматривает как свечение раскалённых частиц, несущихся от одного электрода к другому, притом в обоих направлениях. Большое значение он придаёт химическим процессам в дуге, в частности, как уже было упомянуто выше, реакциям кислорода. В этом он сходится с профессором физики академиком В. В. Петровым, о работах которого, как и все современники, Яблочков не знает, и в вопросе об открытии вольтовой дуги он ссылается на Дэви, а не на Петрова. Желая найти лишнее подтверждение своему представлению о значительной роли химических реакций при генерации света в вольтовой дуге, П. Н. Яблочков в поисках дальнейшего усовершенствования своей электрической горелки изобрёл свечу, в которой действительно главным источником световой энергии являлась энергия химического средства.

«Стержень из железной проволоки окружён слоем магнезии с хлорокисью магния. Если два такие карандаша расположить один против другого так, чтобы между концами их образовалась вольтова дуга, то накалённое добела железо восстанавливает из окиси магний, который, сгорая с сильным блеском, дает железнокислую магнезию. Такая свеча сгорает очень медленно, не более чем на 1 см в час»²⁾.

¹⁾ См. Ж. Р. Ф. Х. О., часть физич., т. 21, стр. 156(1889), или А. Г. Столетов «Собрание сочинений», т. 1, стр. 218.

²⁾ Ж. Р. Ф. Х. О., часть физич., т. 12, отд. 2, стр. 85(1880) — реферат под заглавием «Усовершенствование Яблочковских свечей».

Благодеяние Яблочкова и триумф его «свечи» оказались недолговечными. Яблочков по существу один без помощников работал над «свечой» и над всей системой электрического освещения. Вместе с тем он был душой и фактически техническим руководителем как парижской, так и петербургской акционерных компаний, ему же приходилось составлять проекты и для других городов.

Кроме того, много сил и времени у него отнимала полемика с явными и неявными сторонниками газовых компаний, испуганных перспективой полной замены газового освещения электрическим, и с другими недоброжелательными конкурентами. А последних было много. Все они пытались путём различной лжи, недобросовестных расчётов и прямого искажения действительных фактов доказать одни, что электрическое освещение вообще, а другие, что система Яблочкова, в частности, дороги, опасны, неудобны, нецелесообразны и т. д. Об этих нападках Яблочков красочно говорит в Публичной лекции. А между тем Эдисон в совершенно других условиях, имея в своём распоряжении и лабораторию и помощников, и средства, упорно работал над той лампой накаливания, которую Яблочков не признавал. И хотя первые известия об успехах Эдисона многие считали американским блёфом¹⁾, подчеркивая, что изобретательность Эдисона сдана на откуп акционерной компании; Эдисон заявлял один патент за другим и непрерывно улучшал лампу накаливания. Достигнув определённой стадии совершенства, эта лампа начала свое победоносное распространение по всему свету, имея за собой мощный американский капитал. Применение лампы Эдисона было проще применения свечи. Она была долговечнее, допускала более мелкое «деление света». И она победила вольтовую дугу на широком фронте. Впоследствии, благодаря использованию идеи и патента другого крупного русского изобретателя А. Н. Ладыгина о применении металлических нитей из вольфрама и других тугоплавких металлов в вакууме²⁾, лампа накаливания совсем вытеснила вольтовую дугу и другие газоразрядные источники света с арены общего освещения. Лишь в наши дни за самое последнее время у лампы накаливания появился новый серьёзный конкурент в лице ртутной газоразрядной лампы низкого давления с использованием фосфоресценции нанесённых на внутреннюю поверхность стеклянной трубки этой лампы так называемых люминофоров. Усовершенствованные за последние годы в Америке лампы этого типа имеют значительно лучшие показатели, чем лампа накаливания в отношении как экономичности ламп, так и их цветности. В 1941 г. лампы этого рода производились в Америке уже в количестве десятков миллионов штук.

1) См. Труды Отд. физич. наук Общества любителей естествознания, т. 1, вып. 1, стр. 17, пункт 6 протокола засед. 17/III 1880 г. и стр. 18 пункт 5 протокола засед. 29/IV 1880 г.

2) Американский патент Ладыгина 1890 г., купленный у него американской Всеобщей Компанией Электричества (General Electric Company) в 1906 г.

Свеча Яблочкова уступила свое место не только лампе накаливания. В течение ряда лет лампы накаливания ещё не были настолько усовершенствованы, чтобы заменить вольтовую дугу в тех случаях, когда требовался мощный источник света. Но одновременно с лампой Эдисона появились и более совершенные, чем прежде, регуляторы вольтовой дуги. Есть основание утверждать, что в техническом и экономическом отношении свеча Яблочкова могла бы бороться и с этими конкурентами или во всяком случае существовать наряду с ними. Но несмотря на все свои успехи П. Н. Яблочков стоял одиноко среди враждебных ему технических кругов, особенно заграничных. При первых неудачах русские капиталисты отшатнулись от него, вместо того, чтобы поддержать русского изобретателя в трудную для него минуту. А без денежной поддержки ничего нельзя было сделать. В отношении роли различных факторов в истории свечи Яблочкова характерно свидетельство крупного французского электротехника и дельца Ипполита Фонтена. В книге «Электрическое освещение на выставке 1889 года» Фонтен пишет:

«Применение трансформаторов к свече Яблочкова. «Общество Электрического Освещения» (*Société d'Éclairage Électrique*) впервые выставило автоматический подсвечник Бобенрита (*M. Bobenrieth*), а также показало применение трансформаторов для питания свечей Яблочкова. Подсвечник Бобенрита позволяет присоединять несколько свечей к одной и той же электрической цепи и сжигать целую серию свечей без необходимости делать руками какие-либо переключения... Применение трансформаторов к питанию свечей представляет собой ту особенность, что оно приводит к одновременному осуществлению на практике двух изобретений одного и того же электрика. Действительно, ведь именно Яблочков первый указал принцип и способ применения трансформаторов, так же как он создал и первую электрическую свечу.

Это применение позволяет осуществить значительную экономию в проводах путём питания от одной и той же цепи 16 точек, вместо только 5, как это предельно возможно при обычном непосредственном включении в цепь.

Таким образом, благодаря автоматическим подсвечникам и трансформаторам применение свечи становится вполне приемлемым на практике: установка освещения стоит много дешевле и расходы по эксплуатации значительно снижаются.

Если бы эти два усовершенствования были осуществлены в 1882 г., я, конечно, не дал бы тогда распоряжения потушить великолепное освещение *Avenue de l'Opéra*, и свеча освещала бы сегодня, вероятно, все наши бульвары и большие проспекты». Как бы в чём-то извиняясь, с нечистой совестью, Фонтен добавляет в подстрочном примечании на стр. 136:

«В то время, когда я, в качестве председателя административного совета только что основанного мною тогда общества «*L'Éclairage Électrique*», отдал приказание прекратить освещение *Avenue de*

l'Oréga, истекал срок контракта. Муниципальный совет предлагал нам возобновление на 3 года, но я не согласился на возобновление контракта, так как в это время Общество теряло из этом освещении примерно по 100 франков в день».

В 1882 г. Фонтен не мог не знать о сделанных Яблочковым много раньше предложениях параллельного включения свечей и применения трансформаторов. Поэтому мы имеем полное право заключить, что прекращение освещения Avenue de l'Oréga свечами Яблочкова произошло по его, Фонтена, произволу. При этом нельзя умолчать и о том, что сам Фонтен был одним из электротехников, занимавшихся изобретением дифференциального регулятора дуги. Между тем такой крупный факт, как отказ от освещения Avenue de l'Oréga по способу Яблочкова, не мог не причинить всему делу последнего очень большого вреда, дезориентируя общественное мнение в вопросе о дальнейшей применимости и ценности изобретения Яблочкова.

1879 г. был кульминационным пунктом успехов и благополучия П. Н. Яблочкова. В начале 80-х годов слава свечи Яблочкова, как единственной приемлемой на практике «электрической горелки», начала меркнуть. Спрос на новые осветительные установки по методу Яблочкова и на самые «свечи Яблочкова» начал падать. Дела основанных им акционерных компаний шли всё хуже и хуже. Одновременно пошатнулись и его личные денежные дела, и он снова впал в нужду. Правда, на Всемирной выставке в Париже 1889 г., на которой Яблочков был руководителем Русского отдела в секции электротехники, сияло еще около сотни его «свечей», но это не могло восстановить их бывшей славы и помочь делу. Но и в эти тяжёлые для него времена П. Н. Яблочков не сложил оружия и продолжал заниматься, по мере возможности, осуществлением своих изобретательских мыслей. Только он перенёс центр тяжести своей деятельности в область химических источников электрического тока, а также в область усовершенствования динамомашии переменного тока. На этот период приходится ряд заявленных им привилегий и патентов на специальные, остроумно придуманные гальванические элементы и аккумуляторы, например, элемент с натрием, и на ряд удачных конструкций динамомашии. Ни вольтовой дугой, ни лампой накаливания он больше не занимался. Но без денег на исследовательские работы и массовые испытания он, как и в самом начале своей деятельности, уже более не мог довести ни одного своего старого или нового изобретения до широкого практического распространения. Многолетняя перенапряжённая работа, ряд огорчений, связанных с конечной неудачей, постигшей любимое им дело, и материальные лишения подточили здоровье П. Н. Яблочкова. После возвращения в Россию с Парижской выставки 1889 г., потребовавшей от него много усилий и времени, П. Н. Яблочков почувствовал себя сильно утомлённым, несмотря на ещё нестарый свой возраст. Он оказался серьёзно больным. С ним произошло подряд два удара паралича. Яблочков решил уехать на родину в Сердобский уезд, в отцовскую усадьбу. Здесь он

несколько лет тяжело проболел и скончался 31 (19) марта 1894 г. в г. Саратове, 46 лет от роду. Так оборвалась преждевременно жизнь этого крупного, высокоталантливого русского человека, который очень много сделал для технического прогресса человечества, но при других, более благоприятных, условиях мог бы сделать ещё много больше, если бы его не постигла столь типичная для многих русских изобретателей и передовых людей времён царской России судьба. Отличительными чертами этой судьбы почти всегда были глубокое непонимание со стороны окружающих, отказ в материальной поддержке их больших и полезных начинаний, квалификация последних как «химеры», требование заграничного штампа на крупных, говорящих сами за себя изобретениях. Всё это — на фоне непреодолимой косности, рутины и невежества правящих кругов, а нередко и официальных представителей техники. Тем выше должны мы ценить всё то, чего добился П. Н. Яблочков, самоотверженно отдавший всего себя, всю свою жизнь, пожертвовавший своим материальным благополучием бескорыстному и безграничному служению идее технического прогресса и горячо любимой им родине. С этой самоотверженностью П. Н. Яблочков сочетал крайнюю целеустремлённость всей своей работы, крайнее постоянство и затрату огромной энергии при проработке не только каждого из своих изобретений в целом, но и каждой детали, а также при научной и практической проверке каждой возникшей в его светлой голове мысли. Поэтому его деятельность, протекавшая при очень тяжёлых условиях, представляет собой высокий положительный пример так же и для всех работающих на поприще научного и технического прогресса в нашу, столь благоприятную для развития передовой науки и техники, как никогда в истории человечества, великую Сталинскую эпоху.

PERSONALIA

НЕКРОЛОГИ

БОРИС ПЕТРОВИЧ ВЕЙНБЕРГ

19 мая 1942 г. в Ленинграде скончался один из старейших русских физиков, профессор Борис Петрович Вейнберг.

Б. П. родился в 1871 г. в Петергофе, в семье известного литератора, поэта-переводчика П. И. Вейнберга. Он учился в Петербурге и окончил курс Физико-математического факультета университета в 1892 г. Тогда же им закончена его первая научная работа.

Выдержав магистерские испытания, он становится приват-доцентом Новороссийского (в Одессе) университета, где и протекает его жизнь до 1907 г. За это время он несколько раз ездил в научные командировки за границу, где знакомился с постановкой лабораторного преподавания и сам изучал движение ледников.

Он защитил магистерскую диссертацию «О скорости света» — огромную книгу критико-обзорного характера, а затем и докторскую «О течении льда в ледниках». Последняя надолго — можно сказать до конца жизни — определила его интерес к физике твёрдого тела. Большую часть своей жизни Б. П. отдал Сибири, где был профессором Томского технологического института и где с энтузиазмом занимался геомагнитными исследованиями. Эти геофизические работы привели Б. П. на пост директора Главной физической обсерватории, к работам над арктическими льдами в Арктическом институте, к практическим выводам о прочности ледовых переправ и к другим подобным проблемам — всем понятно их значение в условиях Ленинграда 1941 г.

Покойному принадлежит около 500 работ разного значения и объёма — от заметок до больших книг. Из них многие имеют методический и методологический характер — это тоже один из любимых предметов покойного. Наконец, следует упомянуть и о гелиотехнических работах Б. П. — он, несомненно, был одним из серьёзнейших зачинателей этой новой отрасли техники — энергетики будущего.

К ученикам покойного принадлежит, между прочим, известный русский учёный В. Д. Кузнецов.

Знавшие Б. П. лично с удовольствием вспоминают его всегда остроумную и живую беседу и ряд пушенных им в оборот выражений и «словечек». До самого последнего времени он сохранял и бодрость, и полноту духовных сил; он пал жертвой Ленинградской блокады.

Т. Кравец

ПЁТР НИКОЛАЕВИЧ БЕЛИКОВ

25 декабря 1942 г. после тяжёлой болезни скончался в возрасте 53 лет профессор физики Московского энергетического института П. Н. Беликов, известный своими научными работами в области акустики и своей большой плодотворной деятельностью в области преподавания физики и популяризации научных знаний.

П. Н. родился в 1889 г. в г. Холме, где отец его был учителем гимназии. В 1908 г. П. Н. окончил 2-ю Московскую гимназию и поступил на Физико-математический факультет Московского университета, который окончил в 1913 г. по специальности физики. Ещё будучи студентом, П. Н. начал научную работу в лаборатории проф. П. Н. Лебедева, но начавшаяся война и призыв в армию не позволили ему закончить эту работу. Будучи мобилизованным в период войны 1914 — 1918 гг. П. Н. окончил военную электротехническую школу, после чего был назначен на фронт начальником полевой радиостанции 1-го Сибирского корпуса. После Октябрьской революции П. Н. принял активное участие в работе общественных организаций в армии и был председателем корпусного съезда. После демобилизации в 1918 г. П. Н. возобновляет научную работу в Физическом институте Московского научного института (позднее выделился в Московский энергетический институт, и П. Н. занял в нём кафедру физики. В качестве профессора МЭИ П. Н. работал до последних своих дней, отдавая этой работе все свои силы.



П. Н. Беликов

Одновременно с работой в МВТУ и МЭИ, П. Н. состоял с 1926 г. по 1939 г. профессором 2-го Моск. гос. университета и с 1936 г. по 1939 г. профессором и зав. кафедрой физики на Физическом факультете 1-го Моск. гос. университета.

Научно-исследовательскую работу П. Н. вёл в течение многих лет в Институте биофизики до его ликвидации в 1931 г. С 1931 г. по 1934 г. П. Н. являлся консультантом и научным руководителем в Научно-исследовательском кинофотоинституте (НИКФИ) и затем в Научно-исследовательском институте связи. С 1939 г. он состоял председателем экспертной комиссии по физике при ВАК.

Научные работы П. Н. относятся целиком к области акустики. Возобновив в 1918 г. свою научную работу, П. Н. занялся под руководством акад. Лазарева вопросами теории слуха. Учитывая новые возможности в связи с развитием радиотехники и появлением электронных ламп, П. Н. прежде всего приступил к созданию новых методов измерения в акустике и построению новой аппаратуры. В этот период он разработал основные приёмы измерения силы звука, чувствительности уха, способы получения чистых тонов в широком диапазоне частот, получения прерывистых тонов, получения плоской звуковой волны и ряд других вопросов. Эта большая методическая работа

ее преобразованного в Институт физики и биофизики НКЗдрава), руководимом акад. П. Н. Лазаревым. Одновременно П. Н. начинает педагогическую работу по физике в высшей школе, сперва в качестве преподавателя Высшей школы военной маскировки, затем в Институте связи и с 1920 г. в Московском высшем техническом училище. В 1925 г. П. Н. назначается доцентом и с 1927 г. профессором МВТУ. С 1930 г. из состава МВТУ

позволила чрезвычайно надёжно провести исследования адаптацией слуха, исследования изменений чувствительности слуха под действием различных факторов и исследования восприятия прерывистых тонов. Проведённые исследования привели к подтверждению основных законов ионной теории возбуждения, развитой П. П. Лазаревым. В частности, П. Н. доказал применимость для слуха закона Гальбота, известного из физиологической оптики.

В области физической акустики П. Н. выполнил (1925 г.) весьма интересное исследование ослабления звука при прохождении через среду, заполненную резонаторами. Этот случай имеет большой принципиальный интерес. Теория явления дана была в 1903 г. проф. Н. Н. Кастерным. Результаты очень искусно поставленного, трудного эксперимента привели к хорошему совпадению с теорией и показали резкое усиление поглощения звука от резонансной частоты.

В период работы в НИКФИ под руководством и при непосредственном участии П. Н. сделаны важные для техники звукового кино исследования искажений при восприятии громких тонов и особенностей восприятия периодических изменений силы звука. Кроме того, П. Н. сконструировал параболический концентратор для направленного приёма звука.

П. Н. принимал деятельное участие в работе Акустической комиссии АН СССР и, в частности, провёл большую работу по экспертизе акустического проекта Дворца Советов.

П. Н. много лет вёл очень большую и плодотворную научно-литературную и научно-популяризаторскую деятельность.

Огромная и трудная работа выполнена П. Н., как главным редактором Физического словаря. Этот прекрасный справочник будет на долгие годы служить на пользу нашей науке, технике и учащимся и послужит памятником П. Н., который он создал себе сам.

П. Н. написал несколько больших статей в Техническую энциклопедию (Звук, Громкоговоритель и др.) и большое число малых статей для Технической, Медицинской и Большой Советской Энциклопедий. Им выполнен перевод и редактирование ряда книг по радио и акустике (Вагнер, Основы радиоакустики; Гюнтер, Радио; Энгль, Звуковое кино; Брэгг, Старая техника и новые знания и др.). П. Н. написал ряд отличных обзорных и научно-популярных брошюр и статей (Речь и слух, Телеграф, телефон и радио, Умирающий двигатель, Достижения прикладной акустики др.) и систематически выступал с научно-популярными лекциями и докладами.

П. Н. обладал выдающимся талантом педагога. Его лекции по физике были всегда образцом ясного и строгого изложения и пользовались неизменным успехом у студентов. Организации кафедры физики в МЭИ П. Н. посвятил лучшие годы своей жизни и весь свой опыт педагога и организатора. Физический практикум и лекционные демонстрации, переданные из МВТУ и Института им. Плеханова, были пересмотрены, обновлены и приведены в образцовый порядок. Затем практикумы регулярно пересматривались и обновлялись в связи с новыми требованиями науки и техники.

Огромная работа была проделана П. Н. по проектированию нового здания для физической лаборатории МЭИ и по подготовке его к эксплуатации. При кафедре физики было организовано производство физических приборов, и, в частности, был налажен выпуск таких сложных приборов, как шлейфовые осциллографы.

П. Н. всегда пользовался исключительным авторитетом как среди товарищей по работе и студентов, так и среди руководящих работников. Его знания, беззаветная преданность делу, умение отстаивать интересы порученной ему работы и твёрдо и в то же время без осложнений провести трудные организационные мероприятия, неизменная забота о сотрудниках, его исключительная честность, прямота и чуткость в отношении к людям, наряду со скромностью в отношении самого себя, заставляли всех, кто имел дело с П. Н., относиться к нему с уважением и любовью. Работа П. Н. была

высоко оценена руководящими кругами, и он был награждён Орденом Трудового Красного Знамени. Как выдающийся общественник, П. Н. был два раза сразу выбран депутатом Московского Совета.

После смерти П. Н., подводя итоги его многогранной работе, мы видим, какой большой человек ушёл от нас и как велика понесенная утрата. Память о нём, как о большом самоотверженном работнике и учителе ряда поколений инженеров, долгие годы сохранится среди его учеников. Светлая память о Петре Николаевиче, как о прекрасном человеке и товарище, всегда будет жить в сердцах тех, кто его знал близко.

С. Ржевский

ПЕРЕЧЕНЬ ПЕЧАТНЫХ РАБОТ ПРОФ. П. Н. БЕЛИКОВА

I. Экспериментальные научные работы

1. Субъективный метод сравнения сил звуков, Изв. Физ. инст. МНИ, 1, 103, 1920.
2. Явления утомления органа слуха (совместно с акад. Лазаревым), Изв. физ. инст. МНИ, 1, 1921.
3. Über die Gültigkeit des Talbotschen Gesetzes für das Gehör, Pflüg. Archiv., B. 209, 537, 1933.
4. Über die Wirkung kurzer Töne auf das Ohr, Pflüg. Archiv., B. 209, 540, 1923.
5. Опытное определение ослабления звука, проходящего через среду, заполненную резонаторами, Журн. прикл. физики, 2, 41, 1925.
6. Законы Тальбота для слуха, Журн. прикл. физ., 1, 182, 1924.
7. Восприятие кратковременных тонов, Журн. прикл. физ., 2, 47, 1925.
8. Слияние пульсирующих тонов, Журн. прикл. физ., 5, 127, 1928.
9. Absorption Schallwellen in einem Medium, welches mit Resonatoren gefüllt ist, Zs. Physik, 39, 233, 1926.
10. Über die Verschmelzung der pulsierenden Töne, Journ. d. Psychol. u. Neurol., 38, 292, 1928.
11. О действии хинина на центры зрения и слуха (совместно с акад. Лазаревым), ДАН СССР, № 12, 293, 1930.
12. Восприятие субъективных искажений (совместно с Михеевой и Осколковой), в рукописи, выполнено в НИКФИ, 1933.
13. Восприятие «шероховатости» звука (совместно с Михеевой и Осколковой), выполнено в НИКФИ, в рукописи, 1933.

II. Учебная литература

1. Методические письма по курсу физики для заочников педвузов, для 3 годов обучения, 15 п. л., 1928—1929.
2. Переработка и редактирование курса физики Берлинера (совместно с проф. Ландсбергом), 1931—1932.
3. Редактирование задачника по электричеству и магнетизму Всехсвятского, Малова и Радужкевича, 1932.
- III. Научные обзоры, статьи и научно-популярная литература.
1. Речь и слух, ГИЗ, 1925, 5 печ. л.
2. Звук в технике, Статья в Технич. Энциклопедии, 1927, 1 п. л.
3. Громкоговоритель, статья в Технич. Энциклопедии, 1927, 1/2 п. л.
4. Телеграф, телефон и радио, 1927, 3 п. л.
5. Умирающий двигатель, 1928, 3 п. л.
6. Практические применения пьезоэлектрических свойств кристаллов, Успехи физич. наук, 1927.

7. Физические процессы в электронной лампе, брош., 1 п. л.
8. Колебательный контур и радиопередатчики, брош., 1 п. л.
9. Достижения прикладной акустики, Научн. слово, 1928.
10. Подбор и перевод сборника «Физические проблемы техники звукового кино» (совместно с Фурдуевым), 1932.
11. Перевод книги Гюнтера, Радио.
12. Редактирование книги Вагнера, Научные основы радиоприёма, 1933.
13. Редактирование книги Брэгг, Старая техника и новые знания.
14. Перевод книги Энгль, Звуковое кино.
15. Большое количество мелких статей в Большой Советской, Технической и Медицинской Энциклопедиях.
16. Главная редакция «Физического словаря», с 1933 г. по 1939.
17. Большое количество научно-популярных статей в разных журналах.

ИЗ ТЕКУЩЕЙ ЛИТЕРАТУРЫ

СУРЬМЯНО-ЦЕЗИВЫЕ ФОТОЭЛЕМЕНТЫ ДЛЯ УЛЬТРАФИОЛЕТА

Первое указание на наличие значительной чувствительности сурьмяно-цезиевых фотокатодов в ультрафиолетовой области спектра содержалось ещё в публикации Герлиха¹, приведшего кривую распределения чувствительности по спектру для этих фотокатодов, начиная от красной границы ($\sim 7500 \text{ \AA}$) до границы видимой области.

В дальнейшем, многие авторы², исследовавшие спектральную чувствительность Sb-Cs катодов с помощью монохроматоров, имевших стеклянную оптику, приписали Sb-Cs катодам ход кривой распределения чувствительности, совершенно несходный с указанным Герлихом. Судя по этим данным их чувствительность в ближнем ультрафиолете не должна была бы быть значительной.

В 1939 г. автор настоящей заметки при работе с двойным кварцевым монохроматором (фирмы Кипп) обнаружил, что Sb-Cs фотокатод не дает резкого максимума в области около 4500 \AA и последующего сильного спада чувствительности в сторону коротких волн, но что, наоборот, с обычной лампой накаливания на Sb-Cs фотоэлементе (оба в стеклянных баллонах) можно наблюдать значительные фототоки до $\lambda = 3800 \text{ \AA}$, а в отдельных случаях иметь и заметную чувствительность при $\lambda = 3600 \text{ \AA}$. Поскольку энергия в излучении лампы накаливания в этой области ничтожна, поглощение стекла значительно, а двойное разложение исключает влияние рассеянного света, оставалось предположить, что чувствительность Sb-Cs катодов в этой области длин волн всё ещё весьма велика.

Дальнейшее подтверждение этого было найдено в статье Гловера и Джейнса³, измеривших чувствительность Sb-Cs катода (скрываемого ими под псевдонимом, S-4) фотоэлемента, имевшего также стеклянный баллон, до $\lambda = 3000 \text{ \AA}$. Ход их кривой в коротковолновой части обусловлен поглощением стекла, как это указывали сами авторы.

В 1941 г. автором было предпринято более подробное исследование чувствительности Sb-Cs фотокатодов в ультрафиолете, показавшее, что она простирается не менее чем до $\lambda = 2537 \text{ \AA}$. Основная трудность в этой работе заключалась в том, чтобы создать простейшим способом баллон, прозрачный как можно дальше в ультрафиолетовой области. Для указанной области длин волн это удалось решить весьма простым путём, используя обычные стеклянные колбы с вдавленным тонкостенным окном (рис. 1). Такие окна обладают при малой толщине стекла (удавалось получить толщину стенок до $0,03 \text{ мм}$) вполне достаточной для проведения всех технологических операций прочностью. Эта работа была прервана в связи с войной и возобновлена лишь в 1943 г. в сотрудничестве с А. Е. Меламидом⁴.

На рис. 2 показана спектральная характеристика такого Sb-Cs фотоэлемента. Здесь ход кривой в коротковолновой части обусловлен также поглощением стекла. Как следует из хода спектральной характеристики,

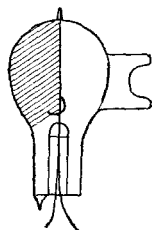


Рис. 1.

квантовый выход для Sb-Cs катодов и в ультрафиолете составляет 2—3 десятка процентов. Это обстоятельство, наряду с простотой изготовления таких

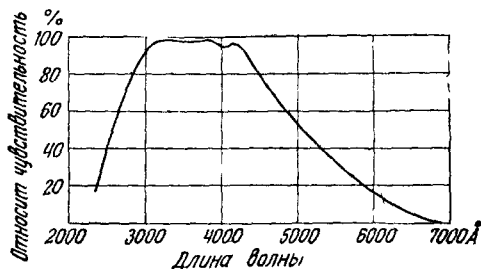


Рис. 2.

фотоэлементов (идентичной с изготовлением (бычных Sb-Cs фотоэлементов) и большим постоянством чувствительности (Sb-Cs фото-катоды почти не обнаруживают утомления и при работе в ультрафиолете) делает их, по нашему мнению, весьма полезным и удобным прибором при различного рода исследованиях, связанных с наблюдением и измерением ультрафиолетового излучения, в высшей степени просто и удачно восполняя су-

ществовавший здесь пробел в хорошем фотоэлектрическом индикаторе.

Н. Хлебников

ЛИТЕРАТУРА

1. P. Gorlich, Z. Physik, **101**, 335, 1936.
2. См. например С. Ю. Лукьянов, Журнал технич. физики, **9**, 1175, 1939; А. М. Гуревич, Журнал технич. физики, **10**, 943, 1940.
3. A. M. Glover a. R. B. Janes, Electronics, Aug, 1940.
4. Н. С. Хлебников и А. Е. Меламид, Журнал технич. физики, 1945 (в печати).

ИНОСТРАННАЯ БИБЛИОГРАФИЯ ПО ФИЗИКЕ *)

- Appa R. W., *Intermediate practical physics*. Kitabistan, 1943, 337 p. Rs. 4—8.
- Barnes B. B. & others, *Infrared spectroscopy, industrial applications and bibliography*. Reinhold, 1944, 236 p., Dol. 2. 25.
- Blackwood O. H., *General physics*. Wiley, 1943, 622 p. ill. Dol. 3. 75.
- Born M., *Experiments and theory in physics*. Cambridge U. P. 1943, 44 p. Sh. 2.
- Burns E. E. & others, *Physics*. Van Nostrand, 1943, 656 p. il. Dol. 1. 80.
- Clark J. A. & others, *Physics of to-day*. Houghton, 1943, 686 p. il., col. pl. Dol. 2.
- Cox A., *Optics, the technique of definition. (Manual of phototechnique.)* 2nd ed. Transatlantic. 1944, 334 p., Dol. 4. 50.
- Das M. M., *Experimental electricity*. 2nd ed., 2 pts. Pt. 1, English Univ., 1943, 352 p. il. Sh. 4/6.
- Dingle H., *Sub-atomic physics*. Ronald, 1943, 272 p. 147 figs. Dol. 2. 25.
- Dull C. E., *Modern physics*. Rev. ed. Holt, 1943, 598 p. il. col. pl. Dol. 2.
- Goldberg L. & Aller L. H., *Atoms, stars and nebulae*. Blakiston, 1943, 323 p., 150 il. Dol. 2. 50.
- Harrison G. R., *Atoms in action*. Rev. ed. Garden City Pub. 1944, 401 p. pl. Dol. 1. 49.
- Hatschek P., *Electron-optics*, Tr. by A. Palme. Amer. Photographic Pub. 1944, 161 p., il. Dol. 3.
- Hector L. G. & others, *Electronic physics*. Blakiston, 1943, 355 p., Dol. 3. 75.
- Holm R., *Die technische Physik der elektrischen Kontakte*. Edwards, 1944, 347 p., Dol. 9.
- Jeans J., *The universe around us*. 4th ed. Cambridge. 1944, Sh. 15/—.
- Johnson W. H. & Newkirk L. V., *Fundamentals of electricity*. Macmillan, 1943, 212 p. il. Dol. 2.
- Lemon H. B. & Ference M., *Analytical experimental physics*. Cambridge U. P., 1944, 584 p. il. Sh. 34/6.
- Luhr O., *Physics tell why*. Cattel, 1943, 318 p. Dol. 3. 50.
- Lynde C. J., *Everyday physics*. Reissue. Macmillan. 1943, 577 p. il. Dol. 2. 56.
- Manley R. G., *Fundamentals of vibration study*. Wiley, 1944, 140 p. Bibl. diagrams. Dol. 2. 75.
- Mills J., *Electronics to-day and to-morrow*. Van Nostrand, 1944, 178 p. il. Dol. 2. 25.
- Pringsheim P. & Vogels M., *Luminescence of liquids and solids*. Interscience. 1943, 201 p. Dol. 4.
- Ramo S. & Whinnery J. R., *Fields and waves in modern radio*. Wiley, 1944, 512 p. bibl. diagrs. Dol. 5.
- Riehl N., *Physik und technische Anwendung der Lumineszenz*. Edwards, 1944, 275 p. (bibl.) il. Dol. 5. 40.
- Sandell E. B., *Colorimetric determination of traces of metals*. Interscience. 1944, 487 p. (bibl.) il. Dol. 7.

*) Составлено по материалам Книжного отдела АН.

- Sawyer R. A., Experimental spectroscopy. Prentice-Hall, 1944, 331 p. il. diags. Dol. 5.
- Scheikunoff S. A., Electromagnetic waves. Van Nostrand, 1943, 530 p. Dol. 7. 50.
- Seitz F., Physics of metals. McGraw Hill, 1943, 230 p. Dol. 4.
- Small S. A. & Collins V. D., Simplified physics. Dutton, 1943, 428 p. Dol. 3.
- Stewart O. M., Physics. 4th ed. Ginn, 1944, 785 p. il. Dol. 4.
- Stott R. W., Electronic theory and chemical reactions. Longmans, 1943, 112 p. Sh. 6/—.
- Taffel A., Vizualized physics; incl. an introduction to aviation physics. New ed. Oxford Bk. 1943, 370 p. il. 68 c.
- Taylor L. W., Fundamental physics. With the collab. of F. G. Tucker. Houghton, 1943, 662 p. il. Dol. 4.
- Vilbig F., Lehrbuch der Hochfrequenztechnik, Edwards, 1944, 794 p. (bibl.) il. Dol. 14. 25.
- Wahlstrom E. E., Optical crystallography. Wiley, 1943, 206 p. il. Dol. 3.
- White M. W., ed. Practical Physics. McGraw Hill. 1943, 365 p. 239 il. Dol. 2. 50.
- Wood A., Physics of music. Methuen. 1944, 255 p. il. Sh. 21/—.
- Zemansky M. W., Heat and thermodynamics. 2nd ed. McGraw Hill, 1943, 390 p. Dol. 4.

Редактор Э. В. Шполь.

Подписано к печати 14/IV 1945 г. 8,
Тираж 3000 экз. А.

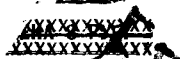
Н. А. Тумаркина.

4-авт. л. 52,000 тип. зн. в печ. л.
р. Заказ № 3492.

Опечатка

Стран.	Стрбка	Напечатано	Должно быть	Чья вина
18	5 сверху	апреле	марте	Ред.

УФН т. XXVII, вып. 1



СОДЕРЖАНИЕ

Э. В. ШПОЛЬСКИЙ

Пётр Петрович Лазарев	1
---------------------------------	---

Т. П. КРАВЕЦ

Творческий путь академика П. П. Лазарева	13
--	----

А. И. АЛИХАНОВ и А. И. АЛИХАНЯН

Новые данные о природе космических лучей	22
--	----

А. П. ГРИНБЕРГ

Ускорение электронов с помощью электромагнитной индукции (бета- трон Керста)	31
---	----

Е. А. НЕПОМНЯЩИЙ

Результаты исследования шума пропеллера	72
---	----

Э. В. ШПОЛЬСКИЙ

Электрооптические свойства коллоидов	96
--	----

С. И. ВАВИЛОВ

Творческая работа Государственного оптического института	106
--	-----

ИЗ ИСТОРИИ НАУКИ

Павел Николаевич Яблочков (Н. А. Ханцов)	111
--	-----

PERSONALLA

Б. П. Вейнберг (некролог)	131
-------------------------------------	-----

П. Н. Белчиов (некролог)	13
------------------------------------	----

ИЗ ТЕКУЩЕЙ ЛИТЕРАТУРЫ

Сурьмяно-цезиевые фотоэлементы для ультрафиолета (Н. Хлебников)	13
---	----

БИБЛИОГРАФИЯ

Иностранная библиография по физике	13
--	----