

*Визит*

# УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК

---

ПОД РЕДАКЦИЕЙ  
Э. В. ШПОЛЬСКОГО

ТОМ  
XXXVII  
ВЫПУСК 3  
МАРТ

ГОСУДАРСТВЕННОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО  
ТЕХНИКО-ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ  
МОСКВА 1949 ЛЕНИНГРАД

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

**С. И. ВАВИЛОВ, Д. И. БЛОХИНЦЕВ,  
В. И. ВЕКСЛЕР, С. Т. КОНОБЕЕВСКИЙ,  
Э. В. ШПОЛЬСКИЙ** — редактор

---

«Успехи физических наук» — журнал, посвящённый обзорам современного состояния наиболее актуальных проблем физики и смежных с нею наук. Предназначается для научных работников, аспирантов, студентов-физиков старших курсов, преподавателей.

Выходит 12 раз в год.

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

## УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК

### АРХИТЕКТУРНАЯ АКУСТИКА В СССР

*Н. Н. Андреев, В. С. Григорьев, И. Г. Лейзер,  
Л. Д. Розенберг, Б. Д. Тартаковский*

К областям знания, возникшим у нас после Великой Октябрьской революции, надлежит отнести и архитектурную акустику; до революции её практически не существовало.

Немногочисленные и разрозненные статьи по различным вопросам архитектурной акустики, которые печатались в России до революции, не являются самостоятельными и не представляют интереса. Первые годы после революции, сопровождавшиеся интервенцией, переполненные экономическими трудностями, оставленными нам в наследство царским режимом, также не благоприятствовали развитию у нас архитектурной акустики; оживление в этой области началось только в связи с первой пятилеткой, поставившей перед страной высокие задачи весьма разнообразного содержания, в том числе и задачи архитектурно-акустические, естественно вытекавшие из требований намеченного строительства общественных и служебных зданий. Стоит поэтому оглянуться на пройденный нами путь, оценить полученные результаты и попытаться сформулировать дальнейшие линии развития.

С этой целью мы и составили настоящий обзор, который, надеемся, пригодится историку советской науки, но который мы и сами не считаем окончательным; для этого у нас не было ни времени, ни, может быть, достаточно полных материалов. Мы просим поэтому читателей присылать нам свои замечания и дополнения через редакцию.

В процессе работы мы консультировались с рядом лиц, работающих в этой области; всем им мы выражаем нашу искреннюю благодарность.

### АКУСТИКА ПОМЕЩЕНИЙ

Интерес к акустике помещений не нов: ею интересовались уже архитекторы и учёные древности, и с тех пор интерес этот непрерывно возрастал, особенно в связи с постоянно обнаруживавшимся,

иногда нетерпимо плохим акустическим качеством больших помещений. Примером такого акустически-неудовлетворительного помещения является, например, Кельнский собор (начат в 1248 г. и окончен в XIX столетии), реверберация в котором длится около 10 секунд, в результате чего на сколько-нибудь значительном расстоянии от проповедника нельзя разобрать почти ни слова. Другим примером весьма плохой акустики являлся храм Христа-Спасителя, стоявший в дореволюционные времена на месте, предназначенном ныне для Дворца Советов. Параллельно с этим были и помещения, чрезвычайно удачные в акустическом отношении, например, бывшее «Благородное собрание», ныне Дом Союзов.

Выделить из хаоса звуковых явлений, возникающих в помещении, где раздаются речь или музыка, те, которые определяют звуковые качества помещения, оказалось нелегко. Это удалось только в 1898 г. американскому профессору физики У. К. Сэбину, уточнившему понятие реверберации и установившему связь реверберации с акустическими качествами помещения и параметрами, определяющими в основном эти его качества. Однако значение работы Сэбина было оценено не сразу; лишь постепенно она проникала в среду архитекторов и учёных и только в первое десятилетие XX века получила достаточно широкое признание. Поэтому будет правильным относить начало современной архитектурной акустики к 1898 г.

Перейдём теперь к развитию архитектурной акустики в нашей стране. Интерес к ней в дореволюционной России несомненно был, но, насколько мы смогли установить, только у архитекторов и строителей<sup>1,2,3,4,5,6,7,9</sup>. По приведённому (вероятно, неполному) в нашей библиографии списку работ это хорошо видно. Интерес к архитектурной акустике в среде физиков был весьма незначителен; мы нашли упоминание об архитектурной акустике только в обзоре В. Д. Зёрнова (1918)<sup>10</sup> в следующей фразе: «известно, что заранее при постройке аудитории или концертного зала очень трудно предвидеть, какова будет акустика этого помещения. Если зал не удаётся в акустическом отношении, то, регулируя время гула (помещением в зале особых резонаторов\*) или, напротив, занавесей, поглощающих звук), можно, повидимому, исправить этот недостаток».

Потребности возрождающейся страны, строительство радиовещательных студий, больших помещений общественного пользования уже с 1920 г. выдвинули перед советской физикой ряд задач, интереснейших не только по своему прикладному значению, но и с точки зрения физики; с этого времени и начинается современная архитектурная акустика в нашей стране.

Первые работы по архитектурной акустике в Советском Союзе относятся к 1920—1921 гг. Инициатором и руководителем их был

---

\*) Здесь мы встречаемся с идеей, позднее детально разработанной Н. Ржевскими.

С. Я. Лифшиц. Работы проводились в Физическом институте Московского университета, в Государственном институте музыкальной науки с привлечением студентов архитектурного факультета Высших государственных художественных Мастерских (ВХУТЕМАС). В процессе этих работ С. Я. Лифшицем была построена первая в России аппаратура для измерения времени реверберации и были произведены обмеры ряда московских театральных и концертных зал<sup>12,15,16</sup>.

В 1923 г. был выпущен (на гектографе) конспект по курсу архитектурной акустики, читавшемуся С. Я. Лифшицем в ВХУТЕМАС<sup>13</sup>. Это был один из первых (а может быть и первый) в мире учебник по архитектурной акустике; несмотря на его несовершенства в толковании физической стороны архитектурно-акустических явлений, эта и последующие книги С. Я. Лифшица сыграли значительную и полезную роль в развитии нашей архитектурной акустики.

Приблизительно в это же время (15 сентября 1922 г.) начала работать Московская радиотелефонная станция<sup>11</sup>. Комната, из которой проводилась радиопередача, была обработана бархатными коврами. Это была первая советская радиостудия; акустическая отделка её материей была выполнена И. А. Зейтленком, работавшим по существу эмпирически.

Дальнейшие работы С. Я. Лифшица были направлены в область определения оптимума реверберации. Делая определённые предположения, касающиеся психофизиологии восприятия звука, Лифшиц получил аналитическую зависимость между объёмом помещения и оптимумом реверберации<sup>17,18,25</sup>.

Две константы, входящие в это уравнение, он определил, исходя из экспериментально установленного оптимума реверберации в небольших помещениях, с одной стороны, и из времени реверберации Колонного зала Дома Союзов в Москве (считая его совершенным в акустическом отношении), с другой стороны. Полученная таким образом формула дала неплохое совпадение с результатами экспериментального обследования ряда зал.

Впервые эта работа была доложена 15 февраля 1923 г. и была одной из ранних среди работ на эту тему. После этого в архитектурной акустике наступило затишье, продолжавшееся до 1929—1930 гг. В течение этого перерыва выходит лишь второе издание Курса архитектурной акустики С. Я. Лифшица<sup>28</sup>.

Во время первой Сталинской пятилетки началось бурное строительство радиовещательных станций и звуковых кинотеатров и киностудий. В литературе начинает появляться ряд популярных статей по акустике помещений. Начинается развитие советской архитектурной акустики в различных отраслевых лабораториях. После ряда организационных перестроек центром студийной акустики становится Лаборатория акустики Научно-технического управления НКПиТ (И. Г. Дрейзен, С. Т. Тер-Осипянц, Ю. М. Сухаревский).

При помощи более совершенной измерительной аппаратуры было проведено обследование ряда московских студий, причём измерялось не только время реверберации, но и его частотная зависимость, форма кривой спада звука и равномерность звукового поля студий.

В результате ряда проведённых экспериментальных работ в 1931 г. выпускаются «Руководящие указания по устройству и эксплуатации радиостудий»<sup>60</sup>.

В 1930 г. появляются две работы М. В. Мачинского<sup>42, 43</sup>, посвящённые теории реверберации, в которых он пытается получить формулу реверберации путём, представляющим собой нечто среднее между обычной статистической теорией и точным волновым рассмотрением. Однако, благодаря сложному и громоздкому изложению и ряду мало обоснованных допущений, работы эти не оказали влияния на дальнейшее развитие архитектурной акустики, хотя в них содержится ряд интересных идей. К этому времени относятся также начало работ по архитектурной акустике в Ленинградском электро-техническом институте им. В. И. Ульянова-Ленина (ЛЭТИ), Центральной радиолaborатории (ЦРЛ, Ленинград), Акустической лаборатории Всесоюзного электротехнического института (ВЭИ), в Государственном физико-техническом институте (ГФТИ, Ленинград), Киевской киностудии и некоторых других местах.

Во всех указанных лабораториях строилась измерительная аппаратура, разрабатывались методы архитектурно-акустических измерений и проводились экспериментальные обмеры существующих и строящихся радиостудий, звуковых кинотеатров и студий звукового кино.

В конце 1931 г. в ГФТИ была созвана I Всесоюзная акустическая конференция, на которой впервые встретилось большинство лиц, работавших в области архитектурной акустики<sup>57, 58, 59</sup>. Кроме информации о текущих работах, на конференции было доложено несколько оригинальных работ в области архитектурной акустики. Так, С. Я. Лифшиц<sup>72</sup> распространил свою формулу для оптимальной реверберации на случай радиостудий и звуковых кинотеатров. Л. Д. Розенберг<sup>76</sup> ввёл понятие суммарной реверберации, понимая под этим процесс затухания звука в двух помещениях, связанных между собой односторонней электроакустической связью. Примером таких помещений могут быть киностудия — кинотеатр, радиостудия — помещение для прослушивания радиопередач и т. д. Были выведены формулы, показывающие неэкспоненциальность суммарной реверберации и зависимость её от ревербераций первичного и вторичного помещений. Указанная работа, являясь первой в этой области (аналогичная американская работа Хилла была опубликована на полгода позже в июльском номере журнала Американского акустического общества за 1932 г.), послужила толчком для целой серии последующих исследований. Здесь следует упомянуть работы М. А. Сапож-

кова<sup>78,79,106,107</sup> (1932 — 1934 гг.), рассмотревшего независимо от Эйринга случай двух помещений с акустической связью, А. И. Индлина и А. Н. Качеровича<sup>110, 111</sup> об оптимальных условиях в звуковых киностудиях и звуковых кинотеатрах (1935 г.) и, наконец, заметку Л. Д. Розенберга<sup>169</sup> о восприятии суммарной реверберации при обычной и стереофонической передаче.

Следующая линия работ, получившая развитие в исследованиях советских акустиков, — это совокупность важных вопросов о связи между физическими параметрами звука и характером его восприятия человеческим ухом, в особенности в условиях одноканальной передачи. Сюда относятся работы С. Я. Лифшица<sup>89—91</sup>, касающиеся так называемой протяжённости и громкости звукового импульса. В этих работах экспериментально показывалось, что ухо является баллистическим инструментом, интегрирующим в определённых пределах интенсивность звука. Исходя из этих результатов, С. Я. Лифшиц получил частотную зависимость оптимума реверберации, удовлетворительно согласующуюся с экспериментальными наблюдениями<sup>98, 131, 132</sup>.

Несколько позднее, после появления работ Г. Бекеша, в которых доказывалось, что для помещения размером до 2000 м<sup>3</sup> оптимальная реверберация не должна зависеть от частоты, С. Я. Лифшиц<sup>163</sup> произвёл экспериментальное сравнение двух помещений объёмом по 100 м<sup>3</sup> каждое, оборудованных по Бекешу и по Лифшицу. Прослушивание, проведённое экспертизой специалистов-музыкантов, показало небольшое преимущество выбора частотной зависимости оптимальной реверберации по Лифшицу.

Большое развитие радиовещания, рост количества студий и разнообразие характера радиопередач поставили ряд вопросов, связанных с правильной эксплуатацией студий. Для изучения этих вопросов при Московском радиотехническом узле была создана научно-исследовательская группа; работы этой группы были изложены в книге А. В. Рабиновича и Г. А. Гольдберга «Радиофония»<sup>113</sup>. А. В. Рабинович исследовал так называемый «эффект расстояния» в радиостудиях<sup>104</sup>, заключающийся в том, что при отдалении или приближении источника звука по отношению к микрофону в радиостудии у слушателя получается впечатление, отличное от того, которое получается при непосредственном слушании. Г. А. Гольдберг<sup>218</sup> изучал «эффективную реверберацию» в радиостудиях, являющуюся одной из основных причин эффекта расстояния. Он осциллографировал кривые затухания звуковой энергии в радиостудиях при различных расстояниях между источником звука и микрофоном, и показал, что в таких условиях кривая затухания звука состоит из двух частей: из скачка, обусловленного прекращением прихода прямых звуков, и экспоненциального спада, вызванного реверберацией студии. С увеличением расстояния между источником звука и микрофоном величина скачка уменьшается, а общий ход кривой приближается к классическому случаю.

В работе И. Г. Дрейзена<sup>158</sup> исследовалось изменение отношения энергий прямого и реверберирующего звуков, необходимое для того, чтобы слушатель (через микрофон) ощутил изменение тембра. Эта величина оказалась равной 6 дб для речи и пения.

Следующие интересные работы этого направления были выполнены Г. А. Гольдбергом и С. Т. Тер-Осипяцем в организованной в 1934 г. Центральной лаборатории Грампластреста, впоследствии преобразованной в Центральную лабораторию Дома звукозаписи, а затем во Всесоюзный научно-исследовательский институт звукозаписи (ВНИИЗ). Учреждения эти были созданы и поставлены на большую высоту И. Е. Гороном. Блестящий организатор и крупный инженер с большими знаниями и опытом в практической акустике, он сыграл и продолжает играть большую роль в развитии у нас звукозаписи; многие и весьма удачные решения архитектурно-акустических вопросов, возникших при постройке Дома звукозаписи, принадлежат ему.

Работы Гольдберга и Тер-Осипяца касались восприятия реверберации. В первой части экспериментов<sup>120</sup> изучалось восприятие экспоненциально затухающих звуковых импульсов. Результаты сравнения импульсов с различными начальными уровнями громкости показали, что восприятие скорости затухания (т. е. реверберации) не зависит от начального уровня и что порог различия реверберации пропорционален самой реверберации. Эти результаты не подтверждают гипотезы С. Я. Лифшица, выдвинутой им для объяснения зависимости оптимальной реверберации от объекта.

Во второй части экспериментов<sup>156</sup> Г. А. Гольдберг и С. Т. Тер-Осипяц производили сравнение на слух двух реверберационных процессов — обычного и со скачком, получающимся вследствие выключения источника прямых звуковых лучей. Наблюдатель путём сравнения устанавливал реверберацию (без скачка), дающую то же слуховое впечатление, что и процесс со скачком. Оказалось, что ни скорость затухания, ни одинаковое интегральное действие затухающего импульса, ни одинаковое время звучания не являются признаками, по которым ухо устанавливает схожесть двух процессов. Из большого количества опытов удалось установить, что два процесса, различным образом затухающие, звучат одинаково, если они проходят через одинаковый уровень в момент времени 0,1—0,3 сек. после начала затухания. Это положение справедливо в том случае, если величина скачка не превышает 17 дб. В противном случае процесс со скачком не может быть сделан схожим (на слух) с нормальным процессом затухания.

В третьей части<sup>183</sup> сравнивались затухающие процессы различных частот. При этом была установлена независимость восприятия реверберации от частоты, что опровергает гипотезу С. Я. Лифшица и Макнейра, выдвинутую ими для объяснения зависимости оптимума реверберации от частоты.

Наконец, испытывалась заметность импульса на фоне плавной кривой спадания звука той же частоты.

Приходится выразить сожаление по поводу того, что эти работы до сих пор не опубликованы и поэтому известны лишь сравнительно небольшому кругу акустиков.

В помещениях, в которых звук воспроизводится электрически, на характере звучания, кроме свойств помещения, сказываются также и свойства звукового источника, в частности, его направленность. Поэтому, естественно, возник вопрос о критериях оценки акустических свойств озвученных помещений. В. В. Фурдуев<sup>172, 173</sup> предложил в качестве такого критерия так называемое «акустическое отношение», представляющее собой отношение плотности энергии, образованной совокупностью всех отражённых волн, к плотности звуковой энергии в прямой волне. Однако последующий эксперимент не подтвердил этого положения. А. В. Рабинович<sup>343</sup> и Ю. М. Сухаревский<sup>305</sup> предложили использовать для этой цели уточнённое «акустическое отношение», или фактор реверберационных помех, представляющий собой отношение всех «вредных» отражений к полезным. При этом полезными отражениями считаются те, которые приходят к уху слушателя с запозданием не более 60 м/сек (в том числе и прямой звук), а вредными — всё то, что приходит с большим запозданием.

Экспериментальные исследования в общем подтвердили наличие соответствия между этой величиной и разборчивостью речи, хотя вопрос ещё нельзя считать окончательно решённым.

А. В. Рабинович<sup>197</sup> изучил вопрос о заметности эхо и его влиянии на разборчивость речи. Он экспериментально определил условия заметности эхо на открытом воздухе, т. е. при отсутствии каких-либо других отражений, кроме исследуемого, и процент изменения артикуляции, возникающий при наличии эхо.

Другое направление работ, развиваемое советскими акустиками, относилось к области чисто физических процессов, связанных со звуковыми полями в закрытых помещениях. Наиболее ранней следует считать статью известного русского искусствоведа В. В. Стасова<sup>1</sup> о «голосниках», т. е. о сосудах, которые вмазывались в стены церквей, образуя небольшие пространства, связанные с основным объёмом помещения.

В наше время этим вопросом занимались С. Н. Ржевкин<sup>139, 141, 196, 243</sup> и И. Верховская<sup>119</sup>.

Наиболее ранней является работа И. Н. Верховской, выполненная ею (как это следует из предисловия редактора сборника) в 1932 — 1933 гг. под руководством покойного П. Н. Беликова. В самой работе есть указания на то, что сам П. Н. Беликов занимался этим вопросом ещё в 1926 г.

В этой работе, повидимому впервые, не только сказано, но и экспериментально доказано, что резонаторы (в частности, применявшиеся в русских церквях XI — XVII веков голосники) могут

как увеличивать реверберацию помещений, так и уменьшать её, и что в большинстве случаев голосники применялись именно для уменьшения реверберации, т. е. в качестве звукопоглощающих конструкций.

И. Н. Верховская приводит также небезынтересные сообщения историко-археологического порядка. Дело в том, что голосники в церквях применялись лишь в течение XI—XVII веков. И. Н. Верховская считает, что до XI века, когда церкви строились деревянными и небольших размеров, реверберация в них была невелика, и не было необходимости применять специальные устройства для её уменьшения. Это понадобилось лишь тогда, когда появились большие каменные церкви.

Начиная же с XVII века, когда появилась богатая церковная утварь, количество звукопоглощения возросло, и надобность в голосниках вновь отпала.

С. Н. Ржевкин впервые рассмотрел звуковой процесс в случае большого объёма, связанного с несколькими малыми объёмами, и показал, что далеко не всегда наличие таких примкнутых к основному объёму резонаторов приводит к увеличению времени реверберации, как это предполагалось ранее. В целом ряде случаев резонаторы вместо того, чтобы запастись звуковой энергией и отдавать её потом в помещение, могут отсасывать некоторое количество энергии, не отдавая его обратно, и таким образом уменьшить время реверберации. С. Н. Ржевкин развил эти идеи в виде так называемых резонансных поглотителей; работы его в этом направлении, весьма интересные и имеющие большое практическое значение, изложены им в составленном им самим обзоре<sup>402</sup>, почему мы и нашли возможным остановиться здесь на них только вкратце.

Следует далее отметить работы Г. А. Чигринского, к сожалению, погибшего во время блокады Ленинграда. Будучи архитектором и не владея, следовательно, привычными физическими методами, он тем не менее сумел дать ряд оригинальных работ по лучевой трактовке вопросов реверберации. Методом, впервые предложенным Цвиккером и Костеном и заключающимся в развёртывании всех последовательных отражений звукового луча в прямую линию (Г. А. Чигринский<sup>265</sup> пришёл к этому методу самостоятельно), он рассмотрел «картины отражений», как он их удачно назвал, в прямоугольных помещениях с учётом неравномерного распределения поглощения. Полученные им результаты позволили количественно изучить влияние соотношений размеров поглощения, влияние размещения поглощающих материалов и влияние проёмов в стенах помещения на реверберацию. Однако наиболее интересными результатами явилась возможность количественного подсчёта реверберации незамкнутых пространств.

В следующих своих работах<sup>266, 267</sup> он расширил свои результаты на случай непрямоугольных, но заполняющих пространство многогранников.

В своих работах Чигринский, так же как и все предыдущие наши и зарубежные исследователи, исходил из предположения, что в точке приёма нужно суммировать энергию звуков, пришедших в результате отражения с разных сторон. Другими словами, он пренебрегал явлениями интерференции. Впервые на условность такого предположения, повидимому, обратил внимание М. В. Мачинский в упомянутых выше своих работах, но экспериментальное подтверждение этого допущения было дано Л. Д. Розенбергом<sup>371</sup>, который исследовал интерференционное поле источников, расположенных в виде прямолинейной правильной цепочки. Измеряя распределение звукового давления на некотором расстоянии от цепочки, Л. Д. Розенберг показал, что в случае когерентного излучения элементов цепочки, например, при монохроматическом звуке, действительно получается резко выраженное устойчивое интерференционное поле, пики и провалы в котором могут отличаться на 25 — 30 дБ. В случае же излучения некогерентного шума или музыки интерференционное поле практически отсутствует, и сила звука в различных точках поля отклоняется от среднего значения на 0,5 — 1,0 дБ, что даёт право производить энергетическое суммирование приходящих из различных направлений звуковых волн.

В последующих своих работах Л. Д. Розенберг<sup>368, 369, 370</sup> рассмотрел поля, образованные так называемыми распределёнными системами излучателей, понимая под последними такие системы, при применении которых звуковое поле в какой-либо точке озвучиваемого пространства создаётся суммой звуков, приходящих от большого числа излучателей данной системы. Полученные им результаты, во-первых, позволили рационально подойти к проектированию таких распределённых систем, а во-вторых, пользуясь методом фиктивных источников и заменяя звуковой процесс в замкнутом помещении бесконечным полем фиктивных источников, Л. Д. Розенбергу удалось решить ряд задач архитектурной акустики, не решённых ранее. Из полученных им формул известные выражения Милингтона, Эйринга и т. д. вытекают как частные случаи. В частности<sup>405</sup>, им было получено следующее простое правило для наиболее рационального (с точки зрения получения наибольшего эффекта) размещения звукопоглощающего материала в закрытом помещении: сумма звукопоглощений по каждому из трёх основных направлений прямоугольного помещения должна быть величиной постоянной.

Однако пользование методом фиктивных источников правомерно лишь в случае полностью отражающих поверхностей, т. е. в практически наименее интересных случаях. При поглощающих поверхностях, вообще говоря, поле отражённых звуков не может быть представлено как исходящее от фиктивного источника. В своём капитальном обзоре по архитектурной акустике американские физики Ф. Морз и Р. Болт, пропагандируя разработанную ими волновую теорию акустики помещений, отказались даже от рассмотрения всех

работ, базирующихся на методе фиктивных источников. Но Л. М. Бреховских<sup>409, 410</sup> показал неосновательность такого мнения и дал точные критерии для величины ошибки, получающейся при использовании метода фиктивных источников. Полученные им результаты показывают, что в огромном большинстве реальных помещений применение метода фиктивных источников приводит к ошибкам, лежащим в пределах обычных инженерных расчётов, тогда как все выкладки и окончательные результаты получаются при этом в несравненно более простом виде, чем при применении точных формул волновой теории.

Следует отметить ещё несколько теоретических работ в той же области, среди которых выделяются две работы Б. П. Константинова<sup>227, 228</sup>. В них рассматривается неучтённый ранее никем эффект звукопоглощения твёрдой с акустической точки зрения стенки, обусловленный теплопроводностью. Б. П. Константинов, исходя из теории Кирхгофа, показывает, что, хотя и малый, эффект этот может играть роль, например, в затухании звука в реверберационных камерах; попутно показывается неудовлетворительность одного расчёта Стратта.

Наконец, отметим, что наиболее ранней работой, дающей волновую теорию затухания звука в помещении с поглощающими стенками, является работа И. Г. Дрейзена<sup>122</sup>.

## ЗВУКОПОГЛОЩЕНИЕ

Естественно, что с общим оживлением работ по архитектурной акустике вопрос об обеспечении СССР звукопоглощающими и звукоизолирующими материалами и конструкциями стал на одно из первых мест. Здесь же уместно подчеркнуть, что развитие этой отрасли в СССР отмечено характерным для науки нашей страны обстоятельством: наряду с практической развивалась и теоретическая сторона вопроса, причём контакт между ними никогда не прерывался. В данной области это было определено, кроме общих тенденций советской науки, далёкой и от грубого эмпиризма и от схоластических теорий также деятельной работой Акустической комиссии Академии Наук СССР и акустических конференций.

Основная работа развивалась здесь по трём направлениям: пористые звукопоглощающие материалы, слоистые звукопоглощающие конструкции и резонансные звукопоглощающие системы.

Пористый звукопоглощающий материал, правильное толкование свойств которого было дано ещё Рейли, поглощает энергию падающей на него звуковой волны вследствие трения в его порах; соколения самого твёрдого каркаса не принимаются во внимание.

Работа по созданию советских пористых звукопоглощающих материалов была начата в связи с проектированием Московского радиодома по инициативе инж. И. А. Зейтленок (погиб в 1933 г.) в 1932 г.

В Росстромпроекте трудами П. В. Лапшина был разработан материал «арборит» (тип картона). Опытными его партиями было обработано несколько студий. Однако вследствие воспламеняемости этот материал не получил широкого распространения. Через некоторое время эта группа работ была перенесена в Центральную лабораторию Грампластреста. Основная задача акустического отдела этой лаборатории в то время заключалась в решении задач, возникших в связи с проектированием Дома звукозаписи. Здесь (Г. А. Гольдберг, С. Т. Тер-Осипянец) были созданы лабораторные установки для исследования звукопоглощающих материалов.

При строительстве Дома звукозаписи (окончен в 1938 г.) был применён целый ряд различных отечественных материалов<sup>171, 199, 200, 201</sup>. Поэтому студия и контрольные комнаты Дома звукозаписи представляют собой живой музей отечественных звукопоглощающих материалов.

В 1933 — 1934 гг. С. П. Алексеев<sup>206</sup> при участии Е. В. Костырко разработал в лаборатории Архитектурного института несколько удачных образцов звукопоглощающих материалов, из которых гранулированная штукатурка (АЦП) послужила для обработки театра Красной Армии в Москве.

В это время (1934 г.) стала в значительных масштабах развиваться подобная работа в Центральном научно-исследовательском институте промышленных сооружений (ЦНИПС). Здесь В. А. Андриевский и В. М. Ходаркевич разработали хорошую акустическую штукатурку; была изготовлена пробная партия её. Были также разработаны и звукопоглощающие плиты: оргалит (на древесном сырье) в разных внешних оформлениях, фиброакустит (на основе шерсти), ксилолит (на древесных опилках). Далее надо отметить работу Н. В. Засурского<sup>222</sup>, разработавшего технологию изготовления ряда звукопоглощающих материалов. Лаборатория ЦНИПСа не ограничилась, однако, только разработкой технологического процесса, но поставила нужные акустические измерения и занималась с той же серьёзностью и звукоизоляционными материалами. Работа эта отражена в книге «Акустические материалы и их применение», составленной инж. А. К. Тимофеевым; к сожалению, авторы, ведшие эти работы, в ней не указаны<sup>269</sup>. В 1938 г. лаборатория эта была передана в Строительство Дворца Советов (СДС), нужды которого разработке особо высококачественных звукопоглощающих и звукоизолирующих материалов к этому времени определились как весьма настоятельные. В последующие годы были сделаны интересные попытки получения звукопоглощающих и звукоизолирующих материалов с художественной внешностью и высокими санитарно-строительными качествами; так были с успехом испробованы художественные раскраски по пористой штукатурке, узорные покрытия и т. п.; были также получены нестараемые звукопоглощающие плиты (пеношамот<sup>234, 291</sup>, керамические материалы<sup>212, 234</sup>) хорошего внешнего вида.

Вся эта работа опиралась на систематические измерения коэффициента звукопоглощения в зависимости от частоты; были созданы соответственные измерительные установки. [М. С. Анцыферов, К. А. Виталь (погиб на войне), Г. Д. Малюженец.] О теоретическом осмысливании процесса звукопоглощающего пористого материала мы будем говорить ниже.

Отметим, наконец, тщательную работу Д. С. Новаховской (Государственный научно-исследовательский институт кирпичной промышленности НКПСМ) по созданию пемзолита, выполненную совместно с СДС<sup>211, 295</sup>; она разработала технологический процесс и изучила звукопоглощение пемзолита; была также изготовлена пробная партия в 450 м<sup>2</sup> и применена на опыте.

Параллельно с технологическими и производственными разработками и в тесном контакте с ними развились и теоретические работы по звукопоглощению как материалов, так и конструкций. Большая часть этих работ напечатана в сборниках № 2 и 3 Трудов Акустической комиссии Академии наук СССР, игравшей наравне с Бюро акустики СДС и акустической лабораторией Физического института Академии наук СССР (ФИАН), ведущую роль в изучении вопросов звукопоглощения. Поскольку ознакомление с этими работами облегчено наличием вышеупомянутых сборников, мы изложим этот вопрос, не вдаваясь в подробности.

Уравнения распространения звуковой волны в пористом материале с твёрдым каркасом исходят из предположения, что потеря энергии сосредоточена в процессе вязкого трения; отсюда известные уравнения движения, отличающиеся от обычных уравнений акустики наличием членов, пропорциональных скорости (уравнения Дарси). Можно ввести в них своеобразный звуковой потенциал и распространить их на случай анизотропии, представляющий практический интерес (Н. Н. Андреев<sup>209a</sup>). Однако остался нерассмотренным вопрос о термическом звукопоглощении пористого материала; вопрос о подсчёте звукопоглощения поверхностью материала вызвал значительное внимание советских учёных. Принятый в зарубежной литературе примитивный способ описания звукопоглощающего материала при помощи импеданции был подвергнут справедливой критике. Было показано, что более точный расчёт (практически более сложный) ведёт иногда к резко отличным результатам при больших углах падения (Н. Н. Андреев и Е. Е. Лысенко<sup>209a</sup>). В настоящее время мы знаем и условия пригодности примитивного способа, сформулированные в изящной работе Л. М. Бреховских<sup>409, 410</sup>. Кстати отметим, что в этой работе рассмотрен и другой важный вопрос — о пределе применимости геометрической акустики в вопросах архитектурной акустики. Надо отметить, что эти основные вопросы так и остались до сих пор нерассмотренными нигде за пределами СССР.

Отметим здесь же ещё одну работу принципиального характера — о влиянии величины звукопоглощающего образца на эффективный

коэффициент звукопоглощения (А. В. Римский-Корсаков и К. В. Струве<sup>216</sup>). Ввиду математических трудностей вопрос не был разрешён вполне, однако было показано, что эффективный коэффициент поглощения образцов, меньших по размерам полуволны, значительно выше, чем для случая бесконечно большого образца, — а это имеет немалое практическое значение как для правильного истолкования измерений, так и для использования звукопоглощающего материала в практике.

Так как оказывается, что, применяя звукопоглощающий материал с малыми порами, не удаётся получить значительных коэффициентов поглощения, а наличие больших пор делает материал неприемлемым с санитарной и строительной точки зрения, то, как это было сделано и за границей, стали переходить к перфорированным материалам, применению ниш и т. п. Все эти вопросы у нас в СССР стали особенно актуальными в связи с потребностями в сильно поглощающих материалах для СДС и с трудной задачей весьма большого звукопоглощения, которое необходимо было в Большом зале Дворца Советов; о последней задаче мы будем особо говорить ниже. Сюда относится работа Н. Н. Андреева и Е. Е. Лысенко, в которой рассмотрено увеличение звукопоглощения пористого материала вследствие наличия в нём цилиндрических ямок<sup>210</sup>, и две работы о звукопоглощении ниш В. А. Цикунова<sup>264</sup> и М. А. Сапожкова<sup>249</sup>. Но особенно следует отметить работы Г. Д. Малюжинца<sup>165, 166, 192, 193, 230, 231, 233</sup>. В этих работах он прежде всего исследовал звукопроводность жёсткого звукопоглощающего экрана, используя довольно строгий метод расчёта, исходящий из волнового уравнения без трения, а также произвёл учёт влияния трения. Здесь надо, кстати, отметить, что в дальнейшем совершенно строгое решение подобной же задачи (для случая круглого отверстия в перегородке круглой концентрической трубы) дал акад. В. А. Фок<sup>361</sup>. Далее Г. Д. Малюжинец рассмотрел важный для практики случай покрытия пористого звукопоглощающего материала жёстким перфорированным экраном, как лежащим непосредственно на звукопоглотителе, так и при наличии воздушной прослойки между ними; наконец, им же был рассмотрен и случай соколебания жёсткого экрана, обусловленный наличием конечной инертности его. Без преувеличения можно сказать, что все эти работы дают весьма полное — и более полное, чем зарубежные работы, — представление об акустических свойствах перфорации. Следует добавить, что и экспериментальное изучение свойств перфорации не было упущено; в основном оно велось в лаборатории СДС под руководством Г. С. Малюжинца Ю. П. Крашенинниковым и другими.

Особый вопрос возник в связи с необходимостью получения почти полного поглощения звуковых волн на потолке Большого зала ДС. Обычные звукопоглощающие материалы не могут быть здесь применены из-за практической невозможности повысить их звуко-

поглощение до нужных размеров, даже если не принимать во внимание необходимости художественно допустимого внешнего вида. Были проведены поиски принципа «высококачественного звукопоглотителя» и велась оживлённая дискуссия (С. Я. Лифшиц, С. Н. Ржевкин и многие другие). Однако лучшим из решений было признано решение Г. Д. Малюжинца. Он исходил из принципа многослойного звукопоглотителя, построенного в Америке Беделлом и представлявшего ряд звукопоглощающих занавесов, разделённых воздушными промежутками. Но звукопоглотитель Беделла был построен чисто эмпирически, и оставалось неясным, как велико то предельное звукопоглощение, которое можно получить этим способом при соблюдении разумных, со строительной точки зрения, габаритов. Г. Д. Малюжинец дал изящную теорию такого поглотителя, причём разработал и приёмы его расчёта, позволившие отыскать оптимальные параметры; удалось получить почти полное звукопоглощение даже на довольно низких частотах.

Согласие теории с опытом, который был поставлен в лаборатории СДС по методу трубы Тума, было достаточно полное. Но к испытанию куска потолка Большого зала — для выяснения, насколько влияют на расчётное звукопоглощение необходимые в действительности крепления — приступить не удалось вследствие начавшейся Отечественной войны.

Третье направление в разработке звукопоглощающих материалов как средней, так и высокой эффективности, определилось из работ С. Н. Ржевкина с сотрудниками. Вопросу этому посвящён обзор С. Н. Ржевкина, напечатанный в этом же журнале<sup>420</sup>.

## ЗВУКОУСИЛЕНИЕ

До возникновения радиовещания архитектурная акустика рассматривала только условия восприятия звучания естественных источников звука в помещениях обычного типа или в специальных помещениях — аудиториях.

Требования радиовещания резко изменили положение. Несмотря на то, что в радиовещательной цепи исполнение осуществляется в студии, в то время как воспроизведение осуществляется в произвольном помещении, всё же радиовещательный тракт следует рассматривать принципиально как тракт звукоусиления. Тракт радиовещания, рассматриваемый в целом, идентичен по функциональному назначению с трактом «запись — воспроизведение звука», например, при граммофонной записи.

Этот новый элемент — восприятие звука электроакустическими устройствами, затем усиление и воспроизведение при помощи электроакустических устройств — вошёл несколько позднее и в практику использования лекционных помещений и, наконец, в сценическую практику. Можно сказать, что техника звукоусиления революциони-

зировала «архитектурную акустику», и в настоящее время вряд ли мыслимо проектирование массовой аудитории или театра без учёта использования звукоусилительных систем. Более того, техника звукоусиления располагает в настоящее время средствами исправления акустических дефектов помещения, которые открывают для архитектурной акустики совершенно новые перспективы.

На первом этапе развития русской архитектурной акустики наибольший интерес возбуждали те стороны акустических явлений в замкнутом помещении, которые обуславливают восприятие речи и музыки при прямом восприятии звучания, т. е. при нахождении слушателя в том же помещении, в котором находится лектор или исполнитель. Таким образом, изучалась архитектурная акустика обычных малых помещений лекционного типа и архитектурная акустика театральных помещений. При этом основывались на концепциях, данных в конце прошлого столетия Сэбином. Этот период связан в советское время в основном с работами С. Я. Лифшица<sup>12,13,15,16</sup>, относящимися к 1922—1926 гг.

Процесс проникновения техники звукоусиления в акустическую практику сказался на развитии советской архитектурной акустики в значительно большей степени, чем на развитии архитектурной акустики за рубежом. Советские архитектурно-акустические исследования с самого начала были тесно связаны с требованиями радиовещания и впоследствии с требованиями звукоусиления. В работах советских авторов наиболее отчётливо и активно проводились идеи комплексного проектирования архитектурно-акустических свойств помещений, в которых осуществляется восприятие и воспроизведение звука, и соответствующих элементов системы звукоусиления.

Стимул к развитию техники звукоусиления был дан не только радиовещанием, но и звуковым кино. Для радиовещательных студий, съёмочных ателье и звуковых кинотеатров не было и не могло быть тех классических образцов, какие были в области проектирования лекционных аудиторий и театров. В ряде случаев приходилось приспособлять помещения, заведомо мало пригодные, и добиваться удовлетворительных акустических данных. Всё это потребовало теоретического анализа архитектурно-акустических свойств помещений в связи со свойствами электроакустических систем. В результате пассивный, познавательский метод архитектурно-акустического исследования помещений постепенно сменился активным методом создания помещений с необходимой акустикой.

Здесь можно указать три линии развития. Первая—«студийная» линия—имеет дело с естественным звучанием в специально спроектированном помещении (студии, ателье) при использовании электроакустических звукоприёмников, причём субъективное восприятие осуществляется в других, разнородных помещениях, обладающих производными акустическими качествами. Этот случай имеет место при радиовещании. Вторая, типичная для звукового кино, предусматри-

вает приём звука естественных источников в специально оборудованном помещении (студии, ателье) и воспроизведение звука также в специализированном помещении — зрительном зале кинотеатра. Здесь мы имеем уже элементы стереофонии, поскольку необходимо, чтобы звуковой образ локализовался зрителем одинаково со зрительным. Наконец, третья предусматривает наличие в специализированном помещении (зрительном зале, аудитории) естественных источников звука (оратор, музыкальные инструменты, певцы или актёры), и наряду с этим системы электроакустических звукоприёмников и громкоговорителей, обеспечивающих необходимый уровень громкости по всей площади зрительных мест аудитории. В простейших случаях — при усилении речи оратора — требования к качеству звучания и к стереофонии могут быть пониженные, но в наиболее развитом варианте требуется высокий класс точности воспроизведения и достижение возможно более полного стереофонического эффекта. Случай граммофонной записи близок к случаю радиовещания, поскольку запись осуществляется в студии, воспроизведение же осуществляется обычно радиовещательным приёмником или механическим граммофоном в помещении, специально не приспособленном.

Совершенно естественно, что требования практики заставили различные организации, занимавшиеся радиовещанием, звукозаписью или звуковоспроизведением, решать задачи архитектурной акустики в применении к студийным помещениям и затем к массовым аудиториям типа звукового кинотеатра. Поэтому центрами практической и отчасти теоретической работы в области архитектурной акустики, связанной с искусственным восприятием и воспроизведением звукового материала, стали радиовещательные организации, научно-исследовательские и учебные институты системы кинопромышленности, киностудии, организации граммофонной промышленности. Относительно большие звуковые мощности, во много раз превышающие обычные уровни мощности при ранее использовавшемся музыкальном сопровождении кинофильмов, и в особенности требования разборчивости речи обусловили с самого начала принятие новых исходных точек зрения при проектировании зрительного зала кинотеатра. Недостаточность времени реверберации как качественного критерия оценки акустики помещения сказалась сразу, но первое время привлекались главным образом соображения геометрической акустики с учётом направленности громкоговорителей.

В первый период развития советского радиовещания — приблизительно с 1922 г. — публикуется ряд работ, обзорных и оригинальных, касающихся главным образом оборудования радиовещательных студий и условий их эксплуатации<sup>11, 14, 21, 26, 27</sup>. При этом значительная часть работ посвящена рассмотрению студии как помещения, обработанного звукопоглощающими материалами, т. е. трактует вопрос с точки зрения собственно архитектурно-акустической. Постепенно всё больше внимания начинает уделяться радиостудии как элементу

радиовещательного тракта, т. е. как помещению, в котором осуществляется восприятие звучания естественных источников звука при помощи электроакустических звукоприёмников (микрофонов). Естественно, что на первой стадии ставится вопрос об «эксплоатации микрофона» в радиостудии, но в конце концов становится общепринятой концепция студии как элемента электроакустического тракта звукоусиления. Центром исследовательской работы в этом периоде является Научно-исследовательский институт связи Научно-технического управления НКПиТ. Исследовательские работы по оборудованию и эксплуатации студий ведутся также и техническим персоналом ряда главных радиостанций Союза. К 1931 г. относится публикация ряда результативных работ в сборниках НТУ НКПиТ<sup>50,60,61, 63</sup>. Здесь должна быть отмечена работа И. Г. Дрейзена<sup>50</sup>, где на основании опытного материала показывается, что усреднённые акустические параметры недостаточны для оценки качества студии, так как конечный результат существенно зависит от расположения исполнителей и в особенности от расположения микрофона. К этому же периоду относятся исследования Ю. М. Сухаревского<sup>61, 62</sup>, касающиеся работы исполнительских ансамблей в радиостудиях. К результативным работам, суммирующим существовавший опыт, относятся также книги И. Г. Дрейзена «Электроакустика в широковещании»<sup>87</sup>, «Радиофония» А. В. Рабиновича и А. Г. Гольдберга<sup>86</sup> и «Радиовещательные студии и микрофоны» А. В. Рабиновича и Ю. М. Сухаревского<sup>242</sup>. В последней работе значительное внимание уделено оценке «оптимальной реверберации», как критерия качества студии, и оценке микрофонов различных типов с точки зрения конечного качества звучания.

То обстоятельство, что в типичном радиовещательном тракте воспроизведение звука осуществляется в помещении с неопределёнными, случайными акустическими данными, накладывает известный отпечаток на работы, посвящённые акустике радиовещательных студий. Студия рассматривается более или менее как изолированный объект, и качественные оценки всегда страдают некоторой априорностью. Существенно отлично положение при записи и воспроизведении звука в звуковой кинематографии. Здесь мы имеем по существу единый тракт, который включает два архитектурно-акустически обработанных помещения и который должен быть подчинён единым качественным нормативам. Это обстоятельство, отчётливо осознанное уже в самом начале работы в области звукового кино в СССР, привело к дальнейшему плодотворному развитию концепции совокупной оценки архитектурно-акустических свойств начального и конечного помещений тракта (т. е. ателье и зрительного зала) и связывающей их электроакустической системы. Вопрос о суммарной реверберации при записи и воспроизведении звука рассматривался Л. Д. Розенбергом уже в 1932 г.<sup>76</sup>. В этой работе впервые отчётливо поставлен вопрос о неприменимости обычных архитектурно-акустических качественных

критериев (стандартная реверберация, оптимальная реверберация) для оценки качества помещений, связанных трактом записи — воспроизведения.

В связи с развитием звукового кино в СССР около 1929 г. возникают новые центры научно-исследовательской работы в области акустики помещений и акустики звукоусиления. Исследовательские работы ведутся как в научно-исследовательских учреждениях, занимающихся разработкой систем звукозаписи и звуковоспроизведения (Всесоюзный электротехнический институт, Научно-исследовательский кино-фото-институт и др.), так и в учебных институтах системы кинопромышленности, и, наконец, в лабораториях ведущих киностудий.

Часть опубликованных работ (главным образом работы А. И. Индлина и А. Г. Качеровича<sup>110, 126</sup>) основывается на той же концепции, которая развита в указанной выше работе Л. Д. Розенберга, т. е. рассматривает вопрос о необходимой суммарной мощности акустических излучателей в зрительном зале кинотеатра и об оптимальных соотношениях между временами реверберации в ателье и в зрительном зале. Существенно новая концепция вводится в 1937 г. В. В. Фурдуевым в работах «Метод акустического проектирования аудиторий, оборудуемых громкоговорящими устройствами» и «Метод акустического проектирования звуковых кинотеатров»<sup>172, 173</sup>. Здесь основным качественным критерием принимается отношение уровня прямого звука к уровню рассеянного звучания и устанавливается связь между формой помещения (в части его, занятой зрительными местами) и формой характеристики направленности громкоговорящих устройств. Эта работа кладёт начало постепенному отходу от «реверберационных» оценок качества помещения, которое оборудовано звуковоспроизводящей или звукоусилительной установкой.

Акустическое проектирование основных аудиторий Дворца Советов (Большого зала вместимостью на 20 000 мест и Малого зала вместимостью на 5000 мест) явилось мощным стимулом к углублённой проработке — как теоретической, так и экспериментальной — вопросов звукоусиления в больших аудиториях. С 1938 г. сектор акустики Строительства Дворца Советов становится одним из центров работы в области теории звукоусиления в связи с архитектурной акустикой. До этого времени звукоусиление рассматривалось главным образом как вспомогательное средство для исправления голосовых данных оратора, и в некоторых случаях для исправления дефектов аудитории. При проектировании основных аудиторий Дворца Советов советская акустика впервые встретилась с акустическим проектированием помещений, в которых системы звукоусиления играли решающую роль.

Состояние вопроса о звукоусилении в Большом зале Дворца Советов на 1939 г. освещено в работе А. В. Римской-Корсакова «Критический обзор способов усиления звука в весьма больших помещениях»<sup>245</sup>. Большой теоретический, экспериментальный и про-

ектный материал, полученный сектором акустики Строительства Дворца Советов и лабораторией акустики СДС в период с 1937 по 1941 гг., к сожалению, до сих пор остаётся неопубликованным или, если и опубликован, то только частично. Это заставляет нас остановиться несколько подробнее на рассмотрении работ Строительства Дворца Советов в области звукоусиления.

Малый зал Дворца Советов при необычных размерах представляет собой по существу зрительный зал обычного типа т. е. обладает сценическим проёмом, более или менее выраженной сценической коробкой и авансеной и т. д. Поэтому звукоусилительная установка Малого зала могла являться фронтальной трёхканальной стереофонической звукоусилительной системой. Напротив, Большой зал — круговой формы, с высоким куполом и круглой сценической площадкой — совершенно необычен и по форме и по размерам, что не позволяет применить здесь какое-либо тривиальное решение звукоусилительной системы. Двойственность назначения Большого зала — как аудитории для совещаний, что предполагает симметрию, близкую к фронтальной (при нахождении оратора в секторе президиума), и как зрительного зала с круговой симметрией — заставила дублировать звукоусилительные системы. Дополнительное требование «незаметности» громкоговорящих устройств, т. е. полной архитектурной маскировки громкоговорителей, их слияния с интерьером зала, ещё более затрудняло задачу.

Две основные концепции, избранные сектором акустики СДС при проектировании звукоусилительных систем, кратко описаны в указанной выше работе А. В. Римского-Корсакова. Первая предполагает использование сосредоточенных групповых источников звука, расположенных на значительной высоте (на уровне последних рядов амфитеатра) над круглой сценической площадкой, для создания пятиканальной стереофонической системы с круговой симметрией. Усиление речи при этом предполагалось осуществить при помощи сосредоточенных (также групповых) источников звука, расположенных фронтально в зоне президиума. Вторая концепция предполагала, при отказе от стереофонии, использование громкоговорителей малых габаритов, рассредоточенных по всей площади, занятой зрительными местами. Такая система звукоусиления, по принятой терминологии, определяется как «распределённая» система звукоусиления. Первая концепция развивалась далее В. С. Григорьевым, вторая, предложенная Н. Н. Андреевым, разрабатывалась Л. Д. Розенбергом и Б. Д. Тартаковским<sup>347, 357, 361, 371, 374</sup>.

При каждом из этих решений возникают присущие им трудности. Основным вопросом является здесь правильная локализация звукового образа — в первом случае при высоком расположении действительных источников звука (поскольку естественные источники для большей части аудитории не имеют значения) и во втором случае при «разлитом» по площади зрительных мест звучании громкоговорите-

лей. Тестуальные эксперименты, проведённые В. Ф. Натаровым<sup>235, 236, 293</sup>, показали возможность правильной и устойчивой локализации, источника звука при перемещениях в фронтальной плоскости и значительно меньшую точность при перемещениях по глубине; вопрос о пороге расходимости при перемещениях в сагиттальной плоскости в этих работах оставлен открытым. При опытах с распределённой системой порог расходимости определялся тестуальным методом при демонстрации звукового кинофильма (Л. Д. Розенберг и Б. Д. Тартаковский<sup>348, 360, 374</sup>); опыты показали достаточную устойчивость «слияния» зрительного образа со звуковым. При этом, конечно, нужно учитывать большой масштаб изображения на экране, что облегчает «слияние» и увеличивает порог расходимости. Однако вопрос о локализации источников звука с точки зрения техники звукоусиления ещё не может считаться окончательно решённым.

Свойства распределённых систем источников звука исследовались как теоретически, так и экспериментально. Результаты этих исследований отражены в ряде работ Л. Д. Розенберга и Б. Д. Тартаковского, упомянутых выше. Теоретические расчёты, основанные на предположении о некогерентности излучения отдельных источников, хорошо совпадают с экспериментальными результатами, полученными при речевом и музыкальном звуковом материале<sup>371</sup>. Достаточная равномерность звукового поля может быть получена даже при относительно редком расположении источников. Необходимая плотность расположения громкоговорителей определяется в основном требованием слитности общего звучания, т. е. восприятия звучания удалённых источников как «псевдоревверберации», а не как повторного эхо. Использование распределённой системы источников звука позволяет получить хорошую разборчивость при относительно малом звукопоглощении в помещении, а также уменьшает опасность обратной связи с микрофоном оратора. Отрицательным свойством системы является упомянутая выше псевдоревверберация, которая, однако, в условиях Большого зала Дворца Советов, не обладающего естественной реверберацией, может оказаться и положительным фактором.

Проведённые исследования, однако, ещё не дают основания для окончательного выбора распределённой системы звукоусиления для Большого зала Дворца Советов, так как, вследствие малой направленности малогабаритных излучателей, такой системе свойственно излучение большого количества энергии вверх. Это создаёт опасность мешающего эхо от купола зала. Поэтому произведённые эксперименты и расчёты требуют дальнейшего уточнения, требуется также дальнейшее исследование стереофонических свойств распределённой системы при круговой симметрии зрительного зала.

Очевидно, что при помещении сколько-нибудь необычной формы и больших размеров направленность излучателей, входящих в состав звукоусилительной установки, не может быть выбрана произвольно. Сформулированные В. В. Фурдуевым требования к направлен-

ности (см. выше) относятся к помещениям типа обычного зрительного зала. Ю. М. Сухаревским<sup>256, 257, 307</sup> было показано, что удовлетворительные соотношения получаются в этом случае при использовании рупорных громкоговорителей, обладающих приблизительно эллипсоидальной пространственной характеристикой направленности. При этом, однако, условия одновременной работы в одном помещении группы громкоговорителей и микрофонов не учитывались, т. е. результаты относились скорее к случаю воспроизведения звука, а не к случаю звукоусиления. Даже при обычной конфигурации зрительного зала и при фронтальной стереофонии задача звукоусиления значительно труднее, чем задача звуковоспроизведения. В Большом зале Дворца Советов решение задачи могло быть найдено только при совокупном проектировании зрительного зала и направленных свойств излучателей стереофонической системы. Работы сектора акустики СДС, проводившиеся в направлении изыскания методов создания излучателей с характеристиками направленности, отвечающими конфигурации Большого зала (С. А. Маков), хотя и имеют прямое отношение к архитектурно-акустической задаче проектирования Большого зала, но всё же лежат скорее в области электроакустики, и мы не можем здесь останавливаться на них подробно.

В связи с задачами проектирования Дворца Советов находится ряд исследований, посвящённых условиям работы в замкнутом помещении полного тракта звукоусиления. Любая система звукоусиления предусматривает наличие в зрительном зале одновременно звукоприёмников и излучателей звука, связанных общей усилительной системой. При стереофоническом звукоусилении в зрительном зале действует несколько таких систем (в Большом зале Дворца Советов по проекту — пять звукоусилительных систем). Уже при обычном фронтальном варианте звукоусилительной системы, когда излучатель может быть вынесен вперёд по отношению к фронту расположения звукоприёмников, находящихся в сценической коробке, и следовательно, при нахождении звукоприёмников в зоне ослабленного излучения громкоговорителей, возникают ограничения степени звукоусиления вследствие акустической обратной связи между громкоговорителем и звукоприёмником. При стереофоническом звукоусилении эти связи могут быть не только прямыми (по одному тракту), но и перекрёстными. Особенно трудной задачей является случай стереофонии с центральной симметрией, где значительное ослабление излучения системы громкоговорителей, расположенных над круговой сценической площадью в направлении вниз, представляет значительные трудности. Здесь задача может быть решена только путём проектирования специальных направленных звукоприёмников с пониженной чувствительностью в верхней полусфере. Мы видим, что определённая архитектурно-акустическая задача влечёт за собой соответствующую электроакустическую задачу. Теоретические и экспериментальные исследования Ю. М. Сухаревского и Г. А. Гольдберга<sup>306, 303, 310, 325а, 325б, 392</sup> по-

казали, что вопрос об акустической обратной связи громкоговорителя и микрофона, относящихся к одной и той же системе звукоусиления, действующей в закрытом помещении, может быть сведён к рассмотрению акустической обратной связи между распределённой системой громкоговорителей и микрофоном, расположенным в поле этой системы в неограниченном пространстве. Эта концепция позволила найти предельные возможности звукоусиления в закрытом помещении, правда, пока ещё в идеализированной трактовке. Этот же вопрос рассматривался И. Г. Дрейзенем, и освещён детально в его курсе электроакустики <sup>279</sup>.

Исключительные размеры и форма Большого зала Дворца Советов поставили на очередь ещё два основных вопроса техники звукоусиления — вопрос об искусственной реверберации и о маскировке эхо. Хотя и до этого времени методы создания искусственной реверберации (главным образом при помощи так называемой «комнаты эхо» <sup>204</sup>) рассматривались в литературе, однако только с точки зрения использования искусственной реверберации как вспомогательного звукового эффекта в радиовещании и кинотехнической звукозаписи. В Большом зале Дворца Советов, при звукоусилительной системе с сосредоточенными групповыми источниками, нормальная реверберация отсутствует, что заставляет воссоздавать реверберацию искусственно. При звукоусилительной системе, состоящей из распределённых источников, присутствует, как уже указывалось выше, псевдореверберация, которая, однако, не вполне сходна с естественной реверберацией, привычной для слушателя, и также должна дополняться искусственной реверберацией. Этой проблеме посвящены работы, рассматривающие ревербераторы с акустической обратной связью и с записью на но-ителю. Эти работы, выполненные непосредственно перед второй мировой войной, до сих пор ещё не опубликованы.

Искусственная реверберация может являть я также средством борьбы с дискретными отражениями (эхо) в больших помещениях. Этому вопросу были посвящены экспериментальные работы С. Т. Тер-Осипянца и Г. А. Гольдберга <sup>260, 183</sup>; вопрос о различимости эхо при восприятии речи исследовался тестуальным путём А. В. Рабиновичем <sup>297</sup>.

Нам остаётся рассмотреть только вопрос о стереофоническом воспроизведении звука и стереофоническом звукоусилении, чтобы закончить обзор работ, посвящённых звуковоспроизведению и звукоусилению в связи с архитектурной акустикой. Выше упоминались исследования по стереофонической локализации и по стереофоническим звуковоспроизводящим и звукоусилительным системам, проводившиеся в системе Строительства Дворца Советов. Однако стереофония, естественно, представляла интерес также и в области записи и воспроизведения звука. Здесь должны быть отмечены в первую очередь экспериментальные работы И. Е. Горона. Стереофонические эксперименты с двух- и трёхканальными звукоусилительными системами высокого класса

точности воспроизведения были осуществлены И. Е. Гороном в 1936 г. в Колонном зале Дома Союзов в Москве. Эти работы получили своё дальнейшее развитие при разработке системы трёхканальной стереофонической записи звука на магнитном носителе. Уже после Отечественной войны (1947 г.) разработанная И. Е. Гороном аппаратура позволила провести ряд стереофонических экспериментов, показавших эксплуатационную пригодность метода. В области звуковой кинематографии стереофонические эксперименты осуществлялись М. З. Высоцким и В. Н. Коноплёвым<sup>183, 181</sup>, однако только при двухканальной записи звука.

Мы не будем касаться более специальных вопросов техники звукоусиления, например, вопросов сжатия и расширения динамического диапазона. Несмотря на то, что требования к динамическим характеристикам звукоусилительного тракта теснейшим образом связаны с архитектурно-акустическими свойствами помещения, рассмотрение этой линии исследований увело бы нас слишком далеко от собственно архитектурно-акустических вопросов.

Приведённый краткий обзор показывает, что основная линия развития советской технической акустики в данной области всё более развивается в сторону создания методов, позволяющих говорить не только об архитектурной акустике, но уже и об архитектурной электроакустике. Это особенно сказывается в работах, посвящённых труднейшему в акустическом отношении объекту — Дворцу Советов. Широкая программа тестуальных и количественных экспериментов, для которых был создан акустический полигон СДС<sup>327</sup>, должна была дать качественные критерии, необходимые для проектирования сложных звукоусилительных систем. Эта работа была прервана войной, отвлекшей основные силы советских акустиков на решение других задач.

## ЗВУКОИЗОЛЯЦИЯ

Как известно, вопросы звукоизоляции и снижения шума в зданиях получили достаточное научно-техническое освещение лишь с начала тридцатых годов нашего века. Появившиеся ранее в свет работы в этой области носили случайный характер и результаты их были неясны и противоречивы. Так обстояло дело и с нашей отечественной литературой по звукоизоляции.

В 1931 г. появилась в свет обзорная работа С. Т. Тер-Осипянца<sup>63</sup>, в которой впервые были поставлены в современной трактовке вопросы звукоизоляции зданий, дана сводка результатов имевшихся к тому времени исследований и намечены пути для дальнейших научно-технических изысканий. К 1933 г. относится обзорная статья М. Я. Мошонкина по звукоизоляции киноателье<sup>92</sup>, и в том же году появилась первая оригинальная советская работа И. Г. Русакова<sup>94</sup> по измерению звукоизоляции. В этой работе приведены результаты произведе-

дённых автором в Ленинградском электрофизическом институте измерений изоляции дверей при разной степени неплотности их прикрывания, а также изоляции специальных звукозащитных будок.

Для дальнейшего развития советской исследовательской и научно-технической работы в области звукоизоляции и снижения шума значительную роль сыграли строительство звуковых студий и строительство Дворца Советов. При проектировании Дворца Советов возник ряд сложных проблем его звукоизоляции. Организованный при Строительстве Дворца Советов Отдел акустики с акустической лабораторией при нём проработал, в числе прочих вопросов акустики, имевшийся научно-технический материал по звукоизоляции и произвёл собственную обширную исследовательскую работу в этой области. В результате была создана методика проектирования звукоизоляции Дворца Советов, имевшая большое значение для развития звукоизоляции в СССР. В статье И. Г. Лейзера<sup>335</sup> дан краткий обзор вопросов звукоизоляции во Дворце Советов и принятых в проекте конструктивных решений.

Переходя к обзору отдельных, разработанных в СССР, проблем звукоизоляции и снижения шума в зданиях, начнём со звукоизоляции стен и перекрытий. Для разработки методики измерений большое значение имело выполненное В. С. Григорьевым в акустической лаборатории Строительства Дворца Советов исследование об усреднении отсчётов в камерах для измерения звукоизоляции<sup>328</sup>. В этой работе выяснены, путём многочисленных тщательных замеров, особенности звукового поля в камерах при разных способах возбуждения (чистый тон, воющий тон, шротгенератор) и исследованы различные методы усреднения отсчётов. В результате этого исследования получена возможность достаточно точных и надёжных измерений звукоизоляции стен и перекрытий. Этой методикой В. М. Рудник были в той же лаборатории проделаны измерения изоляции против воздушного звука (а для перекрытий также и против ударного звука) специальных звукоизолирующих перекрытий и стен, принятых для Дворца Советов. Измерения показали высокую звукоизоляцию этих конструкций, имеющих в числе своих элементов плавающие полы и стенки<sup>300,349,350</sup>. Л. А. Яковлевым были выполнены измерения звукоизоляции перекрытий и стен в существующих зданиях<sup>314, 364</sup>.

Для измерения звуковых колебаний строительных конструкций акустической лабораторией Строительства Дворца Советов под руководством М. С. Анцыферова были разработаны и построены электродинамические виброметры, имеющие достаточно равномерную частотную характеристику в широком диапазоне звуковых частот. При помощи этих виброметров М. С. Анцыферовым, Г. А. Суриным и Р. Э. Гасско были обследованы косвенные пути передачи звука в камерах для измерения звукоизоляции в существующих зданиях, звуковые колебания, вызываемые метро в расположенных вблизи зданиях и на фундаментах Дворца Советов, и ряд других вопро-

сов 213, 253, 254, 255, 274, 303, 304, 322, 324, 353. Эти измерения дали возможность выяснить зависимость между уровнем шума в помещениях и колебаниями ограждающих их конструкций. Л. А. Яковлевым было исследовано распространение шума по каркасу зданий при ударном возбуждении перекрытий<sup>367</sup>, а также распространение воздушного шума по нескольким помещениям, связанным между собой открытыми проёмами<sup>314</sup>.

Вопрос о влиянии звукопоглощения помещения на снижение уровня шума в нём был рассмотрен в работе Л. Д. Розенберга<sup>299</sup>. Разбивая силу звука в какой-либо точке помещения на образованную прямым звуком и получившуюся в результате беспорядочных отражений диффузную плотность звуковой энергии, можно определить величину ослабления шума вследствие наличия звукопоглощения, так как последняя влияет лишь на вторую компоненту силы звука.

Во всех случаях коэффициент звукопоглощения имеет смысл увеличивать до величины 0,3—0,4, что даёт ослабление 10—15 дБ, и только в редких случаях имеет смысл доводить коэффициент поглощения до величины 0,5—0,7.

Измерения шумов городского транспорта, имеющих большое значение для звукоизоляции зданий, производились на улицах Москвы С. П. Алексеевым. Этому же вопросу посвящена книга К. Н. Шабшева<sup>298</sup>.

Измерения шумов московского метро производились С. П. Алексеевым<sup>149</sup>. В. С. Казанский, работая по исследованию шумов машин, произвёл исследование шума эскалаторов московского метро<sup>281</sup>. Акустической лабораторией Строительства Дворца Советов были произведены исследования шумов, вызываемых метро в расположенных вблизи зданиях<sup>274, 315</sup>. Эти измерения, совместно с упомянутыми выше измерениями колебаний в этих же зданиях, были выполнены для получения нужных данных при проектировании Дворца Советов, к которому примыкают станция и тоннели метро.

Шумам вентиляторов, являющихся основным и весьма мощным источником шума в вентиляционных установках, посвящены выполненные в ЦАГИ работы Е. Я. Юдина<sup>379, 391</sup>. В этих работах приведены результаты выполненного автором опытного исследования шума вентиляторов разных типов и предложены «шумовые характеристики», позволяющие определить уровень шума, создаваемого данным вентилятором при различных условиях его работы.

Акустической лабораторией Строительства Дворца Советов были произведены измерения шумов вентиляционных установок в ряде зданий Москвы<sup>319, 320, 321, 365, 366</sup>. Эти подробные и тщательные измерения дали обширный материал об уровне шума вентиляторов разных типов, его спектральном составе, распространении шума по воздуховодам, шуме, проникающем в обслуживаемые upstairs помещения, эффективности различных видов глушителей и т. п.

А. И. Беловым был выполнен ряд работ по исследованию заглушения шумов вентиляции. Теоретическое исследование затухания зву-

ка в трубах с поглощающими стенками<sup>177, 178</sup> дало ему возможность предложить простую формулу для расчёта такого затухания, получившую в СССР широкое применение в практике проектирования. А. И. Беловым, совместно с Н. Д. Файнштейном, была также проделана по поручению Строительства Дворца Советов опытная работа по исследованию заглушения звука в воздуховодах с поглощающими стенками и с глушителями разных типов<sup>214</sup>, давшая ценный материал для проектирования.

Акустической лабораторией Строительства Дворца Советов измерялись шумы и других санитарно-технических устройств, например, центробежных насосов, мусородробилок и пр.<sup>3 6, 317</sup>. Этой же лабораторией были выполнены измерения колебаний и шумов, вызываемых лифтами в зданиях<sup>253, 3 8</sup>.

Теоретическое рассмотрение важного для вибро- и звукоизоляции зданий вопроса об изоляции машинных установок и приборов при помощи упругих прокладок было дано в работе И. Г. Лейзера<sup>382</sup>. В этой работе даётся метод расчёта собственных частот и свободных и вынужденных колебаний системы при любом расположении упругих прокладок, а также дана оценка достигаемого при этом вибро- и звукоизолирующего эффекта (рассматривая машину на прокладках как систему с шестью степенями свободы).

Исследования динамических модулей упругости материалов, применяемых для вибро- и звукоизоляции, в области звуковых и инфразвуковых частот производились акустической лабораторией Строительства Дворца Советов<sup>275, 381</sup>.

Следует в заключение указать на ряд построенных в СССР зданий, в которых выполнены помещения с высокой звукоизоляцией. Сюда относятся, например, студия Московского телевизионного центра<sup>296</sup>, студии Московского дома звукозаписи, звукомерные камеры акустической лаборатории Физического института Академии наук СССР и др.

#### ИЗМЕРЕНИЯ

В нашей стране потребность в архитектурно-акустических измерениях возникла первоначально главным образом в связи с развитием радиовещания, при строительстве студий. Поэтому уровень измерительной техники был достаточно высок. При измерениях всегда использовалась усилительная аппаратура и электроакустические излучатели и микроприёмники, хотя в начале обычно применялся субъективно-сравнительный метод отсчёта.

Первые указания на методы измерения реверберации содержатся в книге С. Я. Лифшица<sup>13, 28</sup>. Здесь мы имеем не только сводку ранее использовавшихся другими авторами методов измерения, но и те изменения (сводящиеся к использованию электроакустических микроприёмников при субъективном методе отсчёта), которые были внесены самим С. Я. Лифшицем.

Однако более глубокие исследования появляются тогда, когда начинают создаваться специализированные акустические лаборатории. Создание гулких камер с возможно большим временем реверберации и их использование для исследования звукопоглощающих материалов и конструкций, а также заглушённых камер, позволяющих имитировать условия открытого пространства, потребовало разработки новых методических приёмов архитектурно-акустических измерений.

В работе Г. А. Гольдберга<sup>217</sup> дан сводный материал применявшихся методов измерения реверберации, а также дана сравнительная оценка точности этих методов. Интересно отметить, что использование электроакустических излучателей, обладающих значительно большей акустической мощностью, чем излучатели, использовавшиеся при чисто акустических методах измерения, и несомненно значительно больших, чем мощность человеческого голоса, заставило внести уточнения и в самое определение понятия реверберации. Г. А. Гольдбергом исследовано влияние расстояния измерительного микрофона от громкоговорителя при измерении реверберации и введено понятие «эффективной реверберации», исключающее скачок уровня после выключения источника, обусловленный прекращением действия прямого звука на звукоприёмник.

Систематический анализ методов архитектурно-акустических измерений в гулких и заглушённых помещениях дан А. А. Харкевичем<sup>262</sup>. Он даёт также перспективный перечень задач, подлежащих времени, несмотря на прогресс, имеющийся в данной области.

Характерной чертой развивавшейся советской методики архитектурно-акустических измерений является стремление к автоматизации процессов измерения. Так, работа З. И. Митягиной<sup>103</sup> посвящена описанию разработанного акустическим сектором ЛЭТИ автоматического реверберометра, непосредственно регистрирующего кривую спада уровня звучания в исследуемом помещении. Преимущества непосредственной записи кривой реверберации продемонстрированы в этой работе с полной ясностью.

В работе М. А. Сапожкова<sup>77,79</sup> даётся обзор работ ЦРЛ и ЛЭТИ в области архитектурной акустики и, в частности, в области методики архитектурно-акустических измерений. Проводилось сравнительное исследование трёх методов измерения реверберации — субъективного, релейного и метода непосредственной записи кривой реверберации на осциллографе. Как и следовало ожидать, третий метод оказался наилучшим. Проведённые в реальных помещениях измерения показали недостаточность понятия реверберации (в том числе и оптимальной) для действительной характеристики акустических данных помещения. А. А. Харкевичем<sup>262а</sup> был дан систематический анализ автоматических методов, используемых в акустических и, в частности, в архитектурно-акустических измерениях.

Второй областью архитектурно-акустических измерений следует считать измерения звукопоглощения реверберационным методом и

измерение звуко- и виброизоляции. Методика реверберационного измерения звукопоглощения сводится к измерению времени реверберации в гулкой камере, при наличии в ней образца исследуемого материала и без такового. Такие измерения с использованием тех или иных реверберометров и чаще всего с использованием осциллографической записи звукового процесса, проводились в целом ряде лабораторий. В частности, можно указать на измерения, проводившиеся И. Г. Дрейзенем в студиях НКС и др.

Отметим теперь, как была организована работа по архитектурной акустике в СССР, причём остановимся только на основных центрах работы. Их четыре: Дом звукозаписи, сектор акустики СДС, акустическая лаборатория ФИАН и Акустическая комиссия АН СССР. О Доме звукозаписи уже было сказано выше. Центральной проблемой, стимулировавшей развитие в СССР полнокровной архитектурной акустики, явилась проблема акустики Дворца Советов. Ради неё в 1937 г. был создан сектор акустики, где руководителем явился Л. Д. Розенберг; при секторе — выстроенный В. С. Григорьевым акустический полигон, вероятно, единственный в мире и весьма совершенный по автоматизации и удобству измерительной работы. Новое здание акустической лаборатории ФИАН, — до сих пор вследствие войны ещё не вполне законченное в отношении отделки помещений для архитектурно-акустических измерений, — было спроектировано С. Н. Ржевкиным и И. Г. Лейзером главным образом для решения тех же проблем Дворца Советов. Все эти организации работали совместно, и объединяющим их центром была Акустическая комиссия АН СССР, руководимая Н. Н. Андреевым.

#### БИБЛИОГРАФИЯ ПО АРХИТЕКТУРНОЙ АКУСТИКЕ

В библиографии приведены работы, относящиеся к следующим разделам акустики:

а) Пространственная акустика. Реверберация. Геометрическая акустика. Волновая теория акустических процессов в помещениях. Звукопоглощающие материалы и конструкции.

б) Звукоизоляция. Звукоизолирующие конструкции и материалы. Виброизоляция.

в) Звукофикация. Методы звукофикации. Направленные излучатели. г) Измерения в области архитектурной акустики. Исследования восприятия звука в помещении.

При составлении библиографии были использованы, помимо работ, напечатанных на русском языке и других языках народов СССР, архивные материалы Управления Строительства Дворца Советов и Научно-исследовательского института звукозаписи. Кроме того, приведены некоторые популярные статьи, представлявшие известный интерес в 30-х годах, в начале широкого строительства радиостудий и кинотеатров. Приведены также выполненные в России работы, опубликованные за рубежом.

Для удобства пользования библиографией она расположена по годам.

1861

1. Стасов В. В., Голосники древних новгородских и псковских церквей. Изв. Археологического общества, СПб, 3 (1861).

1873

2. (Без автора.) Уничтожение резонанса при помощи протянутых проволок. Зодчий (1873).

1890

3. (Без автора.) Акустический энциклопедический словарь, 1, 318, СПб, Брокгауз и Ефрон (1890).

1896

4. (Без автора.) Акустика. Техническая энциклопедия, 1, 93, СПб, «Просвещение» (1896).

1900

5. (Без автора.) Об акустике зданий. Зодчий, 3, 81 (1900).

1905

6. Эвальд В., Звучность в аудиториях. Зодчий, №№ 50, 51 (1905).

1913

7. Лукомский Г. К., Античные театры и традиции в истории эволюции театрального здания. Издание автора (1913).

8. Хвольсон О. Д., Звук. Энциклопедический словарь, 21, 10, СПб, Т-во бр. А. и И. Гранат и К° (1913).

1916

9. Беляев С. В., Задачи акустики помещений. Архитектурно-художественный еженедельник, №№ 13—15 (1916). Вышла также отдельным изданием, Петроград, 1916.

1918

10. Зёрнов В. Д., Успехи в области акустики за последние 15 лет. УФН, 1, 121 (1918).

1922

11. Первая советская радиостудия (Московская радиовещательная станция). Телегр. и телеф. без проводов, № 16, 684 (1922).

1923

12. Лифшиц С. Я., Акустика аудиторий. Архитектура, № 1—2 (1923).

13. Лифшиц С. Я., Курс лекций по архитектурной акустике. Изд. Архитект. ин-та (1923) (Гектограф).

1924

14. Виноградов К. Н., Брюссельская ширококвещательная станция. Телегр. и телеф. без проводов, № 22, стр. 23 (1924).

15. Лифшиц С. Я., Оптимум реверберации. ЖРФХО, ч. физ., 56, 360 (1924).

1925

16. Лифшиц С. Я., Обзор работ по архитектурной акустике. ЖРФХО, ч. физ., 57, 105 (1925).

17. Лифшиц С. Я., Оптимум реверберации. Труды Гос. ин-та муз. культуры, вып. 1 (1925).

18. S. Lifshitz, Optimum reverberation for an auditorium. Phys. Rev. 3, 391 (1925).

## 1926

19. Андреев Н. Н., Архитектурная акустика. БСЭ, 2, 97 (1926).

20. S. Beijajew, Akusik grösser Raume. Deutsche Bauzeitung, Berlin (1926).

21. Востряков В., Радио в Англии (Магнетофон и студии). Радиолюбитель, № 3, 7, стр. 140 (1926).

22. Коваленков В. И., Способ искусственного получения акустического резонанса помещений, заявка № 334 (20 III 1922). Телегр. и телеф. без проводов, № 7, стр. 234 (1926).

23. Леонтьев К. А., Экспериментальное исследование диффракции звука. ЖРФХО, ч. физ., 58 211 (1926).

24. Лифшиц С. Я., Международные нормы по архитектурной акустике. Доклад на съезде физиков (1926).

25. S. Lifshitz, M an intensity of sound in an auditorium and optimum reverberation. Phys Rev., 27, 618 (1926).

## 1927

26. Баев И. А. и Ридель Ю. О., Измерение качества передачи речи методом артикуляции. Научно-техн. сб. НКПит, № 1, М. (1927).

27. Делакроа В. Э., Материалы по радиогещанию за границей (студии). Телегр. и телеф. без проводов, № 8, 680 (1927).

28. Лифшиц С. Я., Курс архитектурной акустики. Изд.-2-е, М., МВТУ (1927).

29. Эльцин И., Акустика. Техническая энциклопедия, 1, стр. 424 (1927).

## 1928

30. Говве и Вудке, Акустическая изоляция в жилых помещениях. Строит. промышленность, № 6, стр. 497 (1928).

31. Субботин К. П., О будках для переговорных телефонных пунктов. Жизнь и техника связи, № 1 (1928).

## 1929

32. Анатольев В. И., Проблемы акустики. Акустический расчёт концертных зал, театров и лекционных аудиторий. Слесса (1929).

33. Белов А. И. Акустические измерения со звуковыми импульсами. Телегр. и телеф. без проводов, № 57, 572 (1929).

34. Зёрнов В. Д. и Брянцев П. Д., К вопросу о звукопроводности строительных материалов. Труды МИИТ, 10, 265 (1929).

35. Красовский Ф. З., Телефонные кабинки конструкции инж. Красовского. Жизнь и техника связи, № 1, стр. 13 (1929).

## 1930

36. Греков И., Залы концертные и для звучащего кино. Строит. промышленность, № 6-7, стр. 538 (1930).

37. Енишерлов, Измерение шума (к вопросу об акустике в строительном деле). Строит. промышленность, № 6-7, стр. 537 (1930).

38. Зейтленок И. А., Радиостудии. Техника связи, № 6, стр. 16; № 7-8, стр. 13 (1930).

39. Лебедев В. М., Акустика и электроакустика в радиовещании. Техника связи, № 6, стр. 56 (1930).
40. Лифшиц С. Я., Оптимум реверберации для звуковых кинотеатров. Доклад на съезде физиков в Одессе (1930).
41. S. Litshitz, Vorlesung über Bauakustik. Verl. K. Wittwer, Stuttgart (1930).
42. Мачинский М. В., К теории реверберации помещения, имеющего форму параллелепипеда. ЖРФХО, ч. физ., 62, 59 (1930).
43. Мачинский М. В., О глянции интерференции на процесс заглухания. ЖРФХО, ч. физ., 62, 91 (1930).
44. Оцеп, Некоторые способы борьбы с шумом в вентиляционных установках. Строит. промышленность, № 6—7, стр. 541 (1930).
45. Пастернак С. С., Проблема звука в строительстве. Звуковая изоляция частей здания и машин. Строит. промышленность, № 67, стр. 537 (1930).
46. Рабинович А. В., Как улучшить слышимость в клубных помещениях. М., ГИЗ (1930).

## 1931

47. Алёшин В. Е. и Хрущёв А. А., Оборудование трансляционного узла. Оборудование студий. Радиофронт, № 7—8, стр. 459 (1931).
48. (Без автора.) Берлинский радиоцентр. Радиофронт, № 6, стр. 371 (1931).
49. Всесоюзная конференция по вопросам звукового кино и радио. Москва, 1931. Опт. мех. пром., № 4—5, стр. 37 (1931).
50. Дрейзен И. Г., Акустика радиостудий и методы студийных измерений. Труды НТУ НКПиТ, IV, 4 (1931).
51. Дрейзен И. Г., Работы лаборатории электроакустики НТУ. Техника связи, № 1, стр. 57 (1931).
52. Дрейзен И. Г., Универсальный реверберометр. Труды НТУ НКПиТ, 4, 71 (1931).
53. Елькин П. И., Радиовещательная аппаратура Радиокорпорейшен (студия-передатчик). Техника связи, № 1, стр. 70 (1931).
54. Зейтленок И. А., Современный радиовещательный узел. Техника связи, № 1, стр. 81 (1931).
55. Лифшиц С. Я., Звукопроницаемость в постройках. (Обзор.) Соц. реконструкция и наука, № 2—3, стр. 197 (1931).
56. Лифшиц С. Я., Акустика зданий и их изоляция от шума и сотрясений. М.—Л., ГНТИ (1931).
57. Первая всесоюзная акустическая конференция 27—30 сентября 1931 г. Обзор работ и резолюции. Вестн. эл.-техн., № 11—12, стр. 477 (1931). (Доклады по архитектурной акустике: Сапожков М. А., Розенберг Л. Д., Лифшиц С. Я., Дрейзен И. Г., Майер Е.)
58. Русаков И. Г., Первая всесоюзная акустическая конференция 27—30 сентября 1931 г. ЖТФ, 1, 732 (1931).
59. Ржевкин С. Н., Первая всесоюзная акустическая конференция. Соц. реконструкция и наука, № 2—3, стр. 263 (1931).
60. Руководящие указания по устройству и эксплуатации радиостудий. Труды НТУ НКПиТ, IV, 78 (1931).
61. Сухаревский Ю. М., К вопросу об эксплуатации музыкальных ансамблей в радиостудии. Труды НТУ НКПиТ, IV, 57 (1931).
62. Сухаревский Ю. М., Музыкальный ансамбль в радиостудии. Радиофронт, № 21—22, стр. 1273 (1931).
63. Тер-Осипян С. Т., О звукоизоляции радиостудий. Труды НТУ НКПиТ, IV, 37 (1931).
64. Хламов В., Защита нового Берлинского радиодома от шумов. Радиофронт, № 6, стр. 372 (1931).

1932

63. Алексеев С. П., Изменения в радиостудиях при низовых вещательных узлах. Техника связи, № 6, стр. 15 (1932).
66. Алексеев С. П. и Тер-Осипянц С. Т., Устройство и эксплуатация малых студий. Техника связи, № 6, стр. 11 (1932).
67. Белов А. И., Чем занимаются акустические лаборатории Советского Союза. ЖТФ, 2, 62 (1932).
68. Зейтленок И. А., Проектирование радиостудий. Техника связи, № 11, стр. 40; № 12, стр. 40 (1932).
69. Зейтленок И. А., Основные принципы проектирования радиодворца. Радиофронт, № 10, стр. 19 (1932).
70. Калошин Г. К., Оборудование радиовещательных узлов. Техника связи, № 12, стр. 27 (1932).
71. Лифшиц С. Я., Акустика Дворца Советов. Соц. реконструкция и наука, № 6, стр. 206 (1932).
72. Лифшиц С. Я., Оптимум реверберации. ЖТФ, 2, 136 (1932).
73. S. Lifshitz, Acoustics of Large Auditorium. JASA, 4, 112 (1932).
74. Лучшие размеры для студий. (Без автора.) Радиофронт, № 2, стр. 73 (1932).
75. Покрасов А., Радиофикация Северного вокзала. Радиофронт, № 20, стр. 56 (1932).
76. Розенберг Л. Д., Суммарная реверберация при записи и воспроизведении звука. ЖТФ, 2, 139 (1932).
77. Сапожков М. А., Краткое сообщение о работе Акустического отдела ЦРЛ и Акустической лаборатории ЛЭТИ по акустике помещений. ЖТФ, 2, 143 (1932).
78. Сапожков М. А., Замечания к акустике помещений. ЖТФ, 2, 395 (1932).
79. Сапожков М. А., Исследование акустических свойств помещений. Вестник ЛЭТИ, № 1 (1932).
80. Федунович В. С., К вопросу о псмехах для радиостудий. Техника связи, № 3, стр. 77 (1932).
81. Эгерт А., Расположение громкоговорителей. Радиофронт, № 10, стр. 33 (1932).

1933

82. Алексеев С. П., Вопросы радиохроники. Техника связи, № 5, 25 (1933).
83. Алексеев С. П. и Ипатов Л. Г., Методы радиофикации производственных помещений. Техника связи, № 7, стр. 18 (1933).
84. Андреев Н. Н., Строительная акустика. Техническая энциклопедия, 22, 183 (1933).
85. Беляев С. В., Акустика помещений. М., Госстройиздат (1933).
86. Гольдберг Г. А. и Рабинович В. А., Радиофония. М., Радиоиздат (1933).
87. Дрейзен И. Г., Электроакустика в широковещании. М., Связьтехиздат (1933).
88. Лифшиц С. Я., Акустика больших аудиторий. ЖТФ, 3, 1062 (1933).
89. Лифшиц С. Я., Два интегральных закона восприятия. Громкость и протяженность звукового импульса. ЖТФ, 3, 1057 (1933).
90. S. Lifshitz, Zwei Integralgesetze des Hörens. Zeits. f. Phys., 83, 128 (1933).
91. S. Lifshitz, Two Integral Laws of Sound Perception. Relating Loudness and Apparent Duration of Sound Impulses. JASA, 5, 31 (1933).
92. Мошонкин М. Я., Устройство ателье на фабриках звуковых фильмов. Кино-фото-промышленность, № 2, стр. 3 (1933).

93. Ржевкин С. Н., Методы исследования шумов. В книге «Проблема изучения шумов». Сборник статей под ред. С. Н. Ржевкина. М.—Л. (1933).  
 94. Русаков И. Г., Об измерении звукоизоляции. ЖТФ, 3, 388 (1933).  
 95. Сапожков М. А., Замечания к теории колебаний одномерного пространства. ЖТФ, 4, 1109 (1934).  
 96. Сапожков М. А., Метод и аппаратура для исследования акустических свойств помещений. Кино-фото-промышленность, № 2, стр. 74 (1933).

## 1934

97. Дрейзен И. Г., К вопросу о расчёте звукового давления в поле излучения ансамбля, ЖТФ, 4, 649 (1934).  
 98. Лифшиц С. Я., Протяжённость звука и музыкальный оптимум реверберации. ЖТФ, 4, 1740 (1934).  
 99. Лифшиц С. Я., Зашла ли архитектурная акустика в тупик? Архитектура СССР, № 10, стр. 70 (1934).  
 100. Лифшиц С. Я., Проблема акустики Дворца Советов. Архитектура СССР, № 5, стр. 74 (1934).  
 101. Людвиг Г. Д., Новое в акустике общественных сооружений. Архитектура СССР, № 1, стр. 61 (1934).  
 102. Людвиг Г. Д., Строительная акустика под ударами т. Лифшица. Архитектура СССР, № 10, стр. 72 (1934).  
 103. Митягина З. И., Автоматический реверберограф и применение его к изучению различных вопросов акустики помещений. ЖТФ, 4, 1575 (1934).  
 104. Рабинович А. В., Эффект расстояния в радиостудиях. ЖТФ, 4, 1134 (1934).  
 105. Розенберг Л. Д., Основы технической акустики. Харьков, (1934) (На укр. языке.)  
 106. Сапожков М. А., К вопросу о связанных помещениях. ЖТФ, 4, 822 (1934).  
 107. Сапожков М. А., К вопросу об определении оптимальной реверберации в связанных помещениях. ЖТФ, 4, 1588 (1934).

## 1935

108. Всесоюзная акустическая конференция (2-я, Москва, 1935.) Тезисы докладов. М.—Л., Из-во АН СССР (1935).  
 109. Гольдберг Г. А. и Тер-Осипянц С. Т., Измерения реверберации в Московских залах (зал Дома учёных и Октябрьский зал Дома союзов). Отчёты Государственной союзной лаборатории звукозаписи (ГСЛЗ), 1—99—35 (1935). (Неопубл.)  
 110. Индлин А. И. и Качерович А. Н., Об оптимальных условиях в звуковых кинотеатрах. ЖТФ, 5, 928 (1935).  
 111. Индлин А. И. и Качерович А. Н., Замечания к акустическим условиям синхронных съёмок в ателье. ЖТФ, 5, 939 (1935).  
 112. Индлин А. И. и Качерович А. Н., Об электрической мощности в звуковых кинотеатрах. ЖТФ, 5, 1298 (1935).  
 113. Рабинович А. В. и Гольдберг Г. А., Радиофония. М., Связьиздат (1935), 2-е изд.  
 114. Ржевкин С. Н., Исследование артикуляции и понятности речи в Московском планетарии. ЖТФ, 5, 1303 (1935).  
 115. Розенберг Л. Д., Акустика помещений. Радио, №№ 5, 6, 7, 8 (1935). (На укр. языке.)  
 116. Сапожков М. А., Об определении оптимального поглощения в связанных помещениях. Научно-техн. сб. Эл.-техн. ин-та связи, № 15, стр. 38 (1935).

1936

117. Андреев Н. Н., О скольжении звука вдоль поглощающих границ. Изв. АН СССР, серия физ., 5, 625 (1936).
118. Бесшумные кабины самолёта. Наука и техника, № 14, стр. 17 (1936).
119. Верховская И. Н., Голосники и их роль в акустике помещений. Труды Научно-исследовательского муз. ин-та Московской гос. консерватории. Акустический сборник, вып. 1, стр. 46 (1936).
120. Гольдберг Г. А. и Тер-Осипянц С. Т., Восприятие реверберации. Отчёты ГСЛЗ, 1—83 (1936). (Неопубл.)
121. Гольдовский Е., К вопросу о шуме внутри кабины самолёта. Гражданская авиация, № 1, стр. 45 (1936).
122. Дрейзен И. Г., Распределение звукопоглощающего материала в радиостудии. ЖТФ, 6, 2131 (1936).
123. J. Dreisen, The orientation of the natural acoustics vibrations in room with concentrated absorbents and of anomalous shapes. Techn. Phys. of USSR, 3, 1 (1936).
124. Ипатов Л. Г., Измерения коэффициентов поглощения на угловой у становке, ЖТФ, 6, 2151 (1936).
125. Казанский В. С., Современная техника борьбы с шумом. ЖТФ, 6, 2200 (1936).
126. Качерович А. Н. и Индлин А. И., Методика акустического расчёта звуковых кинотеатров. М., Росснабсбыткино (1936).
127. Кельберг В. П., Мясников Л. Л. и Стоценко М. П., Упрощённый способ определения коэффициента звукоизоляции материалов. ЖТФ, 6, 2145 (1936).
128. Лейзер И. Г., Акустический анализ чертежей Мюзик-холла Рокфеллеровского центра в Нью-Йорке. Отчёты СДС № СП-215 (1936). (Неопубл.)
129. Лейзер И. Г., Дифракция звуковых волн у колоннады Большого зала ДС. Отчёты СДС № СП-231 (1936). (Неопубл.)
130. Лифшиц С. Я., Всесоюзная акустическая конференция 1—5 декабря 1935 г. Обзор докладов. Соц. реконструкция и наука (1936).
131. Лифшиц С. Я., Оптимальная частотная характеристика звукопоглощающего материала, ЖТФ, 6, 2127 (1936).
132. S. Lifshitz, Apparent Duration of Sound Perception and Musical Optimum Reverberation. JASA, 7, 213 (1936).
133. Малюжинец Г. Д., Звукопоглощение пористого слоя с перфорированным покрытием, расположенного на расстоянии от жёсткой стенки. Доклад на заседании Акустической комиссии АН СССР от 13 декабря 1936 г. (Неопубл.)
134. Малюжинец Г. Д., Расчёт звукопроводимости перфорированных экранов через присоединённую массу. Доклад на заседании Акустической секции ассоц. физики НКТП 2 октября 1936 г.
135. Невяжский Г. Л., Шумовая вредность в свете новых исследований. ЖТФ, 6, 2195 (1936).
136. Остроумов Г. А., Электроакустика. М., 1936.
137. Рабинович А. В., Основы акустики, М., Кинофотоиздат (1936).
138. Ржевкин С. Н., Вторая всесоюзная акустическая конференция. УФН, 16, 267 (1936).
139. Ржевкин С. Н., О резонансном звукопоглощении. ЖТФ, 6, 2103 (1936).
140. Ржевкин С. Н., Об итогах работы второй всесоюзной акустической конференции. Вестник АН СССР, № 1 (1936).
141. Ржевкин С. Н., Resonance absorbtion of sound. Techn. Phys. of USSR, 3, 1 (1936).

142. Розенберг Л. Д., Вторая всесоюзная акустическая конференция. Сов. кино, № 1, стр. 50 (1936).
143. Симонов И. Д., Локализация звука в закрытых помещениях. Труды Научно-исследовательского муз. ин-та Московской гос. консерватории, Акустический сборник, вып., 1, стр. 37 (1936).
144. Симонов И. Д., Установка для измерений реверберации. Труды Научно-исследовательского муз. ин-та Московской гос. консерватории. Акустический сборник, вып., 1, стр. 41 (1936).
145. Фурдурев В. В., Архитектурная акустика. Физический словарь, 1, 190 (1936).
146. Шафранов А. С., Об акустических заглушках. ЖТФ, 6, 2188 (1936).
147. Шнейдер Ю. И., Измерения некоторых звукопоглощающих материалов реверберационным методом. ЖТФ, 6, 2147 (1936).
148. Штрассберг Э., Изоляция зданий от шума и сотрясений. Вестник науки и техники, № 7, стр. 21 (1936).

## 1937

149. Алексеев С. П., Шум вентиляционных шахт метро и борьба с ним. ЖТФ, 7, 242 (1937).
150. Анцыферов М. С., Расчет коэффициента поглощения материала, пронизанного трубами с поглощающими стенками. Отчеты СДС (1937).
151. Анцыферов М. С., Расчет частотного спектра системы грибообразных цилиндрических резонаторов. Труды Научно-иссл. кино-фото-института (НИКФИ) 6, 138 (1937).
152. Анцыферов М. С., Резонансное звукопоглощение. Труды НИКФИ, 6, 154 (1937).
153. Анцыферов М. С. и Михеева Н. К., Установка для реверберометрического определения коэффициентов поглощения звука. Труды НИКФИ, 6, 164 (1937).
154. Белов А. И., Применение теории четырёхполюсников в архитектурной акустике. ЖТФ, 7, 2041 (1937).
155. Гинзбург А. М., Устройство концертных раковин в садах. ЖТФ, 7, 163 (1937).
156. Гольдберг Г. А. и Тер-Осипьянц С. Т., Восприятие реверберации. Отчеты ГСЛЗ, 1—100 (1937).
157. Д. С., По поводу статьи Яцкевича «Стереоскопическая передача по одному каналу». Техника связи, № 1 (1939).
158. Дрейзен И. Г., Об акустическом эффекте расстояния и восприятия тембра при радиопередаче. ЖТФ, 7, 861 (1937).
159. Качерович А. Н., Исследования конструкций для акустической обработки звуковых ателье. Отчеты Научно-иссл. сект. Ленингр. ин-та киноинженеров (ЛИКИ) (1937). (Неопубл.)
160. Качерович А. Н., Конспект лекций по архитектурной акустике. Ленингр. ин-т киноинженеров (1937). (Литографир.)
161. Кречмер С. И. и Ржевкин С. Н., Исследование волновых процессов по методу моделей с применением ультраакустических волн. УФН, 18, 1 (1937).
162. Лифшиц С. Я., Курс архитектурной акустики. Изд. 3-е, М.—Л., ОНТИ (1937).
163. Лифшиц С. Я., Экспериментальные исследования над частотным оптимумом реверберации. ДАН СССР, 15, 317 (1937).
164. Михеева Н. К., Измерение коэффициентов поглощения материалов, употребляемых для заглушения киноателье. Труды НИКФИ, 6, 173 (1937).
165. Малюжинец Г. Д., Влияние перфорированного экрана на звукопоглощение материала. Отчеты СДС, ТР 20010 (1937). (Неопубл.)

166. Малюжинец Г. Д., Звукопроводимость экрана с большим числом малых отверстий с применением звукопоглощающих материалов. Отчёты ГСЛЗ (1937). (Неопубл.)

167. Малюжинец Г. Д., Ржевкин С. Н. и Тер-Осипянц С. Т., Теоретические соображения об установках для получения сильного звукопоглощения купола, ч. 1. Отчёты СДС, ТР 20016 (1937). (Неопубл.)

168. Мясников Л. Л., Акустические измерения. Л.—М., ОНТИ (1937).

169. Розенберг Л. Д., Некоторые соображения о суммарной реверберации. ЖТФ, 7, 2167 (1937).

170. Скребков С. С., Теория термозлемента в связи с измерением реверберации. ЖТФ, 7, 1268 (1937).

171. Тер-Осипянц С. Т., Разработка звукопоглощающих конструкций для студии «С». Отчёты ГСЛЗ, 1—81 (1937). (Неопубл.)

172. Фурдуев В. В., Метод акустического проектирования аудиторий, оборудуемых громкоговорящими устройствами. ДАН СССР, 15, 313 (1937).

173. Фурдуев В. В., О методах акустического проектирования звуковых кинотеатров. Кино-фото-химпромышленность, № 7, 31 (1937).

174. Яцевич В., Стереоскопическая передача по одному каналу. Техника связи, № 1, стр. 38 (1937).

## 1938

175. Алексеев С. П., Абсорбент для облицовки тубингов Московского метрополитена второй очереди. ЖТФ, 8, 906 (1938).

176. Алексеев С. П., Звукоизоляция в строительстве промышленных, жилых и общественных зданий. М.—Л., ОНТИ (1938).

177. Белов А. И., Затухание звука в трубах с поглощающими стенками. ЖТФ, 8, 752 (1938).

178. Белов А. И., Об акустическом расчёте вентиляционных установок. ЖТФ, 8, 64 (1938).

179. Бойко Л. А., Собственные колебания длинных волн в прямом круглом цилиндре с перегородкой. Учен. зап. Моск. госуд. университета, вып. XXIV, кн. 2, стр. 28 (1938).

180. Высоцкий М. З. и Коноплёв В. Н., Пространственное воспроизведение звука в широкоэ debateции и звуковом кино. ЖТФ, 8, 399 (1938).

181. Высоцкий М. З. и Коноплёв В. Н., Пространственное воспроизведение звука в широкоэ debateции и звуковом кино. Известия Электропромышленности слабого тока (ИЭСТ), № 2, 40 (1938).

182. Галенков. Борьба с шумом в аппаратных Бодо. Техника связи, № 5, стр. 54 (1938).

183. Гольдберг Г. А. и Тер-Осипянц С. Т., Восприятие реверберации. Отчёты ГСЛЗ, 1—84 (1938). (Неопубл.)

184. Горон И. Е., Студии Национальной радиовещательной компании в Нью-Йорке. Электросвязь, № 1 (1938).

185. Григорьев В. С., Горбачёв Н. В. и Молчанов А. И., Вопросы кинофикации больших аудиторий. Кино-фото-промышленность (1938).

186. Дрейзен И. Г., Курс электроакустики. ч. 1, Связьрадиоиздат (1938).

187. Индлин А. И., Акустика. М., Госкиноиздат (1938).

187а. Индлин А. И., К вопросу об акустических условиях в кинотеатре при синхронной съёмке. Кино-фото-промышленность, № 6 (1938), стр. 18.

188. Качерович А. Н., Об оптимальных условиях в ателье для записи звука Труды ЛИКИ (1938).

189. Козырев, О возможности исследования на моделях акустических свойств Большого и Малого залов Дворца Советов. Отчёты СДС ТР 20013 (1938). (Неопубл.)

190. Кречмер С. И. и Ржевкин С. Н., Применение ультраакустических волн к исследованию волновых процессов на моделях. Труды физ. ин-та им. П. Н. Лебедева, 1, вып. 4, 48 (1938).

191. Лифшиц С. Я., Реверберация. Физический словарь, 4, 606 (1938).

192. Малюжинец Г. Д., Теория звукопоглощения и влияние упругого крепления материала на звукопоглощение. Отчёты СДС, ТР 20011 (1938). (Неопубл.)

193. Малюжинец Г. Д., Звукопроводимость экрана с большим числом малых отверстий с применением звукопоглощающих материалов. Диссертация, МГУ (1938).

194. Маков С. А. и Бурин Р. Я., Выбор метода расчёта акустической мощности для звукофикации закрытых помещений. Отчёты СДС, ТР 12810 (1938). (Неопубл.)

195. Невяжский Г. Л. и Супонин К. И., Новая методика и аппаратура для измерения производственных шумов. ЖТФ, 8, 243 (1938).

196. Ржевкин С. Н., О возможности получения больших коэффициентов поглощения звука при помощи систем резонаторов. ДАН СССР, 18, 25 (1938).

197. Сапожков М. А. Влияние помещения на к.п.д. громкоговорителей. Электросвязь, № 5, 80 (1938).

198. Соколов И. Т., Реверберометр. Физический словарь, 4, 607 (1938).

199. Тер-Осипянец С. Т., Звукопоглощающая конструкция для студии «С». Отчёты ГСЛЗ, 1—86 (1938). (Неопубл.)

200. Тер-Осипянец С. Т., Измерения звукопоглощающих образцов арборитовых пластин на резонансных ячейках. Отчёты ГСЛЗ, 1—93 (1938). (Неопубл.)

201. Тер-Осипянец С. Т., Разработка поглощающих конструкций для студии «А». Отчёты ГСЛЗ, 1—91 (1938). (Неопубл.)

202. Тетельбаум С. И. и Высоцкий В. Ф., Повышение коэффициента артикуляции громкоговороения при шумных аудиториях. ИЭСТ, 1, 17 (1938).

203. Фурдуев В. В., О приёме ревербирующего звука микрофонами направленного действия. Кино-фото-промышленность, № 5, стр. 24 (1938).

204. Шнейдер Ю. И. и Грановский А. М., Вещание из заглушённого помещения с использованием комнаты эхо. Техника связи, № 4, стр. 13 (1938).

205. Шнейдер Ю. И., Борьба с шумами в вентиляционных каналах промышленных и общественных сооружений. ЖТФ, 8, 1671 (1938).

1939

206. Алексеев С. П., Звукопоглощающие материалы, разработанные в Московском архитектурном институте. Труды Акустической комиссии АН СССР, 3, стр. 65, М.—Л. (1939).

207. Алексеев С. П. и Шнейдер Ю. И., Борьба с городскими и заводскими шумами. (Для архитекторов и инженеров строителей.) М., Госстройиздат (1939).

208. Алексеев С. П. и Шнейдер Ю. И., Шум в вентиляционных установках и борьба с ним. Изд. Промстройпроект, вып. 16 (1939).

209. Андреев Н. Н., О пористых звукопоглощающих материалах. Труды Акустической комиссии АН СССР, 3, стр. 9 (1939).

209а. Андреев Н. Н. и Лысенко Е. Е., Звукопоглощение пористого материала при учёте пористости и воздушной прослойки. Труды Акустической комиссии АН СССР, 2, 7 (1939).

210. Андреев Н. Н. и Лысенко Е. Е., О звукопоглощении перфорированных материалов. Труды Акустической комиссии, 2, 17 (1939).

211. Андриевский В. А., Акустический пемзолит. Обзор исследовательских работ за 1938 г. Отчёты СДС, ТР 20049 (1939). (Неопубл.)
212. Андриевский В. А., Керамические акустические материалы. Обзор исследовательских работ за 1938—1939 гг. Отчёты СДС, ТР 20050 (1939). (Неопубл.)
213. Аицыферов М. С., Измерение вибрации балласта пути Московского метрополитена. Отчёты СДС, РДТ 20613 (1939). (Неопубл.)
214. Белов А. И. и Файнштейн Н. Д., Экспериментальное исследование заглушения звука в вентиляционных каналах. ЖТФ, 9, 1499 (1939).
215. Гольдберг Г. А., Измерения звукопоглощающих материалов. Труды Акустической комиссии АН СССР, 3, 33 (1939).
216. Гольдберг Г. А., К вопросу о зависимости коэффициента звукопоглощения от размеров образца. Труды Акустической комиссии АН СССР, 3, 37 (1939).
217. Гольдберг Г. А., Современные методы измерения реверберации. Труды Акустической комиссии АН СССР, 1, 43 (1939).
218. Гольдберг Г. А., Об эффективной реверберации. Автореферат отчёта Строительства Московского радиодома. Труды Акустической комиссии АН СССР, 3 (1939).
219. Гольдберг Г. А. и Тер-Осипянц С. Т., Корректирование акустики студии «В» Дома звукозаписи. Отчёты ГСЛЗ, 1—81 (1939). (Неопубл.)
220. Гроссман В., Дом звукозаписи в Москве. Архитектура СССР, № 10, стр. 24 (1939).
221. Егоров Ю. Н. Звукопоглощающая камера Всесоюзного научно-исследовательского института метрологии. Труды Акустической комиссии, 3, 43 (1939).
222. Засурский Н. В., Технология производства звукопоглощающих строительных материалов. (Из работ Лаборатории изоляционных материалов Центрального научно-исследовательского института промышленных сооружений.) Труды Акустической комиссии, 3, 55 (1939).
223. Качерович А. Н., Акустика. (Учебное пособие для заочного отделения Всесоюзных курсов киномехаников.) Госкиноиздат (1939).
224. Козырев В. В., Исследование акустических свойств Большого зала методом светового пучка на модели. Отчёты СДС, ТР 20025 (1939). (Неопубл.)
225. Козырев В. В., О методах работы с моделями по исследованию прохождения звука методом светового пучка. Отчёты СДС, ТР 20030 (1939). (Неопубл.)
226. Косцов А. М., Эффективное значение реверберации. ЖТФ, 9, 919 (1939).
227. Константинов Б. П., О поглощении звуковых волн при отражении от твёрдой границы. ЖТФ, 9, 226 (1939).
228. Константинов Б. П. О заглушении звука в помещении с твёрдыми стенками и о диффузном коэффициенте поглощения. ЖТФ, 9, 424 (1939).
229. Маков С. А., Методика расчёта звукофикации помещений удлиненной формы. Отчёты СДС, ТР 20324 (1939). (Неопубл.)
230. Малюжинец Г. Д. Звукопоглотитель для Большого зала Дворца Советов. Доклад на сессии физ.-мат. отделения АН СССР (1939).
231. Малюжинец Г. Д., Звукопоглощение пористого материала при учёте продольной пористости и воздушной подложки. Отчёты СДС, ТР 20002 (1939). (Неопубл.)
232. Малюжинец Г. Д., О возможности применения перфорированного листа для облицовки купола Большого зала Дворца Советов. Отчёты СДС, ТР 20002 (1939). (Неопубл.)
233. Малюжинец Г. Д., Постановка задачи о нахождении оптимального распределения трения в звукопоглощающем слое для случая нор-

мального падения звуковой волны. Отчёты СДС, ТР 20043 (1939). (Неопубл.)

234. Мельников Ф. И., Газокерамические акустические материалы. Отчёты СДС, ТР 2005 (1939). (Неопубл.)

235. Натаров Б. Ф., Исследование влияния различных частей частотного спектра на локализацию источника звука и на порог расходимости в помещении. Отчёты СДС, ТР 20318 (1939). (Неопубл.)

235а. Натаров Б. Ф., Исследование зависимости звукового образа от разных уровней громкости двух работающих говорителей. Отчёты СДС. (Неопубл.)

236. Натаров Б. Ф., Локализация источника звука в помещениях. Отчёты СДС, ТР 20316 (1939). (Неопубл.)

236а. Натаров Б. Ф., Исследование порогов и углов расходимости звукового и зрительного образов. Отчёты СДС. (Неопубл.)

237. Нестеров В. С., Исследование одно- и двухслойных резонансных поглотителей звука методом трубы. Отчёты СДС, ТР 20042 (1939). (Неопубл.)

238. Нестеров В. С., Поглощение звука двойными резонансными системами. ЖТФ, 9, 1727 (1939).

239. Новиков А. Ф. и Римский-Корсаков А. В., Звукопоглощающая камера Научно-исследовательского ин-та музыкальной промышленности. Труды Акустической комиссии АН СССР, 3, 49. В книге «Акустические измерения», М. — Л. (1939).

240. Пустовойтенко И. П., Расчёт коэффициента звукопоглощения материала, пронизанного трубами с поглощающими стенками. Труды Акустической комиссии АН СССР, 2, 25 (1939).

241. Рабинович А. В., Оборудование и эксплуатация студий. М., Связьрадиоиздат (1939).

242. Рабинович А. В. и Сухаревский Ю. М., Радиовещательные студии и микрофоны. М., Связьрадиоиздат (1939).

243. Ржевкин С. Н., Поглощение звука акустическими резонаторами. Труды Акустической комиссии АН СССР, 3, 133 (1939).

244. Ржевкин С. Н., Теория и устройство простейших резонансных звукопоглощающих систем. ДАН СССР, 22, 568 (1939).

245. Римский-Корсаков А. В., Критический обзор способов усиления звука в весьма больших помещениях. Труды Акустической комиссии АН СССР, 2, 79 (1939).

246. Римский-Корсаков А. В. и Струве К. В., Об отражении звуковых волн от поверхности, размеры которой сравнимы с длиной волны. Труды Акустической комиссии АН СССР, 2, 69 (1939).

247. Розенберг Л. Д., Акустика Большого зала Дворца Советов. Архитектура СССР, № 4, стр. 53 (1939).

248. Розенберг Л. Д. и Тартаковский Б. Д., Акустика во Дворце Советов. Строит. промышленность, № 11—12, стр. 42 (1939).

249. Сапожков М. А., Эффективность звукопоглощения ниш различной формы. Труды Акустической комиссии АН СССР, 2, 49 (1939).

250. Седов Л. И., Определение присоединённой массы косой решётки, состоящей из прямоугольников. Отчёты СДС, ТР 20037а (изложено в книге: «Плоские движения идеальной жидкости»), М. (1940).

251. Седов Л. И., Присоединённая масса решётки, состоящей из прямоугольников. Отчёты СДС, ТР 20022 (1939). (Неопубл.)

252. Симонов Д. И., Метод расчёта эхо от цилиндрической стены. Отчёты СДС, ТР 20047 (1939). (Неопубл.)

253. Сурин Г. А., Вибрации в жилых домах и сравнение их с шумом. Отчёты СДС, ТР 20619 (1939). (Неопубл.)

254. Сурин Г. А., Вибрации фундаментов Дворца Советов от проходящих поездов метро. Отчёты СДС, ТР 20617 (1939). (Неопубл.)

255. Сури́н Г. А., Прибор для определения упругих свойств звукоизолирующих прокладок. Отчёты СДС, ТР 20616 (1939). (Неопубл.)
256. Сухаревский Ю. М., Методы расчёта звукового поля рупорного громкоговорителя. Изв. ОТН АН, 7, 73 (1939).
257. Сухаревский Ю. М., О плотности звуковой энергии в помещении при направленном излучателе. ДАН СССР, 25, 16 (1939).
258. Тер-Осипя́нц С. Т., Исследование монорезонансного поглотителя методом трубы. Отчёты ГСЛЗ (1—90) (1939). (Неопубл.)
259. Тер-Осипя́нц С. Т., Определение звукопоглощающего действия звукопоглощающих конструкций в помещении. Отчёты СДС, ТР 20046 (1939). (Неопубл.)
260. Тер-Осипя́нц С. Т. и Гольдберг Г. А., Маскировка эхо импульса затухающим звуком. Отчёты СДС, ТР 20045 (1939). (Неопубл.)
261. Тимофеев А. К., Пособие по прикладной акустике для строителя. М., Госстройиздат (1939).
262. Харкевич А. А., Акустические измерения в замкнутых помещениях. Труды Акустической комиссии АН СССР, 1, 65 (1939).
- 262а. Харкевич А. А., Автоматизация акустических измерений. Труды Акустической комиссии АН СССР, 1, 27 (1939).
263. Ходаркевич В. И., Акустическая штукатурка. Отчёты СДС, ТР 20067 (1939). (Неопубл.)
264. Цикунов В., О колебаниях внутри ниши, открытая поверхность которой возбуждена заданным образом. Труды Акустической комиссии АН СССР, 3, 37 (1939).
265. Чигринский Г. А., Картина отражений и элементы акустики призматических многогранников, ЖТФ, 9, 2120 (1939).
266. Чигринский Г. А., Картина отражений и реверберация незамкнутых пространств. ЖТФ, 9, 1484 (1939).
267. Чигринский Г. А., Картина отражений и её применение в архитектурной акустике. ДАН СССР, 23, 631 (1939).
268. Шабшев К. Н., Вопросы городских шумов и борьба с ними. Л. (1939).

## 1940

269. Акустические материалы и их применение. Работы Лаборатории строит. акустики и изоляц. материалов. Составлено А. К. Тимофеевым, М., Госстройиздат (1940).
270. Андреева-Галанина Е. Ц., Вибрации, их гигиеническое значение и меры борьбы с ними. Л., Изд. Института гигиены труда и профзаболеваний (1940).
271. Анцыферов М. С., Акустика аудиторий. Физика в школе, № 3 (1940).
272. Виталь К. А., О косом падении звука на резонансный поглотитель. ЖТФ, 10, 980 (1940).
273. Виталь К. А., Применение теории Кремера и пористые материалы типа пемзолит. Отчёты СДС, РДП-4—33 (1940). (Неопубл.)
274. Гасско Р. Э., Вибрации и шум в домах над трассой метрополитена. Отчёты СДС, РДП-4—31 (1940). (Неопубл.)
275. Гасско Р. Э. и Садиков Ю. Н., Машина для измерения импеданцев звукоизолирующих прокладок. Отчёты СДС, РДП-6—4—27 (1940). (Неопубл.)
276. Григорьянц Н., Колебания, волны и акустика. М., Военно-возд. ордена Ленина Академия РККА им. Жуковского (1940).
277. Гуревич М. И., Присоединённая масса элемента двойной решётки из плоских пластинок. Отчёты СДС, ч. 1, РДП-84—1; ч. 2, РДП-82—2 (1940). (Неопубл.)

278. Давыдова Ф. Л., Акустические материалы для слоистой звукопоглощающей конструкции. Отчёты СДС, ДДТ-1—3 (1940). (Неопубл.)
279. Дрейзен И. Г., Курс электроакустики. ч. II, Звукофикация. М., Связьрадиоиздат (1940).
280. Дроздов П. Ф., Стереофоническая равномерность поля распределённых излучателей. Отчёты СДС, РДП-4—61 (1940). (Неопубл.)
281. Казанский В. С., Основные причины шума эскалаторов Московского метрополитена. ЖТФ, 10, 1251 (1940).
282. Качерович А. Н., Исследование акустики ателье и синхронных павильонов (киностудий Ленфильма). Л., Техфильм, Отчёт (1940). (Неопубл.)
283. Кельберг В. П. и Ладыженский Р. М., Борьба с шумом в вентиляционных установках. М.—Л., Гос. из-во строительной литературы (1940).
284. Климова А. Я., Расчёт кривых звукопоглощения однослойных конструкций. Отчёты СДС, РДП-4—39 (1940). (Неопубл.)
285. Крашенинников Ю. П., Звукопоглощающие свойства тканей. Отчёты СДС, РДП-4—23 (1940). (Неопубл.)
286. Крашенинников Ю. П., Описание щелевой установки для измерения импеданца звукопоглощающих материалов. Отчёты СДС, ТР 20044 (1940). (Неопубл.)
287. Леноблнито силикатной промышленности. Физические методы определения характера пористости как показателя акустического качества керамических материалов. Отчёты СДС, ТР 20063 (1940). (Неопубл.)
288. Макаров А. В., Электролитический метод измерения звукопроводности экранов. Отчёты СДС, РДП-4—12 (1940). (Неопубл.)
289. Малюжинец Г. Д., О влиянии веса перфорированного экрана на его звукопроводность. Отчёты СДС, РДП-4—53 (1940). (Неопубл.)
290. Маслова В. П., Экспериментальное исследование акустических характеристик звукопоглощающих материалов. Отчёты СДС, РДП-4—49 (1940). (Неопубл.)
291. Мельников Ф. И., Отчёт по теме: Акустическая газокерамика, ч. I. Отчёты СДС, РДП-1—2 (1940). (Неопубл.)
292. Моск. инст. инженеров связи. Исполнитель Гольдберг Г. А., Исследование ревербераторных систем для ДС. (Исследование реверберации и маскировка эхо реверберацией.) Отчёты СДС, ТР 20322 и РДТ-31—2 (1940). (Неопубл.)
293. Натаров Б. Ф., К вопросу о расположении говорителей в кино-театрах. Кино-фото-химпромышленность, № 3, стр. 14 (1940).
294. Нестеров В. С., Поглощение звука трёхслойной резонансной системой. ЖТФ, 10, 617 (1940).
295. Новаховская Д. С., Звукопоглощающий материал — пемзолит. Пром. стройматериалов, № 10—11, стр. 38 (1940).
296. Рабинович А. В., Акустика Московского телевизионного центра. Электросвязь, № 4, стр. 62 (1940).
297. Рабинович А. В., О заметности эхо и его влиянии на разборчивость речи, ЖТФ, 10, 605 (1940).
298. Рабинович А. В., Телефонные кабины открытого типа. Отчёт СДС, РДП-4—15 (1940). (Неопубл.)
299. Розенберг Л. Д., О влиянии среднего коэффициента звукопоглощения на уровень силы звука. ЖТФ, 10, 1634 (1940).
300. Рудник В. М., Измерения звукоизоляции стен из керамиковых блоков. Отчёты СДС, РДП-4—41 (1940). (Неопубл.)
301. Свирский И. В., Математическое исследование оптимального распределения трения в звукопоглощающем слое. Отчёты СДС, ТР 20061 (1940). (Неопубл.)
302. Смоликов Я. Н., Колебания промышленных зданий и мероприятия по их уменьшению. Вестн. инж. и техн., № 1, стр. 36 (1940).

303. Сури́н Г. А., Вибрации фундамен́тов Дворца Советов и роль звукоизоляции. Отчёты СДС, РДП-4—34 (1940). (Неопубл.)

304. Сури́н Г. А., Измерение скоростей колебаний (вибраторы и градуировочная плита для них). Отчёты СДС, ТР 20618 (1940). (Неопубл.)

305. Сухаре́вский Ю. М., Влияние акустических условий в помещении на разборчивость воспроизведения. Глава из диссертации. МЭИ (1940).

306. Сухаре́вский Ю. М., К теории акустической обратной связи в звукоусилительных системах. ДАН СССР, 26 (1940).

307. Сухаре́вский Ю. М., О плотности звуковой энергии в помещении при направленном излучателе. ДАН СССР, 25, 1 (1940).

308. Сухаре́вский Ю. М., О предельно возможном усилении звука в закрытом помещении. ДАН СССР, 26, 839 (1940).

309. Сухаре́вский Ю. М., Об использовании запаздывающей обратной связи для получения искусственной гулкости. Отчёты СДС, ТР 20058 (1940). (Неопубл.)

310. Сухаре́вский Ю. М., Экспериментальное исследование акустической обратной связи в закрытом помещении. ДАН СССР, 26, 646 (1940).

311. Чу́гунов С. С., Описание высокочастотной установки для измерения звукопроводности и звукопоглощения. Отчёты СДС, ТР 20055 (1940). (Неопубл.)

312. Шварц Б. П., Проектирование зрительного зала звукового кинотеатра. Кино-фото-химпромышленность, № 4, стр. 18 (1940).

313. Шнейдер Ю. И., Акустическое оборудование типовых студий. Электросвязь, № 4, стр. 25 (1940).

314. Яковлев Л. А., Измерения передачи шума толпы в помещениях фойе театра им. Вахтангова. Отчёты СДС, РДП-4—5 (1940). (Неопубл.)

315. Яковлев Л. А., Измерения шума метро в зданиях Музея изобразительных искусств им. Пушкина и библиотек им. Ленина. Отчёты СДС, ТР 20621 (1940). (Неопубл.)

316. Яковлев Л. А., Измерения шума мусородробилки. Отчёты СДС, РДП-64—7 (1940). (Неопубл.)

317. Яковлев Л. А., Измерения шума центробежного насоса в домах ДС. Отчёты СДС, РДП-4—3 (1940). (Неопубл.)

318. Яковлев Л. А., Измерения шума лифта фирмы «Отис» в доме НКТ. Отчёты СДС, ТР 20620 (1940). (Неопубл.)

319. Яковлев Л. А., Измерения шумов вентиляционных установок большой производительности и звукоизоляция глушителей. Отчёты СДС, ТР 20608 (1940). (Неопубл.)

320. Яковлев Л. А., Измерения шума вентиляции в Доме звукозаписи. Отчёты СДС, РДП-4—38 и ТР 20615 (1940). (Неопубл.)

321. Яковлев Л. А., Измерения шума вентиляции в Большом театре. Отчёты СДС, РДП-4—13 (1940). (Неопубл.)

1941

322. Анциферов М. С., Измерения вибраций от лифта в доме НКТ. Отчёты СДС, РДП-4—50 (1941). (Неопубл.)

323. Виталь К. А., Косое падение звука на двойную резонансную систему. ЖТФ, 11, 1029 (1941).

324. Гаско́в Р. Э., Вибрации и шум в домах над трассой метрополитена. Отчёты СДС, РДП-4—31 (1940). (Неопубл.)

325. Гольдберг Г. А., О проектировании систем звукоусиления в Малом зале. Инф. техн. Бюлл. СДС, № 5—6, М. (1941).

325а. Гольдберг Г. А., Акустическая обратная связь в сосредоточенных системах. Отчёты СДС, РДП-3—6 (1940).

3256. Гольдберг Г. А., Исследование акустических обратных связей. Отчёты СДС, РДП-4—58 (1940). (Неопубл.)
326. Гольдберг Г. А. и Тартаковский Б. Д., Проектирование звукопоглощения купола Большого зала Дворца Советов. Инф. техн. бюлл. СДС, № 5—6, М. (1941).
327. Григорьев В. С., Звукометрический полигон Строительства Дворца Советов. Инф. Техн. Бюлл. СДС, № 5—6, М. (1941).
328. Григорьев В. С., О методах усреднения отсчётов при измерении звукоизоляции по методу Мейера. Отчёты СДС, РДП-4—9, (1941). (Неопубл.)
329. Игумнов В. И., Метод расчёта воспринимаемого акустического отношения в помещениях типа корридора. Отчёты СДС, РДП-2—3 (1940). (Неопубл.)
330. Качерович А. Н., Об акустических условиях в звуковом кинотеатре. Кино-фото-химпромышленность, № 3, 18 (1941).
331. Кельберг В. П., Справочник по тепловой и звуковой изоляции. Вып. Звукоизоляция и звукопоглощение. Изд. Леноблнито холодильной промышленности, Л. (1941).
332. Крашенинников Ю. П., К вопросу применения асбестовых тканей в слоистых звукопоглощающих конструкциях. Отчёт СДС, РДП-4—6 (1940). (Неопубл.)
333. Крашенинников Ю. П., Упрощённая методика расчёта слоистых звукопоглощающих конструкций. Отчёты СДС, РДП-4—37(1940). (Неопубл.)
334. Крашенинников Ю. П., Экспериментальное исследование опытных конструкций слоистого звукопоглотителя. Отчёты СДС, РДП-4—26 (1940). (Неопубл.)
335. Лейзер И. Г., Звукоизоляция во Дворце Советов. Инф. техн. бюлл. СДС, № 5—6, М. (1941).
336. Малюжинец Г. Д., Номограмма для расчёта механических импедансов. Отчёты СДС, РДП-4—202 (1941). (Неопубл.)
337. Малюжинец Г. Д., Применение метода импеданс-годографа для графического расчёта слоистых звукопоглощающих конструкций. Отчёты СДС, РДП-456 (1941). (Неопубл.)
338. Малюжинец Г. Д., Слоистые звукопоглощающие конструкции. Инф. техн. бюлл. СДС, № 5—6, М. (1941).
339. Малюжинец Г. Д., Энергетический расчёт слоистых звукопоглощающих конструкций. Отчёты СДС, РДП-4—54 (1940). (Неопубл.)
340. Маков С. А., Требования к характеристикам направленности микрофонов для стереофонической звукопередачи. Отчёты СДС, РДТ-3—1 (1941). (Неопубл.)
341. Нестеров В. С., Поглощение звука многослойными резонансными системами. ДАН СССР, 31, 237 (1941).
342. Нестеров В. С., Экспериментальное исследование проводимости круглого отверстия поставленного конуса трубы. ДАН СССР, 31, 879 (1941).
343. Рабинович А. В., Новый метод расчёта акустического отношения. Отчёты СДС, РДП-2—2 (1940). (Неопубл.)
344. Резвякова З. Н., Быстродействующий регистратор уровней звука. Общее машиностроение, № 5, 27 (1941).
345. Ржевкин С. Н. и Тер-Осипянц С. Т., Исследование сопротивления фрикционных слоёв для звукопоглощающих систем. ЖТФ, 11, 149 (1941).
346. Розенберг Л. Д., Некоторые положения и задачи, разрешённые и разрешаемые в области акустики Дворца Советов. Инф. техн. бюлл. СДС, № 5—6, М. (1941).
347. Розенберг Л. Д. и Тартаковский Б. Д., Применение распределённых систем излучателей для целей звукофикации. ДАН СССР, 31, 883 (1941).

348. Розенберг Л. Д. и Тартаковский Б. Д., Применение распределённых систем излучателей для звукоусиления и звуковоспроизведения. Инф. техн. бюлл. СДС, № 5—6, М. (1941).
349. Рудник В. М., Измерение звукоизоляции сложной стены (с дополнительной упруго-креплённой стенкой). Отчёты СДС, РДП-4—203 (1941). (Неопубл.)
350. Рудник В. М., Измерения звукоизоляции перекрытий двух типов (с плавающим полом). Отчёты СДС, РДП-4—29 (1941). (Неопубл.)
351. Славин И. И., Амортизация вибраций машин. Отчёты Всесоюз. Научно-исслед. ин-та охраны труда ВЦСПС, Л. (1941). (Неопубл.)
352. Славин И. И., О размещении и выборе мощности громкоговорителей для озвучания производственных помещений электростанций. Отчёты Всесоюз. Научно-исслед. ин-та охраны труда ВЦСПС, Л. (1941). (Неопубл.)
353. Сурин Г. А., Измерения обходных путей звука в каркасном здании биб-ки им. Ленина. Отчёты СДС (1941). (Неопубл.)
354. Сурин Г. А., Определение динамического диапазона измерения звукоизоляции в камерах. Отчёты СДС, РДП-4—55 (1941). (Неопубл.)
355. Сухаревский Ю. М., Опыт объективного исследования акустики зала им. Чайковского в Москве. Отчёты Акустической лаб. ФИАН СССР (1941). (Неопубл.)
356. Сухаревский Ю. М. и др., Экспериментальное исследование акустики конференцзала Наркомвоенморфлота. Отчёты СДС, РДП-4—28 (1941). (Неопубл.)
357. Тартаковский Б. Д., Поле отражённых звуковых волн в Большом зале ДС при распределённых говорителях. Отчёты СДС, РДП-3—3 (1941). (Неопубл.)
358. Тартаковский Б. Д., О дифракции звука, отражённого от каркаса купола Большого зала. Отчёты СДС (1941). (Неопубл.)
359. Тартаковский Б. Д., Отражение звука от криволинейных поверхностей (исследование двукратного отражения звука от купола Б. зала). Отчёты СДС, РДТ-2—2 (1941). (Неопубл.)
360. Тартаковский Б. Д., Экспериментальное исследование систем распределённых источников звука (Лекторий СДС). Отчёты СДС, РДП-4—16 (1941). (Неопубл.)
361. Фок В. А., Теоретическое исследование проводимости круглого отверстия в перегородке, поставленной поперёк трубы. ДАН СССР, 31 875 (1941).
362. Ходаркевич В. И., Технический отчёт по теме: Акустическая штукатурка, ч. 1. Отчёты СДС, РДП-1—2 (1941). (Неопубл.)
363. Шапиро Б. К., О расчёте ячеек акустического фильтра, отдельные элементы которых не малы по сравнению с длиной волны. ЖТФ, 11, 466 (1941).
364. Яковлев Л. А., Измерения звукоизоляции плавающего пола в жилом доме. Отчёты СДС, РДП-4—41 (1941). (Неопубл.)
365. Яковлев Л. А., Измерения шума вентиляции в театре им. Станиславского. Отчёты СДС, РДП-4—4 (1941). (Неопубл.)
366. Яковлев Л. А., Измерения шума вентиляции в здании зала им. Чайковского. Отчёты СДС (1941). (Неопубл.)
367. Яковлев Л. А., Измерения передачи шума по каркасу здания СНК СССР. Отчёты СДС (1941). (Неопубл.)

1942

368. Розенберг Л. Д., Метод расчёта звуковых полей, образованных распределёнными системами излучателей. ЖТФ, 12, 102 (1942).
369. Розенберг Л. Д., Метод расчёта звуковых полей, образованных распределёнными системами излучателей, работающими в закрытых помещениях. ЖТФ, 12, 220 (1942).

## 1943

370. Розенберг Л. Д., Неравномерность поля, создаваемого бесконечной цепочкой некогерентных излучателей. ЖТФ, 12, 573 (1942).

371. Розенберг Л. Д., О характере звукового поля, получающегося при воспроизведении музыки распределённой системой излучателей. ЖТФ, 12, 211 (1942).

372. Гуревич М. И., Звукопроводимость частой решётки. Диссертация, Механический институт МГУ (1943).

373. Нестеров В. С., Резонансные звукопоглощающие системы. Диссертация, ФИАН СССР (1943).

374. Розенберг Л. Д. и Тартаковский Б. Д., Применение распределённых систем излучателей для звукосопровождения кинопоказа. ДАН СССР, 41, 5 (1943).

## 1944

375. Анцыферов М. С. и Иванов К. М., Измерения колебаний пола подгала ДС, вызываемых метро. Отчёт СДС (1944). (Неопубл.)

376. Горон И. Е., Радиовещание М., Связьиздат (1944).

377. Непомнящий Е. А., Исследование шума осевых вентиляторов. ЖТФ, 14, 108 (1944).

378. Нормы звукоизоляции жилых зданий от внутренних шумов (проект). Академия Архитектуры СССР, М. (1944).

379. Юдин Е. Я., О шуме вентиляторов. Сборник ЦАГИ «Промышленная аэродинамика», М. (1944).

## 1945

380. Андреев Н. Н., Современная акустика. Вестник Академии Наук СССР, № 1—2, стр. 46 (1945).

381. Иориш Ю. И., Измерение упругих свойств коротких стержней из виброизолирующих материалов. Моск. Орд. Ленина гос. университет им. Ломоносова. Учёные записки, вып. 77, Физика, кн. 3 стр. 240 (1945).

382. Лейзер Л. Г., Колебания машин и приборов, установленных на упругих прокладках, и изолирующий эффект таких установок. Диссертация, МЭИ (1945).

383. Малюжинец Г. Д., Звукопоглощение от слойной конструкции на низких частотах. Отчёты СДС (1945). (Неопубл.)

384. Малюжинец Г. Д., К вопросу о различных определениях понятия звукоизоляции в диффузном звуковом поле. Отчёты Акустической лаборатории ФИАН (1945). (Неопубл.)

385. Малюжинец Г. Д. и Тартаковский Б. Д., Однослойные звукопоглощающие конструкции. Отчёты СДС (1945). (Неопубл.)

386. Римский-Корсаков А. В., Обзор работ по звукоусилению по мировой литературе за период 1940—1945 гг. Отчёты СДС (1945). (Неопубл.)

387. Тартаковский Б. Д., Акустический расчёт купола Большого зала. Отчёты СДС, ЗП-11—28 (1945). (Неопубл.)

388. Тартаковский Б. Д., Влияние канеллюр на акустику Большого зала ДС. Отчёты СДС, ЗПП-46 (1945). (Неопубл.)

389. Тартаковский Б. Д., Принципы акустического проектирования основных интерьеров Дворца Советов. Отчёты СДС, ЗП-11 (1945). (Неопубл.)

390. Фурдуев В. В., Акустика звукового кинопоказа. (Пособие для киномеханика), М., Госкиноиздат (1945).

391. Юдин Е. Я., Краткое руководство по акустическому расчёту вентиляционных установок. М. Стройиздат Наркомстроя (1945).

1946

392. Гольдберг Г. А., Об асимптотическом законе затухания регенеративной реверберации. Отчёты СДС (1946). (Неопубл.)
393. Иорис Ю. И., Определение динамического модуля упругости виброизолирующих материалов. Отчёты СДС (1946). (Неопубл.)
394. Карновский М. И., Устройство для наблюдения звуковых процессов на водяных моделях. Сборник трудов Киевского ин-та киноинженеров, 1 (1946).
395. Карновский М. И. и Тверская М. Б., Численное значение некоторого интеграла. Сборник трудов Киевского ин-та киноинженеров, 1, (1946).
396. Кучер Э. Р., Метод расчёта диффракции звуковых волн от кольцевого пояса. Отчёты СДС (1946). (Неопубл.)
397. Кучер Э. Р., Определение величины диффракционного отражения от двугранного угла. Отчёты СДС (1946). (Неопубл.)
398. Малюжинец Г. Д., Расчёт широкополосных отстойных звукопоглотителей. Отчёты СДС (1946). (Неопубл.)
399. Малюжинец Г. Д. и Агеева Н. С., Влияние упругости листов на поглощение однослойных звукопоглощающих конструкций. Отчёты СДС (1946). (Неопубл.)
400. Малюжинец Г. Д., Экспериментальное исследование слоистых конструкций на потолках студий МРВД. Отчёты СДС (1946). (Неопубл.)
401. Малюжинец С. Д., Табулированные функции трёх параметров, имеющие приложение в расчётах звукопоглотителей. Отчёты СДС (1946). (Неопубл.)
402. Ржевкин С. Н., Обзор работ по резонансным звукопоглотителям. УФН, 30, 40 (1946).
403. Ржевкин С. Н., Резонансный звукопоглотитель с податливой стенкой. ЖТФ, 16, 381 (1946).
404. Римский-Корсаков А. В., Обзор работ по звукоусилению по отчётным материалам СДС. Отчёты СДС (1946). (Неопубл.)
405. Розенберг Л. Д., О расположении звукопоглощающего материала в закрытом помещении. ДАН СССР, 51, 599 (1946).
406. Тартаковский Б. Д., Акустический расчёт купола Большого зала. Отчёты СДС (1946). (Неопубл.)

1947

407. Алексеев С. П., Борьба с городским шумом. Журн. гор. хоз. Москвы, № 7 (1947).
408. Анцыферов М. С., Об устойчивости виброметра на возбуждающей поверхности. ЖТФ, 17, 1441 (1947).
409. Бреховских Л. М., О границах применимости некоторых приближённых методов, употребляемых в акустике. ДАН СССР, 18, 587 (1947).
410. Бреховских Л. М., Пределы применимости некоторых приближённых методов, употребляемых в архитектурной акустике. (По поводу статьи Морза и Болта «Звуковые волны в помещениях».) УФН, 32, 464 (1947).
411. Карновский М. И. и Лазаревич В. М., Реверберометр с непосредственным отсчётом. Отчёты Киевского ин-та киноинженеров (1947). (Неопубл.)
412. Малюжинец Г. Д., Некоторые дополнения к расчётам звукопоглотителя для Большого зала Дворца Советов. Отчёты СДС (1947). (Неопубл.)

413. Ржевкин С. Н. и Нестеров В. С., Резонансные звукопоглотители для строительной практики. Труды ВНИТО радиотехники и электросвязи им. Попова. Секция электроакустики, 4 (1947).

414. Ржевкин С. Н. и Фурдурев В. В., О развитии работ по электроакустике в СССР. Радиотехника, № 8 (1947).

415. Розенберг Л. Д., Список основной литературы по архитектурной акустике на русском языке. УФН, 32, 476 (1947).

1948

416. Алексеев С. П., Акустика помещений. Раздел «Звукоизоляция». Справочник архитектуры. Изд. Академии Архитектуры СССР (1948).

417. Алексеев С. П. (под ред. Андреева Н. Н.), Шум. Изд. АН СССР (1948).

418. Алексеев С. П., Жаринов В. Д. и Воробьев С. И., Звукоизоляция в строительстве. Госстройиздат (1948). (В печати.)

419. Качерович А. Н., Звукопоглощающий материал для синхронных павильонов. Труды НИКФИ (1948). (Неопubl.)

420. Ржевкин С. Н., Успехи советской акустики. УФН, 34, 1 (1948).

421. Фурдурев В. В., Электроакустика. Гл. XII—XVI. Гостехиздат, Москва (1948).

---

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК**КОНСТРУКЦИЯ ЛИНЕЙНЫХ УСКОРИТЕЛЕЙ***Дж. К. Слетер\**

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение. . . . .	316
I. Свойства периодически нагруженных волноводов . . . . .	320
II. Фурье разложение поля, коэффициент модуляции и поправка на время пролёта. . . . .	329
III. Групповая скорость в нагруженном волноводе . . . . .	331
IV. Затухание в волноводе . . . . .	332
V. Ввод мощности в волновод . . . . .	334
VI. Влияние геометрических факторов на ускорение. . . . .	340
VII. Входной импеданс труб со стоячими и бегущими волнами. VIII. Специальный случай колебаний типа $\pi$ . IX. Питание линейных ускорителей. X. Питание от вибратора с самовозбуждением. XI. Допуски в длинном ускорителе. XII. Динамика частиц в ускорителе. XIII. Применение динамики электронов к различным типам ускорителей. XIV. Поперечное движение и фокусировка частиц.	

## ВВЕДЕНИЕ

Линейным ускорителем называется прибор для получения электронов или положительно заряженных частиц большой энергии, в котором используется переменное поле, и частицы движутся по прямой линии (а не по криволинейной орбите в магнитном поле, как в циклотроне, бетатроне или синхротроне). Он является, по существу, некоей разновидностью нагруженного волновода, в котором создаётся переменное поле большой амплитуды, такое, что его можно представить в виде ряда бегущих волн, одна из которых распространяется со скоростью ускоряемой частицы. Частицы, имеющие подходящую начальную фазу, будут всё время двигаться в фазе с этой волной и непрерывно приобретать энергию, как если бы они находились в постоянном поле. Меняя поле по мере продвижения частицы по волноводу (в соответствии с её ускорением), можно в принципе получить частицы любой энергии.

---

\* J. C. Slater, Rev. Mod. Phys. 20, 473 (1948). Перевод В. Авербаха.

Из сказанного видны основные достоинства и недостатки линейного ускорителя. К числу первых относятся: отсутствие большого магнита, необходимого в циклических приборах, пропорциональность размеров и стоимости установки первой (а не более высокой, как в циклотроне) степени достигаемой энергии, благодаря чему линейный ускоритель может оказаться, по крайней мере при очень больших энергиях, более экономичным; наконец, тот факт, что частицы автоматически выпускаются узким пучком, в то время как в циклических ускорителях выпуск пучка составляет одно из основных затруднений. Принципиальным недостатком линейного ускорителя является то обстоятельство, что отдельная частица, вместо того чтобы двигаться в одном и том же переменном поле, питающемся от одного источника, должна пройти через ряд таких полей, использующих разные источники энергии. Это приводит к значительному усложнению высокочастотного оборудования и к трудностям, связанным с постройкой очень длинной, требующей тщательного изготовления трубы с присоединёнными к ней источниками энергии. Технически затруднительно также обеспечить согласование фаз переменных полей на всей (весьма большой) длине прибора, необходимое для того, чтобы поле менялось в такт с ускорением частицы.

Есть ещё одна конструктивная трудность, отсутствующая у циклических приборов. Она становится ясной после небольшого расчёта. В любом приборе частицы, перед тем как достигнуть большой энергии, должны пройти длинный путь по прямой линии, по кругу или по спирали. На этом пути они могут отойти от своей идеальной орбиты, оказавшись, таким образом, потерянными для пучка. Это «расширение пучка» может быть двух видов. Во-первых, расширение в буквальном смысле слова — дефокусировка. Во-вторых, во всех ускорительных устройствах, кроме бетатрона, частицы движутся группами, отстоящими друг от друга на одну длину волны, так что каждая группа находится в фазе с ускоряющей волной. Частицы могут рассеиваться «продольно», опережая свою группу или отставая от неё. В циклотроне и синхротроне частицы, движущиеся в фазе с ускоряющей волной, оказываются и в фазе, нужной для фокусировки, так что стабильность системы обеспечивается автоматически. Однако в линейном ускорителе частицы, движущиеся в фазе, необходимой для ускорения и группировки, дефокусируются. Это обстоятельство очень серьёзно для протонного ускорителя, но не существенно для электронного, так как дефокусировка уменьшается до нуля по мере достижения частицей скорости света.

Пока ещё слишком рано подробно разбирать достоинства и недостатки линейных ускорителей. Из других электронных ускорителей практичными являются: ленточный электростатический генератор вплоть до энергий порядка 20 MeV, бетатрон — в интервале от 20 до, вероятно, нескольких сот MeV и синхротрон — от

нескольких сот MeV до примерно миллиарда eV, где, как принято считать<sup>28</sup>, потери на излучение практически ставят предел дальнейшему ускорению частиц. Электростатический генератор в области своей применимости является идеальным лабораторным прибором, дающим строго монохроматические частицы в хорошо коллимированном луче; однако линейный ускоритель, питаемый электронной пушкой под сравнительно небольшим напряжением, может оказаться более дешёвым и столь же удобным для получения рентгеновских лучей и для других целей, не требующих исключительной однородности частиц по энергиям. Бетатрон и синхротрон в той области энергий, в которой они могут использоваться, дешевле, чем линейный ускоритель, но не намного. Они, возможно, дают более монохроматические пучки, однако получить в них хорошо коллимированный пучок электронов гораздо труднее, чем в линейном ускорителе. Главная область их применения — получение рентгеновских лучей. В области энергий выше миллиарда eV линейный ускоритель является, вероятно, единственным практически пригодным, если только трудности с излучением в синхротроне действительно столь велики, как кажется. Исходя из наших современных знаний, не представляется невозможным построить линейный электронный ускоритель на миллиард eV, и он будет лишь немного дороже протонного синхротрона, рассчитанного на ту же область энергий. Конечно, возможности линейных ускорителей легче будет оценить, когда вступят в действие строящиеся в настоящее время приборы этого типа, рассчитанные на энергии порядка 30 MeV.

Из ускорителей положительных ионов ленточный электростатический генератор хорош в области до 20 MeV, а обычный циклотрон встречает релятивистские трудности около 200 MeV. Синхроциклотрон идеально приспособлен для энергий порядка нескольких сот MeV. Попытки расширить область его применимости показали, однако, что при энергиях порядка 600 MeV конструкция дуанта и постройка магнита встречают некоторые трудности, которые становятся очень серьёзными при энергиях около миллиарда eV и, вероятно, непреодолимы при ещё больших энергиях. Для получения положительных ионов с энергиями в несколько миллиардов eV предлагается протонный синхротрон — прибор, в котором магнитное поле и частота одновременно модулируются так, чтобы поддерживать частицу в фазе с электрическим полем, сохраняя при этом постоянным радиус её орбиты. Для этого нужен только кольцевой магнит, цена которого не так быстро растёт с энергией, как в синхроциклотроне с его массивным сплошным магнитом. Кроме того, ускоряющие электроды могут быть сравнительно небольшими, а встречающиеся здесь частоты столь малы, что частотная модуляция осуществляется просто.

В настоящее время практически осуществима постройка протонного синхротрона на 2—10 миллиардов eV. По сравнению с такими

приборами линейные ускорители немного могут сказать в свою пользу. Мы уже говорили о трудности с дефокусировкой, которая очень существенна для линейного ускорителя положительных ионов. В настоящее время она позволяет применять протонные линейные ускорители лишь для получения сравнительно небольших энергий (примерно в циклотронной области). Кроме того, существующие сейчас линейные ускорители протонов значительно больше по своим размерам (и, следовательно, значительно дороже), чем электронные ускорители того же типа, рассчитанные на ту же область энергий. Таким образом, линейные ускорители протонов по своей стоимости вряд ли могут конкурировать с электростатическим генератором или циклотронами различных типов. Во время написания этой статьи кажется маловероятным, чтобы было предпринято сооружение протонных линейных ускорителей, рассчитанных на большие энергии. Мало вероятно также постройка новых приборов этого типа для получения сравнительно небольших энергий.

Линейный ускоритель не является новым изобретением. Слоун<sup>20,33—35</sup> и другие с умеренным успехом работали в этой области в последние десять лет перед войной. Создание во время войны мощных источников энергии высокой частоты—таких, как магнетроны—позволило питать линейный ускоритель нужным количеством энергии, работая импульсным методом. Обещая действительно большие ускорения, это обстоятельство сделало линейные ускорители заманчивым объектом дальнейшей работы. После войны исследования развивались по двум основным направлениям, близко связанным друг с другом; оба они выросли на почве работ по радарам. Во-первых, Альварец<sup>15,16,19,20,22,24,27,31</sup> в Калифорнском университете (в Беркли) работал над созданием ионного ускорителя. Он работал на частоте около 200 мегациклов, пользуясь радиооборудованием для радаров, рассчитанных на ту же частоту. Во-вторых, ряд лабораторий занимался электронными ускорителями, пользуясь мощными магнетронами с длиной волны около 10 см, построенными для целей радиолокации. Эта программа выполнялась в Исследовательской лаборатории по электронике Массачусетского технологического института<sup>16,20,30,32</sup>. Она возникла в прямом развитии идей, сложившихся в лаборатории излучения того же института в конце войны, но вся работа и детальное проектирование были проведены уже после образования исследовательской лаборатории по электронике. Аналогичная работа в США проводилась также в General Electric Company<sup>\*</sup>), в университетах в Стэнфорде<sup>10, 15</sup>, Виргинии<sup>11</sup>, Йельском<sup>25</sup> и др.<sup>1,2,3,17</sup>. За границей широкие работы велись в Англии в Telecommunications Research Establishment (TRE)<sup>14</sup>, в Политехническом институте в Мексико и в ряде других мест. Насколько известно автору этой статьи, исследования везде развивались

\* Статьи печатаются в Journ. Appl. Phys.

по одним и тем же линиям, с небольшими расхождениями в мнениях в каждый момент работы. Автор имел возможность воспользоваться предварительными отчётами лабораторий в Стэнфорде, где Хансен и его сотрудники добились значительных успехов, и TRE, где теоретическая группа во главе с Уолкиншо и экспериментальная группа сделали подробные и полные обзоры вопроса. Рассмотрение проблемы в настоящей статье и в работах указанных выше групп имеет много общих черт. Настоящая работа была проведена почти во всех отношениях независимо от других в последние два года в Массачусетском технологическом институте (МТИ), и казалось целесообразным сделать эту статью полной, даже если она и будет перекрываться с работами других групп.

Проект МТИ является как теоретическим, так и экспериментальным. Он посвящён изучению конструктивных особенностей большого ускорителя и созданию экспериментальной установки для ускорения электронов до энергий порядка 20 MeV. По завершении проекта соответствующая группа опубликует экспериментальную работу с обсуждением результатов. Пока можно отметить, что ряд результатов, изложенных в настоящей статье, уже был проверен экспериментально.

## 1. СВОЙСТВА ПЕРИОДИЧЕСКИ НАГРУЖЕННЫХ ВОЛНОВОДОВ

Фазовая скорость волны в волноводе больше скорости света в вакууме. Частица не может двигаться с такой скоростью, поэтому для создания поля в линейном ускорителе нужны более сложные системы. Все применяемые на практике системы состоят из периодически нагруженных волноводов различных типов. Мы и рассмотрим в этом разделе свойства таких волноводов, подчёркивая не столько индивидуальные особенности различных структур, сколько их общие черты, которыми обладают все такие системы без исключения. Значительная часть результатов уже известна в математической физике из многих задач о распространении волн в периодических структурах — таких, как теория нагруженной струны, электрических фильтров, теория электронов в металле и кристаллических твёрдых телах, диффракция электронов и рентгеновских лучей. Взаимоотношения этих проблем разобраны в книге Л. Бриллюэна «Распространение волн в периодических структурах» (1946 г.). Во время войны аналогичные методы были применены автором для исследования резонансных колебаний в многополостном магнетроне (это кратко затронуто в работе<sup>21</sup>). Поскольку эти общие методы хорошо известны, мы изложим многие результаты в общих чертах, без доказательства или подробного обсуждения. Наиболее часто употребляемые структуры схематически показаны на рис. 1 (*a* — волновод с диафрагмами, используемый в большинстве коротковолновых электронных ускорителей, в том числе в приборе МТИ; *b* — система, применённая в ионном уско-

рителе Альвареца). Обращаясь к конкретному примеру, мы обычно будем иметь в виду случай (а), но большинство наших замечаний применимо и к системе Альвареца.

Изучение распространения волн в периодических структурах основывается на так называемой теореме Флокэ. Формулировка её

весьма проста: волновая функция (в электромагнитном случае — значения электрического и магнитного полей), соответствующая данному типу колебаний и данной частоте, при продвижении вдоль структуры на один период умножается на данную комплексную константу. Доказательство этой теоремы несложно и вытекает из того факта, что система, сдвинутая вдоль своей оси (выбранной за ось  $z$ ) на один период  $L$ , совпадает с первоначальной. Следовательно, новая волновая функция может отличаться от старой лишь постоянным множителем, который мы напишем в виде  $e^{-\gamma L}$ , где  $\gamma$  — константа (вообще говоря, комплексная). Существует весьма простая функция, умножающаяся на  $e^{-\gamma L}$ , когда  $z$  возрастает на  $L$ . Это — показательная функция  $e^{-\gamma z}$ . Можно показать, что наиболее общей функцией, обладающей таким свойством, является произведение  $e^{-\gamma z}$  на произвольную периодическую функцию  $z$  с периодом  $L$  (не меняющуюся при изменении  $z$  на  $L$ ). Последнюю можно представить в виде ряда Фурье (написанного в комплексной форме), т. е. как сумму экспонент  $e^{-2\pi n i z/L}$  ( $n$  — положительное или отрицательное целое число) с подходящими коэффициентами. Таким образом, волновая функция системы может быть написана в виде суммы показательных функций  $e^{-(\gamma z + 2\pi n i z/L)}$  с подходящими коэффициентами. Истолкование этого результата зависит от характера  $\gamma$ . Вообще говоря, эта константа комплексная, но можно доказать, что в системе без диссипации энергии она должна быть либо действительной, либо чисто мнимой. В случае действительного  $\gamma$  каждый член ряда уменьшается с увеличением  $z$ , и мы имеем затухающую волну. Такие волны нельзя применить для ускорения частиц. В случае чисто мнимого  $\gamma$  мы можем написать:  $\gamma = i\beta_0$ . Введя обозначение:

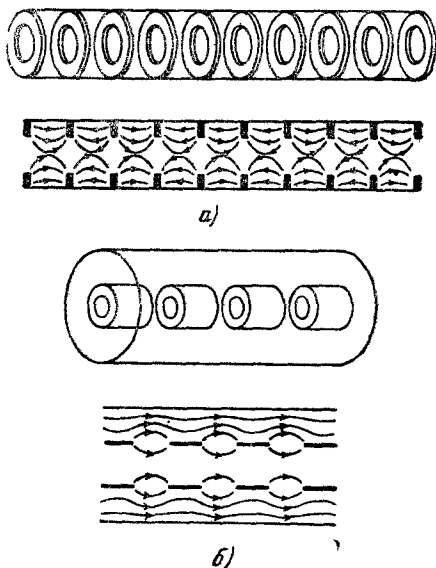


Рис. 1.

является произведение  $e^{-\gamma z}$  на произвольную периодическую функцию  $z$  с периодом  $L$  (не меняющуюся при изменении  $z$  на  $L$ ). Последнюю можно представить в виде ряда Фурье (написанного в комплексной форме), т. е. как сумму экспонент  $e^{-2\pi n i z/L}$  ( $n$  — положительное или отрицательное целое число) с подходящими коэффициентами. Таким образом, волновая функция системы может быть написана в виде суммы показательных функций  $e^{-(\gamma z + 2\pi n i z/L)}$  с подходящими коэффициентами. Истолкование этого результата зависит от характера  $\gamma$ . Вообще говоря, эта константа комплексная, но можно доказать, что в системе без диссипации энергии она должна быть либо действительной, либо чисто мнимой. В случае действительного  $\gamma$  каждый член ряда уменьшается с увеличением  $z$ , и мы имеем затухающую волну. Такие волны нельзя применить для ускорения частиц. В случае чисто мнимого  $\gamma$  мы можем написать:  $\gamma = i\beta_0$ . Введя обозначение:

$$\beta_n = \beta_0 + 2\pi \frac{n}{L}; \tag{1}$$

можно записать наши экспоненты в виде  $e^{-i\beta_n z}$ . Умножая это на  $e^{i\omega t}$ , чем выражается синусоидальная зависимость поля от времени, получим отдельную компоненту Фурье в виде  $e^{i(\omega t - \beta_n z)}$ . Эта функция представляет собой бегущую волну с угловой частотой  $\omega$  и длиной волны  $\frac{2\pi}{\beta_n}$ , распространяющуюся вдоль оси  $z$  со скоростью  $v_n = \frac{\omega}{\beta_n}$ . Теперь из уравнения (1) видно, что возмущение, вызван-

ное периодической нагрузкой, можно рассматривать как наложение множества бегущих волн с различными скоростями  $v_n$ , уменьшающимися (по абсолютной величине) при больших значениях  $n$ . Каждая волна входит со своим коэффициентом (амплитудой).

Некоторые из этих бегущих волн можно использовать в линейном ускорителе. Именно: скорости многих компонент Фурье оказываются меньше скорости света. Следовательно, одна из них может равняться скорости ускоряемой частицы. Такая компонента будет резонировать с частицей в том смысле, что соотношение фаз волны и частицы будет оставаться постоянным (до тех пор, конечно, пока частица не ускорится достаточно для того, чтобы обогнать волну; подобные вопросы будут рассмотрены позднее).

Частица, резонирующая с одной компонентой Фурье-разложения поля, не будет резонировать с остальными компонентами, так как они распространяются с другими скоростями. В самом деле, в системе координат, связанной с движущейся частицей, резонирующая компонента представляется постоянным полем: производимый ею эффект не меняется на протяжении многих периодов. Другие же компоненты, движущиеся относительно частицы с большой скоростью, представляются быстро осциллирующими во времени полями, которые не оказывают в среднем почти никакого влияния на движение частицы. Почти для всех целей ими можно полностью пренебречь. Таким образом, мы приходим к весьма существенному результату: только одна Фурье-компонента поля, созданного периодической структурой, распространяется с той же скоростью, что и частица; эта компонента действует, как бегущая синусоидальная волна; только её и нужно учитывать, рассматривая движение частицы. Однако все компоненты Фурье имеют конечную амплитуду и, следовательно, несут энергию, которую и растрчивают, если стенки волновода обладают конечной проводимостью. Эти потери энергии совершенно бесполезны с точки зрения ускорения частиц. Следовательно, надо найти такой способ возбуждения волновода, при котором амплитуда резонирующей компоненты оказывается много больше всех остальных.

Чтобы определить скорость каждой компоненты в функции частоты ( $\omega$ ) и отсюда найти резонансную частоту, нужно знать зависимость  $\beta_0$  и, следовательно,  $\beta_n$  от частоты. Это — нелёгкая задача, которую мы обсудим позднее. Однако можно легко получить некоторые общие результаты. Рассмотрим  $\omega$  как функцию  $\beta_0$ . Легко показать, что

она периодична относительно  $\beta_0$  с периодом  $\frac{2\pi}{L}$ . В самом деле, пусть  $\beta_0$  возрастает на  $\frac{2\pi}{L}$ . Тогда, согласно уравнению (1), величина, обозначавшаяся ранее через  $\beta_{-1}$ , также возрастёт и станет равной прежнему значению  $\beta_0$ . Аналогично, все  $\beta_n$  окажутся равными прежнему  $\beta_{n+1}$ . Таким образом, изменится номер каждой отдельной величины  $\beta_n$ , но весь набор их останется неизменным. Физически это ничего не меняет, так как коэффициенты Фурье зависят только от численного значения  $\beta_n$ , и частота не может измениться. Также легко показать, что  $\omega$  является чётной функцией  $\beta_0$ , т. е. она не меняется при изменении знака  $\beta_0$ . Это вытекает из того, что физическая картина не меняется при следующих двух преобразованиях:

а) переходе от данной волновой функции к комплексно-сопряжённой, когда  $e^{i(\omega t - \beta_n z)}$  заменяется на  $e^{-i(\omega t - \beta_n z)}$ , б) перемене знака времени, после чего мы получаем  $e^{i(\omega t + \beta_n z)}$ . Окончательный результат сводится к изменению знака у всех  $\beta_n$  без изменения свойств системы (в частности, частоты).

Вследствие этих двух теорем  $\omega$  как функция  $\beta_0$  имеет вид, изображённый на рис. 2. На графике удобно откладывать не  $\omega$  и

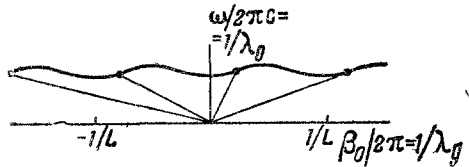


Рис. 2. Частота как функция обратной длины волны в волновде для периодически нагруженной линии. Наклоны радиусов-векторов представляют фазовую скорость различных компонент Фурье, делённую на скорость света.

$\beta_0$ , а  $\frac{\omega}{2\pi c} = \frac{1}{\lambda_0}$  и  $\frac{\beta_0}{2\pi} = \frac{1}{\lambda_g}$ , где  $c$  — скорость света в вакууме,  $\lambda_0$  — длина волны в вакууме,  $\lambda_g$  — длина волны в волновде, соответствующая  $n = 0$ . Мы видим, что последняя величина не определяется однозначно: к  $\frac{1}{\lambda_g}$  всегда можно добавить целое кратное  $\frac{1}{L}$  без изменения  $\omega$ . Иначе говоря,  $\frac{1}{\lambda_0}$  есть периодическая функция  $\frac{1}{\lambda_g}$  с периодом  $\frac{1}{L}$ . Видно также, что  $v_0$ , фазовая скорость компоненты Фурье с  $n = 0$ , делённая на скорость света в вакууме  $c$ , даёт формулу:

$$\frac{v_0}{c} = \frac{\omega}{\beta_0 c} = \frac{\lambda_g}{\lambda_0},$$

т. е. она равна тангенсу угла наклона радиуса-вектора, проведённого в данную точку кривой. Если этот угол больше  $45^\circ$ , то  $v_0$  больше  $c$ , в противном случае — меньше  $c$ .

Нанося на графике значения  $\frac{1}{\lambda_g}$ , отделённые друг от друга интервалом  $\frac{1}{L}$ , и проводя соответствующие радиусы-векторы (см.

рис. 2), мы найдём фазовые скорости всех компонент Фурье, связанных с данной волновой функцией. Из рисунка ясно видно, что фазовая скорость уменьшается с увеличением номера  $n$ . Ясно также, что имеются компоненты Фурье как с положительными, так и с отрицательными скоростями, т. е. волны, распространяющиеся как вправо, так и влево.

Рассмотрим теперь качественно на отдельном примере, как получаются кривые типа изображённых на рис. 2.

В качестве примера возьмём изображённую на рис. 1,а трубу с ирисовыми диафрагмами.

Поставим себе задачей выяснить, как меняются кривые при изменении размеров отверстий в диафрагмах, при неизменном расстоянии между последними, от одного предельного случая — полного отсутствия диафрагм, до другого — исчезающе малых отверстий, когда волновод состоит из ряда цилиндрических полостей, разделённых проводящими стенками\*).

Мы рассмотрим только волны поперечного магнитного типа, в которых магнитные силовые линии направлены по кругам около оси цилиндрического волновода, а электрическое поле находится в плоскости, проходящей через ось, и не зависит от угла поворота этой плоскости вокруг оси. Именно этот тип обычно встречается в цилиндрических полостях, где электрическое поле направлено вдоль оси  $z$  от одной стенки к другой и пропорционально  $J_0(kr)$  ( $k = \frac{2\pi}{\lambda_0}$ ), а магнитное поле пропорционально  $J_1(kr)$ . Собственная частота определяется из условия, чтобы  $E_z$  равнялось нулю на внешней стенке полости, т. е. при  $r = R$ , где  $R$  — радиус цилиндра. Мы имеем, таким образом,  $J_0\left(2\pi\frac{R}{\lambda_0}\right) = 0$ . Как известно, первый нуль  $J_0(x)$  равен 2,405, т. е. резонанс наступает при  $2\pi\frac{R}{\lambda_0} = 2,405$ . Рассмотрим теперь последовательность случаев, относящихся к этому типу колебаний полости, меняя радиусы отверстий в диафрагмах, но оставляя неизменными расстояния между последними.

Начнём со случая полного отсутствия диафрагм (радиус отверстия  $a$  равен радиусу цилиндра  $R$ ). Мы имеем здесь обычный ненагруженный волновод, длина волны в котором  $\lambda_g$  связана с длиной волны в вакууме  $\lambda_0$  хорошо известным соотношением:

$$\frac{1}{\lambda_0^2} = \frac{1}{\lambda_g^2} + \frac{1}{\lambda_c^2}, \quad (2)$$

где  $\lambda_c$  — критическая длина волны. Эта последняя определяется как такая длина волны в свободном пространстве, при которой  $\lambda_g$  стано-

\* Эта проблема подробно исследована автором аналитическими и численными методами, приводящими к количественно правильным результатам. См. <sup>30</sup>.

вится бесконечной, т. е. поле в волноводе перестает зависеть от  $z$ . При этом задача становится точно такой же, как в уже рассмотренном случае цилиндрической полости, так что критическая длина волны совпадает с найденным там значением  $\lambda_0$ , т. е.

$$2\pi \frac{R}{\lambda_c} = 2,405. \quad (3)$$

Мы видим, что уравнение (2) даёт гиперболическую связь между  $\frac{1}{\lambda_0}$  и  $\frac{1}{\lambda_g}$ , как это изображено на рис. 3. Когда  $\frac{1}{\lambda_0}$

меньше  $\frac{1}{\lambda_c}$  (т. е. когда длина волны в свободном пространстве больше критического значения), кривая не имеет действительных точек. Это означает,

что распространение таких волн невозможно; мы имеем чисто мнимую длину волны, описывающую затухание. Для всех более высоких частот гипербола лежит выше биссектрисы координатного угла, указывая, что фазовая скорость здесь больше скорости света; она асимптотически стремится к последней при больших частотах. В этом случае, естественно, в волноводе нет никакой периодичности. Следовательно, нет и периодичности на графике рис. 3.

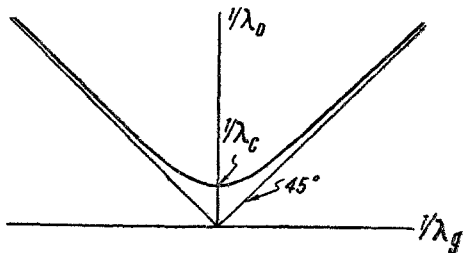


Рис. 3. Гипербола, представляющая  $\frac{1}{\lambda_0}$  как функцию  $\frac{1}{\lambda_g}$  в ненагруженном волноводе.

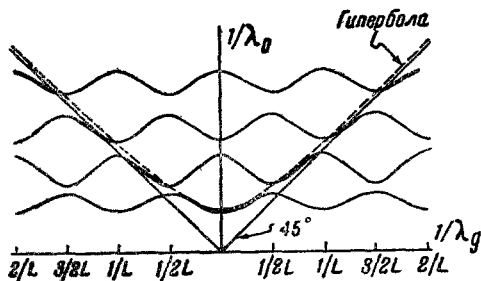


Рис. 4.  $\frac{1}{\lambda_0}$  в функции  $\frac{1}{\lambda_g}$  для периодически нагруженного волновода (при небольшой нагрузке). Жирная часть кривой соответствует рис. 3.

Изменение частоты, ничтожное в большей части области изменения  $\beta_0$ , становится существенным вблизи  $\frac{\beta_0}{2\pi} = \frac{1}{2L}$ . Смысл этой величины весьма прост: она соответствует  $L = \frac{\lambda_g}{2}$ , т. е. тому случаю, когда расстояние между диафрагмами равно половине длины волны в волноводе. Посмотрим, как распространяется волна такой длины.

Можно считать, что каждая диафрагма вызывает рассеяние волн, в результате которого они делятся на прошедшую и отражённую части; последняя распространяется в обратном направлении. При  $L = \frac{\lambda g}{2}$  отражённая от данной диафрагмы волна будет на  $2\pi$  сдвинута по фазе относительно волны, отражённой от предыдущей диафрагмы; то же самое произойдёт и с прошедшими волнами. Таким образом, все отражённые волны смогут интерферировать, производя заметный эффект. В действительности, они интерферируют столь сильно, что волна вообще не может распространяться в бесконечно длинном волноводе такого типа, если нет потерь: расчёт показывает, что амплитуды отражённой и падающей волн равны друг другу, и образуется стоячая волна. Это — то же самое явление, которое известно в теории дифракции рентгеновских лучей под именем брэгговского отражения.

Положение станет яснее, если рассмотреть амплитуды различных компонент Фурье-разложения поля в нашей задаче. Допустим, что  $\beta_0/2\pi$  равно значению  $\beta_n/2\pi$ , ближайшему к обратной длине волны, которая распространялась бы при данной частоте в ненагруженном волноводе. Тогда для большинства частот (или  $\beta_n$ ) будет заметно отлична от нуля только одна компонента Фурье, связанная с  $\beta_0$ . В самом деле, оказывается, что для положительных  $\beta$  отражённая волна характеризуется  $n = -1$ ; многократно отражённым волнам соответствуют другие значения  $n$ . Отражённые волны, если только не выполняется упомянутое выше брэгговское условие, будут весьма слабы, так как волны, отражённые от различных диафрагм, не смогут усилить друг друга в результате интерференции. Поэтому компонента Фурье, связанная с  $n = -1$ , будет мала, а все другие — ещё меньше. Однако по мере приближения к критическому значению  $\frac{\beta_0}{2\pi} = \frac{1}{2L}$ , коэффициент Фурье, соответствующий  $n = -1$ , возрастает и по достижении критического значения становится равным амплитуде компоненты с  $n = 0$ . По прохождении критического значения все коэффициенты Фурье, кроме соответствующего  $n = 0$ , опять уменьшаются. При  $\frac{\beta_0}{2\pi} = \frac{1}{L}$ , когда диафрагмы отстоят друг от друга на одну длину волны, опять выполняются условия интерференции и появляется отражённая волна, на сей раз соответствующая  $n = -2$  и т. д.

Рассмотрим теперь периодическую структуру кривых рис. 4. Жирная часть кривой изображает описанную выше зависимость частоты от  $\beta_0$ . Она отклоняется от гиперболы, характеризующей ненагруженный волновод, только вблизи критических точек —  $\frac{\beta_0}{2\pi} = \frac{m}{2L}$ , где  $m$  — целое число. В этих точках кривая имеет разрыв; одной и той же длине волны в волноводе соответствуют две

допустимые частоты. Можно показать, что они связаны с двумя различными типами колебаний. Оба эти типа представляют собой стоячие волны (так как падающая волна в этих условиях полностью отражается); одна из них — синусоидальная, другая — косинусоидальная. Следовательно, диафрагмы попадают в пучности одной из этих волн и в узлы другой; неудивительно поэтому, что они по-разному влияют на частоты этих двух типов колебаний. Волны, частота которых попадает внутрь разрывов, не могут распространяться; значение  $\beta_0$  для них становится мнимым, т. е. мы получаем затухающую волну. Другими словами, весь интервал частот разбивается на ряд полос пропускания, в которых возможно распространение волн, отделённых друг от друга зонами затухания. Периодически нагруженный волновод, таким образом, подобен фильтру, обладающему бесконечным числом полос пропускания. При нагрузке, стремящейся к нулю, мы получаем случай (рис. 3), когда зоны сливаются, и возможно распространение волн со всеми частотами, превышающими критическую.

В силу уже упоминавшейся периодичности частоты как функции  $\beta_0$ , кривые рис. 4 являются периодическими. Жирно начерченные части их в предельном случае исчезающей нагрузки сводятся, как мы видели, к гиперболе рис. 3, но и другие ветви кривых имеют такое же право на существование. Они соответствуют различным условиям нумерации чисел  $\beta$ . До сих пор наибольший коэффициент Фурье соответствовал  $n = 0$ . Другие ветви кривых отвечают системам нумерации, в которых коэффициент Фурье для  $n = 0$  мал, но зато велика какая-нибудь другая компонента. В рассматривавшейся сейчас задаче первоначально избранная нами система нумерации является самой естественной. Однако с увеличением диафрагм это уже не так ясно, так как целый ряд коэффициентов Фурье заметно отличен от нуля, и другие системы нумерации могут оказаться столь же разумными, как и наша.

Из рис. 4 видно, что теперь, в отличие от случая рис. 3, могут распространяться волны, фазовая скорость которых меньше скорости света. Кривые имеют вид, уже рассмотренный на рис. 2, и мы знаем, что любой частоте из полосы пропускания соответствует бесконечное число скоростей, каждая из которых определяется точкой пересечения кривой  $\omega(\beta)$  с прямой  $\omega = \text{const}$ . Однако каждая из этих скоростей принадлежит определённой компоненте Фурье, а единственная заметно отличная от нуля компонента изображается на рис. 4 жирной линией, которая в большей своей части лежит всё же выше биссектрисы координатного угла и, следовательно, соответствует фазовой скорости, большей  $c$ . Другими словами, хотя диафрагмы и приводят к появлению в Фурье-разложении поля компонент с небольшими фазовыми скоростями, амплитуды этих компонент для малых диафрагм малы и, следовательно, не могут быть эффективно использованы для ускорения частиц.

Дело, однако, меняется при дальнейшим увеличении диафрагм, т. е. при уменьшении отношения  $\frac{a}{R}$  ( $a$  — радиус отверстия). В этом случае кривые более похожи на представленные на рис. 2. Они могут опуститься так, что фазовая скорость наибольшей компоненты Фурье делается меньше  $c$ . Кроме того, в результате сильного рассеяния волн на диафрагмах, амплитуды других компонент (в частности, отвечающих малым скоростям) могут заметно возрасти. Конечно, эти эффекты связаны друг с другом, и хотя теперь уже компоненты Фурье с малыми скоростями, пригодные для использования в ускорителе, обладают достаточно большими амплитудами, возникает новое затруднение: другие компоненты также имеют заметные амплитуды и также несут заметную долю энергии, что бесполезно с точки зрения работы ускорителя. Пусть, например, волновод нагружен так, что фазовая скорость волн так называемого  $\pi$ -типа меньше  $c$ , и пусть мы используем их для ускорения (волнами типа  $\pi$  именуются такие, у которых разность фаз, соответствующая расстоянию от одной секции до другой,  $\beta_0 L$ , равна  $\pi$ ; это означает, что  $\frac{\beta_0}{2\pi} = \frac{1}{2L}$  — брэгговскому критическому значению). Но мы уже видели, что при этом возникает отражённая волна той же амплитуды, что и падающая. Она бесполезна для нашей цели, и вся энергия, заключённая в отражённой волне, теряется. Или, допустим, мы пользуемся волной типа  $\frac{\pi}{2}$ , в которой  $\beta_0 L = \frac{\pi}{2}$ ;  $\frac{\beta_0}{2\pi} = \frac{1}{4L}$ . Как видно из рисунка, в этом случае надо ещё сильнее нагрузить волновод, чтобы фазовая скорость оказалась меньше  $c$ . Тогда станут заметными и амплитуды других волн, распространяющихся в ту же сторону, и значительная доля энергии уйдёт в них. Как бы то ни было, мы всегда должны «платить штраф» за уменьшение скорости волны, и этот штраф тем больше, чем больше достигнутое уменьшение.

В пределе отверстия в диафрагмах полностью исчезают. Волновод превращается тогда в набор изолированных цилиндрических полостей, каждая из которых колеблется независимо от других. Для возбуждения колебаний, соответствующих различным значениям  $\beta_0$ , мы должны только установить между соседними полостями разность фаз, равную  $\beta_0 L$ . Частота в пределе не зависит от  $\beta_0$ , так что кривые  $\omega = \omega(\beta)$  вырождаются в прямые, параллельные оси абсцисс, а полюсы пропускания сжимаются в линии.

Разрешённые частоты — ординаты этих линий — легко найти: это как раз собственные частоты цилиндрической полости. Наименьшая из них даётся уравнением (3) и соответствует первой полосе пропускания, более высокие описывают случаи синусоидального распространения возмущения вдоль полости, причём тангенциальная составляющая обращается в нуль на обеих плоских стенках; таким образом, длина  $L$  равна целому числу полуволн. В этом предельном слу-

чае легко найти Фурье-разложение поля и, следовательно, величину отдельных компонент Фурье; полученные предельные значения приближённо справедливы и для диафрагм с очень маленькими отверстиями ( $a \ll R$ ). Так, например, в нижней полосе пропускания величина  $z$ -компоненты поля в каждой полости примерно постоянна и равна  $e^{-i\varphi_p L}$ , где  $p$  — номер полости. Для определения компонент Фурье нужно только разложить описанным выше способом эту простую ступенчатую функцию.

## II. ФУРЬЕ-РАЗЛОЖЕНИЕ ПОЛЯ, КОЭФФИЦИЕНТ МОДУЛЯЦИИ И ПОПРАВКА НА ВРЕМЯ ПРОЛЁТА

В предыдущем разделе мы указали, что, рассматривая нагруженный волновод как линейный ускоритель, достаточно учесть только резонирующую с частицей Фурье-компоненту поля (т. е. компоненту, фазовая скорость которой равна скорости частицы). Тогда соотношение фаз поля и частицы не меняется, частица находится под действием постоянной силы, и динамическая задача весьма проста. С другой стороны, ряд авторов пользуется другим методом, известным из обычной теории триодов и клистронов, а именно, рассматривает влияние конечного времени пролёта частицы от одной до другой стороны полости.

Пусть, например, отверстия в диафрагмах малы. Тогда две диафрагмы подобны двум сеткам триода или клистрона, и поле между ними примерно однородно (не зависит от  $z$ ), но, конечно, синусоидально меняется со временем. При движении частицы от одной диафрагмы к другой поле (меняющееся со временем) не может постоянно сохранять своё максимальное значение. Вычисляя среднюю силу, действующую на частицу, мы находим, что она равна своему максимальному значению, умноженному на некий коэффициент, именуемый в теории клистрона коэффициентом модуляции. Последний равен единице, если сетки столь близки друг к другу, что время пролёта можно считать равным нулю, и уменьшается с увеличением времени пролёта. Функциональная зависимость коэффициента модуляции от времени пролёта ( $x$ ) имеет вид  $\frac{\sin x}{x}$ . Для некоторых значений  $x$  эта функция обращается в нуль или становится отрицательной; с такими эффектами приходится иметь дело в теории высокочастотных триодов, где время пролёта играет важную роль.

Мы покажем теперь, что этот коэффициент модуляции, или влияние пролётного времени, не является для нас чем-то новым, что подлежит отдельному рассмотрению, а весьма элегантно получается из нашего способа использования только одной компоненты Фурье. Пусть частица движется со скоростью  $v$  вдоль оси  $z$ ; её координата

есть  $z = vt$ . Пусть продольная компонента электрического поля  $E_z$  даётся формулой

$$E_z = \sum_n F_n e^{i\omega(t - z/v_n)},$$

где  $F_n$  — амплитуда и  $v_n$  — скорость  $n$ -й компоненты Фурье. По мере движения частицы поле меняется, что мы можем учесть, подставляя для  $t$  значение  $t = \frac{z}{v}$ , соответствующее моменту, в который частица окажется в точке  $z$ . Таким образом, поле, действующее на частицу в точке  $z$ , есть

$$\sum_n F_n e^{i\omega \left( \frac{1}{v} - \frac{1}{v_n} \right) z}.$$

Среднее (по  $z$ ) значение  $n$ -го члена (мы считаем, что частица проходит большое расстояние) равно нулю, если  $v$  отлично от  $v_n$ , так как среднее значение гармонической функции равно нулю. Таким образом, среднее действующее поле равно нулю, если только скорость частицы не совпадает со скоростью одной из компонент Фурье; в этом последнем случае среднее поле равно  $F_n$  — соответствующей амплитуде.

Надо отметить, что полученный результат верен только, если частица проходит в поле большое расстояние с постоянной скоростью. В линейном ускорителе это условие приближённо (но не точно) выполняется; отклонения от него не могут существенно изменить наших рассуждений.

Мы видим, таким образом, что наш метод разложения в ряд Фурье автоматически учитывает конечное время полёта частицы от одной полости (или диафрагмы) до другой. Заметим, что этот результат является весьма общим. Он не зависит от использования специальной модели волновода с диафрагмами, а применим ко всем периодическим структурам. Любое изменение структуры, приводящее к возрастанию амплитуды резонирующей с частицей компоненты Фурье, можно иначе описать, как увеличение коэффициента модуляции. Однако наш метод является гораздо более общим, чем обычные рассуждения в терминах пролётного времени, так как последние часто проводятся только для случая постоянного поля между параллельными сетками или электродами, в то время как наш метод годится для любого закона изменения продольного поля с  $z$ -координатой. Пользуясь вместо ряда интегралом Фурье, можно применить наш метод и к непериодическим структурам, к системам типа триода или клистрона. Таким способом можно доказать известные теоремы о коэффициенте модуляции и пролётном времени, а также, как будет видно из дальнейшего, о поперечном движении частиц и о фокусировке. Мы, однако, не будем этим пользоваться.

### III. ГРУППОВАЯ СКОРОСТЬ В НАГРУЖЕННОМ ВОЛНОВОДЕ

В первом разделе мы показали, что фазовая скорость волны в нагруженном волноводе даётся наклоном радиуса-вектора, проведённого в точку, представляющую эту волну на графике  $\frac{1}{\lambda_0}$  в функции  $\frac{1}{\lambda_g}$ . Рассмотрим теперь групповую скорость (которую мы обозначим через  $v_g$ ) и покажем, что она определяется наклоном не радиуса-вектора, а касательной к кривой в данной точке:

$$\frac{v_g}{c} = \frac{d\left(\frac{1}{\lambda_0}\right)}{d\left(\frac{1}{\lambda_g}\right)}. \quad (4)$$

Мы увидим, что понятие групповой скорости играет важную роль при изучении движения энергии в волноводе, а также в вопросе о том, как велика должна быть диссипация энергии для установления поля заданной напряжённости.

Для вывода формулы групповой скорости обычно берут суперпозицию двух волн с частотами  $\omega$  и  $\omega + \Delta\omega$  и константами распространения  $\beta$  и  $\beta + \Delta\beta$  и вычисляют скорость биений. Легко показать (см., например, Slater and Frank, Mechanics, 1947 г., стр. 168), что она даётся выражением  $\frac{\Delta\omega}{\Delta\beta}$ . Эта величина близко связана с наклоном кривых типа представленных на рис. 2. Две волны изображаются там двумя точками. Вспоминая, что по оси абсцисс на рис. 2 отложено  $\frac{1}{\lambda_g} = \frac{\beta}{2\pi}$ , а по оси ординат  $\frac{1}{\lambda_0} = \frac{\omega}{2\pi c}$ , мы имеем:

$$\frac{\text{скорость биений}}{c} = \frac{\Delta\left(\frac{1}{\lambda_0}\right)}{\Delta\left(\frac{1}{\lambda_g}\right)}. \quad (5)$$

Для достаточно близких частот и констант распространения правую часть уравнения (5), представляющую наклон хорды, можно заменить наклоном касательной к кривой, получая тем самым общую для всех волн с соседними частотами скорость распространения биений. Это и есть групповая скорость, определяемая по уравнению (4).

Составим теперь путём суперпозиции ряда плоских волн различных частот группу волн, например, волновой пакет конечных размеров. Чем больше эти размеры, т. е. чем больше протяжённость волнового пакета в пространстве и времени, тем уже необходимый интервал частот (или длин волн). Если зависимость  $\frac{1}{\lambda_0}$  от  $\frac{1}{\lambda_g}$  можно считать линейной в этом интервале частот, то скорость биений,

определённая по формуле (5), окажется одинаковой для всех пар волн в пакете, и все они будут распространяться с одной и той же групповой скоростью. Если, с другой стороны, размеры пакета невелики, то его Фурье-разложение охватывает широкий интервал длин волн, скорости биений различных пар частот различны, пакет будет расплываться, и возмущение распространяется довольно сложным путём.

Групповая скорость есть скорость распространения энергии в волноводе. Это легче всего усмотреть, рассматривая волновой пакет определённой длины, движущийся, например, направо. Ясно, что в одну секунду через единичное поперечное сечение волновода проходит как раз энергия, заключённая в объёме  $1 \cdot v_g$ . Таким образом, мы получаем связь между вектором Пойнтинга, проинтегрированным по поперечному сечению волновода (т. е. потоком энергии), и плотностью энергии на единицу длины: поток энергии равен  $v_g$ , умноженной на плотность энергии. Из рис. 2 и 4 видно, что наклон кривых, изображающих  $\frac{1}{\lambda_0}$  в функции  $\frac{1}{\lambda_g}$ , всегда меньше единицы, так что групповая скорость всегда меньше скорости света, как и следовало ожидать из релятивистских соображений. Далее, мы видим, что по мере приближения колебаний к  $\pi$ -типу касательная становится горизонтальной, и групповая скорость стремится к нулю. Это согласуется с тем, что уже говорилось об этом типе колебаний. Выше мы видели, что по мере приближения к  $\pi$ -типу отражённая волна усиливается, пока в пределе не образуется стоячая волна, в которой амплитуды падающей и отражённой волн одинаковы. В этом случае результирующий поток энергии отсутствует, и  $v_g$  равно нулю. Вблизи  $\pi$ -типа амплитуды отражённой и падающей волн почти одинаковы, поток энергии мал и, следовательно, групповая скорость также весьма мала. Мы видим, далее, что когда отверстия в диафрагмах невелики, полосы частот сжимаются, и даже при колебаниях типа  $\frac{\pi}{2}$ , когда групповая скорость достигает своего максимального значения, она всё же весьма мала. В пределе, когда радиус отверстий уменьшается до нуля, и частоты перестают зависеть от длины волны в волноводе, групповая скорость также стремится к нулю. Это, очевидно, находится в согласии с тем фактом, что при исчезающе малых отверстиях энергия не может течь через волновод.

#### IV. ЗАТУХАНИЕ В ВОЛНОВОДЕ

До сих пор мы пренебрегали затуханием в волноводе, но оно играет существенную роль в работе линейного ускорителя, и мы должны теперь рассмотреть этот эффект. Пусть нам известна плотность энергии в небольшом участке нагруженного волновода. В результате омических потерь в стенках энергия будет втекать

в них. Мы можем связать эту потерю энергии с добротностью ненагруженного волновода  $Q_0$ . Последняя величина определяется формулой:

$$\frac{1}{Q_0} = \frac{\text{энергия, диссипируемая в стенках в 1 сек.}}{\omega \cdot \text{запасенная энергия}}. \quad (6)$$

Это — та добротность  $Q$ , которой обладал бы волновод, если бы он с помощью идеально отражающих пластинок на концах превратился в резонансную полость (диссипация энергии на концах при этом отсутствовала бы). Поскольку как запасенная в волноводе энергия, так и энергия, диссипируемая в единицу времени в стенках, пропорциональны длине рассматриваемого участка,  $Q_0$  не зависит от его длины.

В результате потерь в стенках энергия распространяющейся в волноводе волны будет постепенно уменьшаться. Легко найти величину происходящего отсюда затухания волны. Напишем для этого уравнение непрерывности для потока энергии. Обозначим через  $W$  энергию на единицу длины волновода,  $S$  — поток энергии через данное поперечное сечение,  $D$  — диссипацию мощности на единицу длины стенки. Уравнение непрерывности гласит, что скорость прироста  $W$  со временем равна минус дивергенции  $S$ , минус  $D$ . Поскольку  $S$  зависит только от  $z$ -расстояния по оси волновода, мы имеем:

$$\frac{\partial W}{\partial t} + \frac{\partial S}{\partial z} + D = 0. \quad (7)$$

Из уравнения (6) видно, однако, что  $D = \omega \frac{W}{Q_0}$ , а из предыдущего раздела известно, что  $S = v_g W$ . Таким образом, уравнение (7) принимает вид:

$$\frac{\partial W}{\partial t} + v_g \frac{\partial W}{\partial z} + \frac{\omega}{Q_0} W = 0; \quad \frac{\partial S}{\partial t} + v_g \frac{\partial S}{\partial z} + \frac{\omega}{Q_0} S = 0. \quad (8)$$

Рассматривая стационарное состояние (частные производные по времени равны нулю), мы имеем:  $S = S_0 e^{-z/l_0}$ ;  $l_0 = v_g \frac{Q_0}{\omega}$ . Итак, поток энергии уменьшается с коэффициентом затухания  $1/l_0$ ;  $l_0$  — длина, на которой величина потока уменьшается в  $e$  раз; её можно назвать длиной затухания. Эту величину нужно ввести в выражения полей, найденные в разделе I; коэффициенты затухания электрического и магнитного поля в отдельности будут равны половине коэффициента затухания потока энергии.

Длина затухания легко может быть истолкована в терминах времени, необходимого для того, чтобы амплитуда колебаний в резонансной полости уменьшилась в  $e$  раз. В резонансной части волновода плотность энергии не зависит от  $z$ . Поэтому производные по  $z$

в уравнении (8) обращаются в нуль, и мы имеем  $W = W_0 e^{-\frac{\omega}{Q_0} t}$ . Отсюда следует, что плотность энергии уменьшается в  $e$  раз за время  $\frac{Q_0}{\omega}$ . Мы видим, что за время  $T_0$ , в течение которого плотность энергии уменьшается в  $e$  раз, энергия распространяется с групповой скоростью  $v_g$  как раз на длину затухания. Последняя, следовательно, увеличивается с увеличением  $Q_0$  и уменьшается с уменьшением групповой скорости.

Мы увидим в дальнейшем, что понятие длины затухания играет очень большую роль в теории линейных ускорителей. Мы будем называть линейный ускоритель длинным, если его длина велика по сравнению с длиной затухания, и коротким — если имеет место обратное соотношение. Ясно, что в длинных ускорителях мы встретимся с трудностями. Интенсивность любого сигнала, отправленного из одного конца длинного ускорителя, уменьшится до ничтожной величины, пока он достигнет другого конца. Сигналы, которые мы в определённый момент времени начнём передавать из одного конца ускорителя, не успеют даже достигнуть другого конца за время  $T_0$ , в течение которого близ первого конца установится стационарное значение поля (ясно, что для установления стационарного состояния требуется столько же времени, сколько и для распада). Это означает, что концы длинного ускорителя по существу изолированы друг от друга как в пространстве, так и во времени. Однако мы увидим, что для надлежащего возбуждения длинного волновода поля на его концах должны удовлетворять определённым фазовым соотношениям. Таким образом, мы приходим к необходимости рассмотреть проблему возбуждения, ибо оказывается, что ускорители, достаточно длинные для того, чтобы получать в них частицы с энергиями в миллиарды eV, являются длинными и в нашем смысле этого слова.

## V. ВВОД МОЩНОСТИ В ВОЛНОВОД

По оси линейного ускорителя нужно направить весьма сильное электрическое поле, связанное с компонентой Фурье, скорость которой равна скорости ускоряемой частицы. Зная всю картину поля в ускорителе, мы найдём, что интеграл от квадрата поля, взятый по единице длины прибора (и, следовательно, энергия, запасённая на единице длины), пропорционален квадрату этой компоненты Фурье. В самом деле, пусть поле, направленное по оси  $z$ , содержит резонирующую с частицей компоненту Фурье  $E e^{i\omega(t-z/v)}$ . Энергия, запасённая на единице длины, равна некоторой константе, помноженной на  $\epsilon_0 E^2$  \*) и на поперечное сечение трубы волновода. При заданной геометрии прибора (т. е. заданных расстояниях между диафрагмами,

\*)  $\epsilon_0$  — диэлектрическая постоянная вакуума. Автор пользуется системой MKS. (Прим. переводчика.)

размерах отверстий и т. д.), но при произвольном масштабе, поперечное сечение будет пропорционально квадрату длины волны (в свободном пространстве), на которой работает ускоритель, так как ей пропорциональны все линейные размеры полостей. Имеем, таким образом:

$$W = A \epsilon_0 E^2 \lambda_0^2,$$

где  $A$  — некая константа, которую можно определить, зная характер поля. Выше предполагалось, что  $W$  есть полная запасённая энергия (которая равна, конечно, удвоенной электростатической энергии). Таким образом, чтобы  $E$  было велико, нужен большой запас энергии; следовательно, в стационарном состоянии будут иметь место значительные потери, и в ускоритель нужно вводить большую мощность. В течение процесса установления равновесия  $W$  будет меньше, чем когда равновесие уже установилось; следовательно, меньше будет и ускоряющее поле. Следовательно, при работе с ускорителем надо сначала дождаться установления стационарного режима, и уже затем, когда поле достигнет максимальной величины, вводить подлежащие ускорению частицы. В этом разделе мы исследуем, какую мощность надо вводить в прибор для достижения поля заданной величины. Мы рассмотрим также переходный процесс установления стационарного режима.

Результаты оказываются различными, в зависимости от того, закрыт ли прибор с концов идеально отражающими стенками, так что в нём образуется стоячая волна, или же на концах его находятся стенки, от которых бегущие волны не отражаются. Результаты зависят также от распределения источников мощности по длине ускорителя. Начнём со случая отражающих стенок и равномерного распределения источников мощности, как это имеет место в приборах МТИ и Калифорнийского университета. Вся мощность, вводимая на единице длины, будет тогда диссипировать на единице длины стенок. Мы уже знаем, что эта диссипация измеряется величиной  $\omega \frac{W}{Q_0}$ . Следовательно, обозначая мощность, вводимую в единицу длины прибора, через  $P$ , мы имеем:

$$P = \frac{1}{Q_0} \cdot A \epsilon_0^2 E^2 \lambda_0^2 \omega.$$

Вспоминая, что

$$\frac{\omega}{c} = \frac{2\pi}{\lambda_0}, \quad c = (\epsilon_0 \mu_0)^{-1/2} \quad \text{и} \quad \left(\frac{\mu_0}{\epsilon_0}\right)^{1/2} = 377 \text{ Ом},$$

получаем отсюда

$$E = \alpha \sqrt{\frac{377 P Q_0}{\lambda_0}}, \quad \text{где} \quad \alpha = \frac{1}{\sqrt{2\pi A}}. \quad (9)$$

Мы видим, что ускоряющее напряжение пропорционально корню квадратному из мощности, вводимой на единице длины прибора. Таким образом, желая сделать ускоритель с заданной разностью потенциалов на концах максимально коротким (или, что то же самое, стремясь сколь возможно увеличить  $E$ ), мы должны вводить в прибор возможно большую мощность. С другой стороны, если запас мощности в нашем распоряжении ограничен или если желательнее сэкономить на источниках энергии, нужно обратиться к другой крайности, насколько возможно удлиняя ускоритель. Чтобы убедиться в этом, перепишем уравнение (9) в форме, явно включающей разность потенциалов  $E$ , проходящую частицей, и полную мощность, вводимую в прибор,  $Pl$  ( $l$  — длина ускорителя).

Мы имеем:

$$El = \alpha \left( \frac{377 (Pl) \cdot Q_0 l}{\lambda_0} \right)^{1/2}.$$

Таким образом, разность потенциалов пропорциональна корню квадратному из длины прибора, и, безгранично увеличивая последнюю, теоретически можно при заданной мощности ускорить частицы до любых энергий. Из только что написанного уравнения видно, что заданную разность потенциалов на концах ускорителя можно получить, либо вводя в короткий прибор большую мощность, либо уменьшая вводимую мощность за счёт увеличения длины прибора; сама разность потенциалов зависит только от произведения полной вводимой мощности на длину. Теоретические предпосылки для выбора тех или иных значений длины и мощности в отдельности отсутствуют, поэтому решение будет определяться, в основном, экономическими соображениями. Стоимость линейного ускорителя, если отвлечься от заданной стоимости его концевых устройств, складывается из двух частей: во-первых, стоимости трубы прибора, её откачки, содержания и т. д. (все эти величины пропорциональны длине ускорителя); во-вторых, стоимости источников энергии и устройства для ввода её в прибор; эти величины пропорциональны вводимой в прибор мощности, т. е. при заданной разности потенциалов обратно пропорциональны длине ускорителя. Таким образом, стоимость прибора состоит из двух частей, одна из которых пропорциональна, а другая — при заданной разности потенциалов — обратно пропорциональна длине прибора. Последнюю надо выбрать так, чтобы стоимость оказалась минимальной. Но функция  $x + \frac{1}{x}$  имеет минимум при  $x = 1$ , когда оба слагаемых одинаковы. Следовательно, стоимость ускорителя минимальна при одинаковой стоимости источников энергии и трубы (т. е. всех частей прибора, стоимость которых пропорциональна его длине).

Пользуясь этим условием, легко найти экономически самое выгодное расстояние между источниками энергии, коль скоро выбран

их тип и решено равномерно распределить их вдоль прибора: надо построить линию такой длины, чтобы она стоила столько же, сколько энергетическое хозяйство.

В дальнейшем мы увидим, что расстояние между вибраторами не должно быть велико по сравнению с длиной затухания. Следовательно, конструкция должна быть такова, чтобы эта длина превышала самое экономичное расстояние между источниками энергии. Надо думать, что к тому времени, когда будут приведены в исполнение проекты, разрабатываемые сейчас в различных институтах, можно будет произвести оценки стоимости, и найти наиболее экономичное расстояние между вибраторами; однако до сих пор надёжных цифр ещё нет, и неясно, что в конце концов окажется самым выгодным — близкое расположение вибраторов, как в проекте МТИ, далёкое, как в Стэнфорде, или нечто промежуточное.

В случае бегущих волн положение радикально меняется. Пусть попрежнему на единицу длины прибора подаётся определённая мощность  $P$ . Однако теперь она тратится двумя путями: попрежнему имеют место тепловые потери в стенках ( $\omega \frac{W}{Q_0}$  на единицу длины) и ещё появляется поток энергии  $v_g W$  через неотражающую стенку в конце трубы. Поэтому полная подводимая мощность  $Pl$  должна равняться  $\left(\frac{\omega l}{Q_0} + v_g\right) W$ . В результате  $\frac{1}{Q_0}$  заменяется на

$$\frac{1}{Q_L} = \frac{1}{Q_0} + \frac{v_g}{\omega l} = \frac{1}{Q_0} \left(1 + \frac{l_0}{l}\right). \quad (10)$$

$Q_L$  можно назвать потерями в волноводе, нагруженном поглощающей стенкой на конце. Вместо уравнения (9) получим:

$$E = \alpha \left( \frac{377 Q_0 P}{\lambda_0} \cdot \frac{l}{l + l_0} \right)^{1/2} \quad (11)$$

(предполагается, что мощность вводится в прибор по всей длине стенок). Если длина трубы  $l$  много больше длины затухания, то дополнительный множитель  $\sqrt{\frac{l}{l + l_0}}$  примерно равен 1, и потери на конце почти не влияют на напряжённость поля. Однако при  $l \ll l_0$  этот множитель много меньше единицы, и при заданных геометрии и вводимой на единицу длины мощности напряжение, получаемое в приборе с бегущей волной, оказывается заметно меньше, чем в случае стоячих волн. Иными словами, в короткой трубе неразумно пользоваться бегущими волнами. В длинном ускорителе потери на концах пренебрежимо малы по сравнению с диссипацией энергии в боковых стенках, и разница в напряжениях незначительна. В этом случае выбор между стоячими и бегущими волнами основывается на других соображениях, о которых речь впереди.

Из существующих проектов ускорителей по крайней мере в двух (Стэнфордском и TRE) запланировано применение бегущих волн. Авторы этих проектов, безусловно, думали и о питании волновода с входного конца. Считая  $l \ll l_0$ , мы можем переписать уравнение (11) в несколько ином виде, выразив приобретаемую частицей энергию через мощность  $Pl$ , вводимую в волновод:

$$El = \alpha \left( \frac{377 (Pl)}{\lambda_0} Q_0 l \frac{l}{l+l_0} \right)^{1/2} \quad (12)$$

в этом случае безразлично, вводится ли мощность непрерывно по всей длине стенок или только с конца). Из формулы (12) видно, что при  $l \ll l_0$  и постоянном значении  $Pl$  приобретаемая частицей энергия  $El$  пропорциональна длине трубы. Это позволяет предположить, что достаточно питать прибор с бегущей волной только с одного конца, чтобы получать любые ускорения. Тем не менее, уравнения (11) и (12) эквивалентны, и они очень ясно показывают, что хотя приобретаемая частицей энергия и пропорциональна  $l$  (при малых  $l/l_0$ ), она всё же в  $\sqrt{\frac{l}{l+l_0}}$  раз меньше, чем в волноводе со стоячей волной (при той же длине ускорителя и той же мощности). Только потому, что этот множитель становится менее невыгодным для больших  $l$ , мы и получаем в этом случае быстрый рост энергии с длиной. Кроме того, при питании с одного конца есть и ещё одно неудобство. Как мы видели раньше, если  $l$  сравнимо с  $l_0$ , то плотность энергии в волноводе экспоненциально убывает с  $z$  и при  $z = l_0$  — длине затухания — она становится весьма малой. Следовательно, пройдя это расстояние, частица перестанет ускоряться. Иначе говоря, метод питания волновода с бегущей волной с конца не годится, если длина ускорителя больше  $l_0$ . Вместе с тем, пользование стоячими волнами явно выгоднее при  $l \ll l_0$ . Заметим, однако, что в случае бегущих волн величина  $\alpha$  может оказаться больше, чем для стоячих; поэтому в некотором интервале длин вблизи  $l_0$  ускорители с бегущими волнами могут оказаться несколько выгоднее. Это обстоятельство было отмечено в Стэнфорде и TRE, где предполагается подобрать  $v_g$  так, чтобы длина прибора примерно равнялась  $l_0$  \*). В длинном волноводе мощность должна подводиться на всём его протяжении, непрерывно или в отдельных точках, расстояние между которыми меньше  $l_0$ .

Обратимся к переходным процессам, связанным с установлением колебаний в трубе. Как уже было замечено, в случае стоячих волн время установления стационарного режима порядка  $T_0 = \frac{Q_0}{\omega}$ . Интересно сравнить его с другой характерной величиной,  $T_1 = \frac{l}{v_g}$

\*) В оригинале стоит не  $l_0$ , а  $l$ . Это явная опечатка. (Прим. переводчика.)

(это — время, в течение которого поле с групповой скоростью  $v_g$  распространяется от одного конца волновода до другого). Мы видим, что  $\frac{T_1}{T_0} = \frac{l}{l_0}$ . Иначе говоря, время, за которое поле распространяется от одного конца длинного ускорителя до другого, много больше времени установления стационарного режима. Пока стационарный режим устанавливается, один конец трубы ничего не знает о другом, и для обеспечения надлежащих фазовых соотношений между концами нужен некий внешний контур (этот вопрос обсуждается в следующем разделе). С другой стороны, в коротком волноводе стоячая волна за время  $T_0$  успевает многократно отразиться от обоих концов, и необходимые фазовые соотношения легко устанавливаются. Далее, в коротком волноводе безразлично, где вводить энергию: благодаря отражениям от стенок она надлежащим образом распределится по всей трубе, независимо от того, где её ввели. В длинном волноводе дело обстоит иначе: там, очевидно, источники энергии должны быть равномерно распределены вдоль трубы, причём расстояние между ними не должно превышать длины затухания (лучше даже, чтобы оно было заметно меньше её). Интересно отметить, что если в трубе со стоячими волнами поместить между источниками энергии отражающие перегородки (конечно, с небольшими отверстиями для прохода частиц), то весь процесс установления колебаний протекает точно так же, как и без них. В отсутствие этих перегородок поле в данной точке устанавливается в результате последовательного наложения ряда волн, испускаемых всё более и более отдалёнными источниками; вследствие затухания каждая последующая волна оказывается слабее предыдущих. При наличии перегородок место волн, испущенных отдалёнными источниками, занимают многократно отражённые волны, вновь и вновь приходящие в данную точку. Мы увидим в дальнейшем, что это обстоятельство во многих отношениях упрощает наши рассуждения. Возможно, что действительная конструкция трубы также упростится, если разделить её таким образом на короткие секции.

В трубе с бегущими волнами положение меняется. В длинную трубу мощность можно вводить равномерно на всей её длине, как и в случае стоячих волн. Стоит рассмотреть возбуждение бегущей волны вибратором. Бегущую волну можно составить из двух стоячих — синусоидальной и косинусоидальной — с разностью фаз в  $\frac{\pi}{2}$ . Для возбуждения бегущей волны надо возбудить отдельно обе эти компоненты. Следовательно, мощность должна вводиться в волновод по крайней мере в двух точках. Последние должны находиться в пучностях соответствующих компонент, и с помощью какого-нибудь фазировочного контура между ними должна быть установлена разность фаз, равная  $\frac{\pi}{2}$ . Этот контур можно осуществить просто в виде

двухфазной системы с разностью фаз в четверть длины волны, так что обе компоненты можно питать от одного и того же вибратора.

Проблема установления колебаний в длинной трубе с бегущими волнами, питаемой равномерно распределёнными вибраторами, по существу не отличается от аналогичной задачи в случае стоячих волн, исключая лишь то, что теперь волны распространяются только в одном направлении. Попрежнему поле не установится, пока сигналы, посланные далёкими вибраторами, не достигнут данной точки трубы; время установления колебаний попрежнему будет порядка  $T_0$ . Только вблизи входа условия возбуждения стоячих и бегущих волн существенно различны. В случае стоячих волн мы имели у входа отражённые сигналы, распространяющиеся в обратном направлении; в случае бегущих волн их не будет. Поле у входа не сможет образоваться за счёт наложения последовательных сигналов от всё более и более далёких источников, так как все они распространяются в другую сторону — от входа. Поэтому поле у входа установится скорее, чем в более далёких частях трубы, но будет не так велико, как там. Чтобы скомпенсировать это, придётся поставить у входа дополнительный источник энергии. Поскольку влияние этого источника на расстояниях, превышающих длину затухания, уже не сказывается, мы получим постоянное ускорение.

Что касается короткой трубы с бегущими волнами, где  $T_1 \ll T_0$ , то ясно, что колебания полностью установятся за время порядка  $T_1$ . В самом деле, за это время сигнал, посланный из одного конца трубы, дойдёт до другого её конца, где и поглотится. Поскольку энергия втекает в волновод только за время  $T_1$ , малое по сравнению с  $T_0$ , поле не успеет достигнуть максимального значения, и ясно, что запасённая энергия и ускоряющее напряжение здесь будут меньше, чем в такой же трубе со стоячими волнами (так как в последней поле может многократно отражаться от стенок, оставаясь в полости в течение всего времени  $T_0$ ). Таким образом, мы ещё раз приходим к уже рассмотренному выше уменьшению ускоряющего напряжения в короткой трубе при переходе от стоячих волн к бегущим.

## VI. ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА УСКОРЕНИЕ

В предыдущем разделе мы получили уравнение (9) для амплитуды ускоряющего поля в функции длины волны, потерь в стенках и потока мощности на единицу длины. Эта формула верна для любого длинного волновода — как для бегущих, так и для стоячих волн. Она верна также в случае короткой трубы со стоячими волнами. Пытаясь получить максимальное ускорение, мы можем менять некоторые величины в этой формуле. К их числу относятся длина волны, геометрия прибора и выбор режима работы, в частности, выбор стоячих или бегущих волн. В настоящем разделе мы рассмотрим все эти факторы. Мы рассмотрим также проекты различных ускорителей

и результаты, которых можно ожидать, судя по ним. Исследуем прежде всего влияние длины волны. Хорошо известно, что добротность резонансной полости пропорциональна её объёму, делённому на объём поверхностного слоя толщины  $\delta$ , где  $\delta$  — скинновая толщина; константа пропорциональности по порядку величины близка к единице. Скинновая толщина как функция проводимости  $\sigma$  (в омах на метр) и длины волны в вакууме  $\lambda_0$  (в метрах) даётся выражением

$$\delta = \sqrt{\frac{\lambda_0}{377\pi\sigma}}.$$

Возьмём последовательность геометрически подобных полостей, соответствующих различным длинам волн. Объём каждой из них, конечно, пропорционален кубу  $\lambda_0$ , а поверхность — квадрату. Имеем, таким образом:

$$Q_0 = \text{const} \cdot \frac{\lambda_0}{\delta} = B \sqrt{377\sigma\lambda_0},$$

где  $B$  — число порядка единицы.

Подставляя это в (9), имеем:

$$E = \alpha B^{1/2} (377P)^{1/2} \left(377 \frac{\sigma}{\lambda_0}\right)^{1/4}, \quad (13)$$

т. е. при заданном потоке мощности ускоряющее поле обратно пропорционально корню четвёртой степени из длины волны. Это означает, что при прочих равных условиях в линейном ускорителе выгоднее пользоваться более короткими волнами. Однако  $E$  так медленно меняется с  $\lambda_0$ , что эта выгода невелика, и вопросы удобства в обращении, доступности источников энергии и другие подобные соображения оказываются более важными. Из уравнения (13) видно также, что  $E$  пропорционально корню четвёртой степени из проводимости стенок. Это наводит на мысль воспользоваться хорошими проводниками типа серебра или меди или работать при низких температурах, при которых проводимость металлов возрастает. Однако выгода от этого столь мала, что охлаждение волновода обойдётся, вероятно, дороже, чем увеличение вводимой мощности.

Теперь нам следует изучить роль геометрии прибора. Она сказывается главным образом на величине коэффициента  $\alpha$ , хотя  $Q_0$  и, следовательно,  $B$  также зависят от геометрических условий. По определению,  $\alpha$  велико, если велика составляющая поля по оси  $z$  (направление ускорения частиц) при данном запасе энергии или, наоборот, запас энергии (и, следовательно, поле во всех остальных точках полости) мал при данной  $z$ -компоненте поля. Чтобы понять, как можно увеличить  $\alpha$ , заметим, прежде всего, что электрическое и магнитное поля в резонирующей с частицей бегущей волне являются бесселевыми функциями (соответственно  $J_0$  и  $J_1$ ) от аргумента  $2\pi r \sqrt{\lambda_0^{-2} - \lambda_z^{-2}}$ .

Поскольку фазовая скорость этой величины  $v = c \frac{\lambda}{\lambda_0}$  должна быть меньше скорости света, мы видим, что аргумент бесселевой функции является мнимым или (в пределе при  $v = c$ ) обращается в нуль. Но бесселевы функции мнимого аргумента экспоненциально возрастают с увеличением модуля последнего, и мы видим, что поле быстро возрастает по мере удаления от оси  $z$ ; этот рост тем быстрее, чем меньше скорость. В предельном случае  $v = c$  компонента электрического поля не зависит от  $r$ . Все эти выводы прямо противоположны тому, что имеет место в ненагруженном волноводе, где фазовая скорость волн больше скорости света, поля даются бесселевыми функциями действительного аргумента и убывают по мере удаления от оси.

Если бы имелась только та компонента Фурье, которая резонирует с частицей, большая часть энергии была бы запасена вдали от оси, и  $\alpha$  было бы мало. Однако по мере удаления от оси другие компоненты Фурье становятся всё более и более существенными. Они выполняют двоякую роль: во-первых, позволяют удовлетворить граничным условиям у стенки волновода (чего нельзя было бы добиться с помощью только одной компоненты Фурье); во-вторых, благодаря им уменьшается поле вдали от оси, в результате чего улучшается значение  $\alpha$ . Определить наилучшую (в смысле увеличения  $Q_0$  и  $\alpha$ ) структуру в общем виде было бы чрезвычайно трудно. Поэтому мы рассмотрим один специальный пример — ускоритель МТИ — и спросим себя, как можно было бы улучшить его конструкцию, меняя различными способами геометрию прибора. На рис. 5 схематически показаны электрические силовые линии для этого случая. В приборе возбуждаются колебания типа  $\pi$  (т. е. разность фаз между соседними диафрагмами равна  $\pi$ ) и  $\frac{v}{c} = 1$ . Мы видим, что поле в промежутках между диафрагмами почти не зависит от  $r$  вплоть до расстояния, примерно равного радиусу отверстия, и начинает убывать при больших  $r$ , почти как в замкнутой цилиндрической полости. Это наводит на мысль, что если бы отверстия в диафрагмах были поменьше, то спад поля начался бы раньше и запасённая вдали от оси энергия уменьшилась бы. В действительности это так и есть. Вычисленное значение  $\alpha$  для ускорителя МТИ равно 0,48, в то время как в предельном случае исчезающих отверстий, когда мы приходим к замкнутым цилиндрическим полостям,  $\alpha = 10,3$ . Отверстия в диафрагмах здесь сделаны довольно большими, чтобы гарантировать беспрепятственное прохождение электронного пучка. Если бы оказалось, что фактически этот пучок более сконцентрирован, в будущем можно было бы делать отверстия заметно меньшего радиуса. Соответственно увеличилось бы значение  $\alpha$ . Величина  $Q_0$  или  $B$  при этом мало меняется. Так, значение  $B$  в приборе МТИ равно примерно 0,45, а в предельном случае исчезающих отверстий оно состав-

ляет 0,39. Таким образом, входящая в уравнение (12) величина  $\alpha\sqrt{V}$  возрастает от 0,32 в ускорителе МТИ до 0,65 в предельном случае малых отверстий. Итак, описанным путём можно увеличить ускоряющее поле максимум в два раза, а практически ещё гораздо меньше, так как нужно всё же оставить значительные отверстия для прохода электронов. В стэнфордском проекте используются отверстия гораздо меньшего радиуса, чем в МТИ, и геометрия там, вероятно, ближе к той, которая была бы осуществлена в реальном ускорителе.

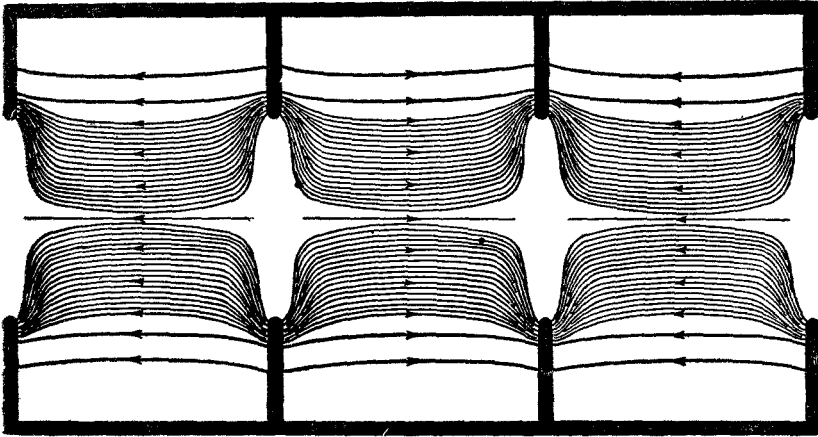


Рис. 5. Силовые линии в ускорителях МТИ. Расстояние между линиями характеризует напряжённость поля.

Рассмотренный нами пример относился к случаю  $v=c$ . Для меньших скоростей положение меняется. Во-первых, мы уже видели, что поле в этом случае отнюдь не остаётся постоянным, а быстро возрастает по мере удаления от оси. Повидимому, этот рост продолжается вплоть до расстояния, примерно равного радиусу отверстия, после чего поле начнёт убывать. Поэтому для малых скоростей и больших отверстий значение  $\alpha$  может заметно уменьшиться. Однако при уменьшении радиуса отверстия положение быстро улучшается, и в пределе при исчезающем радиусе  $\alpha$  не зависит от скорости волны. Это, однако, не так для  $Q_0$  и  $B$ . По мере уменьшения скорости частиц диафрагмы нужно ставить всё ближе и ближе друг к другу, и потери в поверхностном слое возрастают по сравнению со всей запасённой энергией. Поэтому  $Q_0$  уменьшается, изменяясь (в предельном случае малых скоростей) пропорционально  $v$ . Таким образом, наша конструкция непригодна для малых скоростей. Для ускорения электронов, однако, это обстоятельство несущественно: в проекте МТИ предполагается запускать в прибор электроны, предварительно разогнанные в генераторе Ван дер Графа до двух MeV (скорость

их почти равна  $c$ ); в большинстве других ускорителей начальная скорость электронов также равна по меньшей мере половине скорости света. Однако для положительных ионов с их гораздо меньшими скоростями волновод с диафрагмами не годится, пока ионы не будут довольно сильно разогнаны. При малых скоростях гораздо удобнее система, применённая в протонном ускорителе Калифорнийского университета. Она изображена на рис. 1,б.

Расчёт показывает, что значения  $\alpha$  и  $B$  в ней равны, соответственно 1,58 и 0,54, так что  $\alpha\sqrt{B}$  равно примерно 1,16 — гораздо больше, чем в приборе МТИ и даже лучше, чем для диафрагм с малыми отверстиями. Однако для больших скоростей эта система непригодна, так как диаметры внутренних трубок, в которых движутся частицы, должны быть тем меньше, чем больше скорость. Даже при весьма больших размерах, с которыми мы имеем дело, работая на частоте в 200 мегациклов, эти трубки становятся столь узкими, что протонный пучок уже не может распространяться беспрепятственно.

До сих пор предполагалось, что в волноводе устанавливаются колебания типа  $\pi$ . Посмотрим теперь, не улучшится ли дело при работе в каком-нибудь другом режиме. Можно, например, ввести в систему рис. 5 добавочные диафрагмы, поместив их посередине между старыми. При этом картина поля не изменится, так как силовые линии будут встречаться с новыми диафрагмами под прямым углом и, следовательно, граничные условия и уравнения Максвелла удовлетворятся. Попрежнему будет иметь место резонанс при той же длине волны в волноводе, частоте и фазовой скорости, но, поскольку диафрагмы расположены вдвое чаще прежнего, разность фаз между ними составит всего  $90^\circ$ , т. е. мы получим колебания типа  $\frac{\pi}{2}$ .

Мы имеем теперь на выбор две возможности: можно возбудить либо стоячую, либо бегущую волну (в случае колебаний типа  $\pi$  последнее было невозможно). Бегущая волна может возникнуть потому, что в присутствии промежуточных диафрагм мы имеем два решения для поля — одно, изображённое на рис. 5, и другое, сдвинутое относительно первого на одно расстояние между диафрагмами. Эти решения связаны друг с другом, как синус с косинусом и, будучи возбуждены одновременно с разностью фаз в  $\frac{\pi}{2}$ , они представляют бегущую волну, распространяющуюся вправо или влево, смотря по тому, положительна или отрицательна указанная разность фаз. Суперпонируя бегущие волны, распространяющиеся в разные стороны, мы вновь можем получить стоячую волну. Рассмотрим последовательно обе указанные возможности.

В стоячей волне запас энергии и  $z$ -компонента поля такие же, как и при колебаниях типа  $\pi$ . Поэтому значение  $\alpha$  не меняется. Однако  $Q_0$  заметно уменьшается. Ведь теперь при прежнем запасе энергии имеется вдвое больше диафрагм, в которых течёт ток и выде-

ляется джаулево тепло. Если бы диссипация энергии происходила только в диафрагмах, это привело бы к увеличению потерь (и, следовательно, уменьшению  $Q_0$ ) в два раза по сравнению с колебаниями типа  $\pi$ . Дело, однако, не так плохо, так как часть энергии диссипирует в цилиндрических стенках полости, а эта величина в обоих случаях одна и та же. Расчёт показывает, что при колебаниях типа  $\frac{\pi}{2}$   $Q_0$  составляет около 70% соответствующей величины для того случая, когда разность фаз между диафрагмами равна  $\pi$ . То же самое имеет место и для  $B$ . Таким образом, ускоряющее поле (пропорциональное  $\alpha\sqrt{B}$ ) равно всего 0,84 той величины, которую оно имеет при колебаниях типа  $\pi$ . Иначе говоря, с точки зрения расхода энергии колебания типа  $\frac{\pi}{2}$  невыгодны. Надо думать, что раз эффективность прибора так уменьшается при переходе от колебаний  $\pi$ -типа к типу  $\frac{\pi}{2}$ , то какое-то ухудшение произойдет и при переходе к любому другому режиму. Тип  $\pi$ , вероятно, является энергетически самым выгодным, так как требует минимального количества диафрагм на единицу длины и, следовательно, ведёт к минимальным потерям в контуре.

Тем не менее, колебания типа  $\frac{\pi}{2}$  обладают и одним преимуществом. Оно столь существенно, что по крайней мере в одном проекте (принадлежащем General Electric Company) выбран именно этот режим работы. Дело в том, что при колебаниях типа  $\frac{\pi}{2}$  групповая скорость  $v_g$  имеет максимальное значение, в то время как для типа  $\pi$  она теоретически равна нулю. Следовательно, длина затухания  $l_0$  для колебаний типа  $\frac{\pi}{2}$  может быть довольно большой, а во втором случае  $l_0$  теоретически равно нулю. Поэтому ускоритель заметных размеров может в первом случае оказаться коротким (в том смысле, что его длина меньше  $l_0$ ), а во втором — длинным. В следующем разделе мы рассмотрим некоторые особенности колебаний типа  $\pi$ , связанные с длиной затухания, и покажем, что можно построить линейный ускоритель весьма немалых размеров и всё же заставить его работать, как короткий; однако для типа  $\frac{\pi}{2}$  соответствующая длина много больше. В дальнейшем будет показано, что короткий волновод питать гораздо проще, чем длинный. В General Electric Company запроектирован ускоритель средних размеров, и оказывается, что в случае колебаний типа  $\frac{\pi}{2}$  его можно считать коротким, а в случае типа  $\pi$ -длинным, с соответствующим усложнением проблемы питания. В проекте МТИ мы стоим перед проблемой питания длин-

ного ускорителя, и указанное преимущество колебаний типа  $\frac{\pi}{2}$  отсутствует.

Другая возможность использования колебаний типа  $\frac{\pi}{2}$  состоит в возбуждении бегущих волн. Именно эта возможность используется в стэнфордском проекте. Мы попрежнему имеем здесь уменьшение  $B$  благодаря наличию добавочных диафрагм, но оно более чем компенсируется увеличением  $\alpha$ . Будем рассматривать стоячую волну, соответствующую колебаниям типа  $\pi$ , как образованную двумя бегущими волнами, распространяющимися в противоположных направлениях. Только одна из них будет резонировать с электронами. По исключении бегущей волны, распространяющейся в другую сторону (что означает уменьшение запаса энергии вдвое), в трубе с бегущей волной будет получаться такое же ускорение, как и в случае стоячих волн. Иначе говоря, при том же ускорении потребуется вдвое меньшая мощность, что, как видно из уравнения (9), означает, что величина  $\alpha$  возрастёт в  $\sqrt{2}$  раз. Это не совсем точно, если в бегущей волне содержится заметная отражённая компонента, как это будет при приближении колебаний к типу  $\pi$ . В этом случае значение  $\alpha$  всё время уменьшается, принимая в пределе значение, соответствующее колебаниям типа  $\pi$ . Однако для колебаний типа  $\frac{\pi}{2}$  можно ожидать увеличения  $\alpha$  в  $\sqrt{2}$  раз. Комбинируя это с уже известным уменьшением  $B$ , мы видим, что при переходе от колебаний типа  $\pi$  к бегущей волне типа  $\frac{\pi}{2}$  ускоряющее поле увеличивается в  $\sqrt{0,7 \cdot 2} = 1,18$  раза. О таком улучшении свойств прибора стоило бы позаботиться, если бы не было компенсирующих его недостатков. В действительности, благодаря переходу от стоячих волн к бегущим и уменьшению размеров отверстий в диафрагмах, величина  $\alpha\sqrt{B}$  в стэнфордском проекте увеличивается примерно в 1,68 раза по сравнению с ускорителем МТИ (возрастает от 0,32 до 0,54). Это, однако, компенсируется двумя недостатками. Во-первых, как мы уже видели выше, в коротком ускорителе, работающем на бегущих волнах (вроде того, что строится сейчас в Стэнфорде), поле уменьшается в  $\sqrt{\frac{l}{l+l_0}}$  раз по сравнению с прибором, использующим стоячие волны. Длина затухания в стэнфордском ускорителе равна примерно 18 м, а полная длина его составит, вероятно, около 6 м. Следовательно,

$$\sqrt{\frac{l}{l+l_0}} = \sqrt{\frac{1}{1+\frac{18}{6}}} = 0,50.$$

С учётом этого множителя численный коэффициент в стэнфордском проекте окажется равным всего 0,27 против 0,32 в приборе

МТИ. Положение, конечно, улучшится, если сделать прибор длиной в  $l_0$  или много больше, как это в дальнейшем предполагается в Стэнфорде. Выше мы уже отмечали, что в некотором интервале длин прибора, близких к  $l_0$ , ускоритель, работающий на бегущих волнах, может оказаться несколько более выгодным. Второй недостаток ускорителей этого типа имеет место только в длинных приборах. Он связан с трудностью стабилизации частоты вибраторов. Это обстоятельство, которое в дальнейшем будет разобрано подробнее, составляет, по мнению автора, важнейший аргумент в пользу применения в длинных ускорителях стоячих волн (если только прибор питается от вибраторов с самовозбуждением).

Интересно сравнить окончательные данные всех трёх проектов — МТИ, калифорнийского и стэнфордского. Исходя из уравнения (13), подставим туда численное значение проводимости. Примем для меди значение  $5,5 \cdot 10^7$  *мо* на метр. Для коротких волн мы возьмём 0,8 этой величины, так как почти всегда значения  $\sigma$  в ненагруженной полости при длине волны в 10 *см* оказываются процентов на двадцать меньше теоретических (для калифорнийского пресекта нужно взять даже 0,4, чтобы получить согласие с наблюдаемыми значениями  $\sigma$ ). Мы получим:

$$E \text{ (в меговольтах на метр)} = 7,3 \frac{\alpha \sqrt{BVP} \text{ (мегаватт на метр)}}{\lambda_0^{1/4} \text{ (в метрах)}}$$

Для бегущих волн сюда нужно добавить ещё множитель  $\sqrt{\frac{l}{l+l_0}}$ ; вместо коэффициента 7,3, соответствующего истинной проводимости меди, в случае коротких волн надо поставить 6,9, а для калифорнийского проекта — 5,8. Подставляя уже упомянутые в тексте значения, мы имеем для константы

$$C = 7,3 \alpha \sqrt{B} \sqrt{\frac{l}{l+l_0}} : \lambda_0^{1/4}$$

$$C = \begin{cases} 3,9 & \text{для ускорителя МТИ,} \\ 3,3 & \text{для стэнфордского прибора,} \\ 6,1 & \text{для ускорителя калифорнийского университета.} \end{cases}$$

Вторая цифра равнялась бы 6,6, если бы не поправка на небольшую длину прибора. Эти цифры показывают, что, несмотря на различие систем, ускорение во всех трёх случаях оказывается примерно одинаковым (при одинаковой мощности, вводимой на единицу длины). Разница в ускорениях, которые предполагается получить, происходит главным образом за счёт разных мощностей. Так, в ускорителе МТИ будет по одному магнетрону на каждые 32 *см* длины прибора. Магнетрон будет отдавать, вероятно, около 0,8 MW, примерно половина этой величины попадёт в ускоритель. Это даёт  $P = \frac{0,4}{0,32} = 1,25$  мегаватта на метр, откуда  $E = 4,4$  меговольта на метр. При

общей длине ускорителя 6,4 м сообщаемая электронам энергия окажется равной  $4,4 \cdot 6,4 = 28$  MeV. В предварительной модели стэнфордского ускорителя предполагается использовать только один магнетрон при длине прибора около 6,1 м. Поскольку здесь мы имеем дело с бегущими волнами, можно использовать всю отдаваемую магнетроном мощность, и, принимая то же значение 0,8 MW, что и в проекте МТИ, мы получаем  $P = \frac{0,8}{6,1} = 0,131$  мегаватта на метр, откуда  $E = 1,20$  мегавольта на метр. Электроны разгоняются при этом до энергии  $6,1 \cdot 1,20 = 7,3$  MeV. С другой стороны, в дальнейшем в Стэнфорде предполагают питать ускоритель от мощных клистронов новой конструкции, используемых как усилители мощности. Они будут размещены периодически вдоль прибора, с периодом порядка  $\lambda_0$ . Пока ещё рано предсказывать, какие энергии могут быть здесь получены. Полная мощность, вводимая в калифорнийский ускоритель, составляет 2,34 MW. При длине прибора около 12,2 м это даёт  $P = \frac{2,34}{12,2} = 0,19$  мегаватта на метр, откуда  $E = 2,66$  мегавольта на метр, и разность потенциалов на концах трубы равна 32 MeV. Однако, поскольку ионы находятся не в пике волны, только 28 MeV используется для ускорения. К этому добавляется ещё начальная энергия ионов, равная 4 MeV.

(Окончание в следующем выпуске.)

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК

**РОСТ ЧАСТИЦ В ДЫМАХ И ОБЛАКАХ И ОБРАЗОВАНИЕ  
СНЕГА ИЗ ПЕРЕОХЛАЖДЁННЫХ ОБЛАКОВ**

*Ирвинг Лэнгмюр\*)*

Я собираюсь рассказать сегодня о некоторых вещах, относящихся к серии исследований, начатых в ранний период войны и продолжаемых до сих пор. Будучи разнородными по характеру, они составляют, однако, некое единое целое, хотя на первый взгляд это может показаться и не так.

Первая часть наших исследований была начата ещё до нападения на Пирл-Харбор, когда военно-химическое ведомство предложило мне и В. Дж. Шеферу, который работал в качестве моего ассистента, предпринять теоретическое изучение процессов фильтрации в противогазовых фильтрах. В настоящее время в противогазовых масках для поглощения отравляющих газов применяется древесный уголь. Однако уже во время первой мировой войны появилась опасность, что противник использует дымы слабоиспаряющихся ядовитых веществ. Будучи взвешены в воздухе в виде аэрозоля и не являясь газом, дымовые частицы не поглощались бы углём, и для их удаления был бы необходим фильтр типа фильтровальной бумаги. Вопрос, поставленный перед нами, гласил: «Из чего следует исходить при устройстве фильтра, чтобы он по возможности хорошо отвечал своему назначению?» По всей вероятности, мы оказались бы захваченными врасплох, если бы враг решил использовать отравляющие дымы, для которых мы не имели соответствующего фильтра.

Прежде всего перед нами встала задача создания дымов, частицы которых имели бы размеры, наиболее трудно поддающиеся фильтрации. Мы хотели, чтобы дымы были устойчивы, мы хотели измерять их концентрацию и мы хотели измерять размеры частиц. Необходимо было изучить эти факторы. Потребовалась большая предварительная работа, чтобы научиться создавать частицы, однородные по

---

\*) Proc. Amer. Phys. Soc., 92, 167 (1948). Доклад, сделанный в Национальной Академии Наук 17 ноября 1947 г. Сокращённый перевод А. Мельниковой.

размерам, выяснить, как измерять их размеры и определять, какое количество вещества проникает через фильтр.

Эта работа продолжалась около года. Мы получили достаточно удовлетворительные теоретические результаты и достигли лучшего понимания того, как следует строить хорошие фильтры. Одновременно мы приобрели много детальных познаний в области создания дымов, которые не испарялись бы, содержали чрезвычайно мелкие частицы — много меньшие, чем в обычных дымах, — и выяснили их оптические свойства. Мы изучали такие вещи, как прохождение газов через тонкие поры, обтекание вокруг волокон и исследовали траектории малых частиц, увлекаемых газом.

Когда работа приближалась к концу (август 1941 г.), было получено сообщение, что немцы используют в больших масштабах дымы для маскировки промышленных объектов. Это были слегка окрашенные дымы. Их видели только с воздуха. Никто не знал, что это такое, но они были очень эффективны. Возник вопрос: не может ли кто-нибудь придумать способ получения белого маскирующего дыма, который мог бы применяться на больших участках для создания защитной дымки от воздушной бомбардировки? Мы с Шефером обсудили этот вопрос и нас заинтересовало, нельзя ли с этой целью использовать тот метод, который мы применяли для получения дымов при испытаниях фильтров. Мы нашли, что наиболее простым способом создания дыма и регулирования размеров его частиц является переведение некоторого количества масла в парообразное состояние. Мы нагревали жирные кислоты и подобные им соединения примерно до  $200^{\circ}\text{C}$ , пропускали над их поверхностью струю воздуха так, что пары их смешивались с воздухом, и затем внезапно охлаждали их путём обдувания большим количеством холодного воздуха. Частички растут в размерах, но внезапное охлаждение, как мы нашли, ведёт к остановке роста частиц на некоторой стадии, вследствие чего образуются частицы очень малых размеров. Мы были очень удивлены, когда обнаружили, что в надлежащих условиях можно получать частицы, исключительно однородные по размерам.

Теперь возникал вопрос: каким образом можно провести соответствующие операции в большом масштабе? Мы предполагали использовать вещества с низкой испаряемостью, нефтяные продукты, возможно, высококипящие смазочные масла или что-либо в этом роде, нагревая их до высокой температуры.

Из наших оптических исследований мы знали, что наилучшим маскирующим действием обладают малые частицы. Они рассеивают более полно и более эффективно, чем большие. Это напоминает рассеяние света молекулами воздуха, создающее голубой цвет неба. Согласно закону Релея, такие частицы рассеивают пропорционально шестой степени их радиуса  $R$ . Для больших частиц рассеяние изменяется, как  $R^2$ . Оно пропорционально тогда площади поперечного сечения частицы. Если теперь разделить  $R^6$  и  $R^2$  на  $R^3$ , которое

пропорционально объёму капельки, то получим меру эффективности данного количества вещества в отношении рассеяния света. Для очень маленьких капелек эффективность растёт как  $R^3$ , но для больших частиц она изменяется, как  $\frac{1}{R}$ , т. е. убывает обратно

пропорционально радиусу частицы. Иными словами, должен существовать определённый диаметр частиц, при котором они рассеивают свет наиболее эффективно. Оптимальный диаметр оказался практически равным длине волны рассеиваемого света — около  $0,6 \mu$  для видимого света. Это много меньше, чем диаметр частиц, получающихся в других дымовых генераторах, но как раз те размеры, которые мы использовали в наших работах по фильтрации дымов. Наиболее трудно поддаются фильтрации частицы диаметр которых около  $0,5$  микрона; лучше всего рассеивают свет частицы диаметром  $0,6 \mu$ .

Применённый нами принцип состоит в том, что если мы хотим получить малые частицы, мы должны охлаждать пары очень быстро. Осуществить это в больших масштабах довольно затруднительно. Поэтому для создания дымов в больших масштабах необходимо использовать большие скорости. Мы решили выяснить возможности использования наивысшей доступной скорости — скорости звука. Нам нужно выпускать пары масла в атмосферу со скоростью, близкой к скорости звука. Нам нужно создавать в кипятильнике пары под давлением около  $0,7$  ат выше атмосферного и выпускать их через сопло со скоростью порядка  $150$  м/сек. Воздух, окружающий струю испарённого масла, очень быстро смешивается с парами и образует конусообразную струю дыма.

Мы проделали вычисления, которые были весьма элементарны, но привели к существенным результатам. Теория была примерно такова. Очень малые частицы, имеющие диаметр около  $1$  микрона или менее, обладают высоким внутренним давлением вследствие поверхностного натяжения. Этот эффект иллюстрируется простым опытом, который может быть проделан с двумя мыльными пузырями. Выдувая на одной трубке маленький, а на другой большой пузыри и, соединяя обе трубки вместе с помощью резинового шланга, заметим, что маленький пузырь исчезает, увеличивая размеры большого пузыря. Давление в маленьком пузыре всегда больше, чем в большом. То же самое имеет место в случае капелек. Поверхностное натяжение всегда обуславливает большее давление на единицу площади у меньшей капли. Это означает тогда тенденцию для жидкости испаряться с малых капелек, создавая пары, конденсирующиеся на больших капельках. Тенденция эта уже давно была рассчитана Виллиамом Томсоном, и соответствующее уравнение называется уравнением Томсона. Для капелек интересующего нас размера различие в давлении составляет несколько сотых процента.

Позднее мы узнали, что англичане также интересовались этой проблемой и обсуждали такой механизм роста частиц дыма. Они

также старались создать маскирующие дымы и думали о теории, согласно которой малые частицы должны исчезать, давая пары, конденсирующиеся на больших частицах. Используя уравнение Томсона, они нашли, что различие в давлении составляет только одну сотую процента и сказали «Это пренебрежимо мало. Давайте забудем об этом и будем искать другой путь».

К счастью, мы пошли в ином направлении. Мы сказали: «Даже если различие в давлении составляет только одну сотую процента, температура высока, поскольку масло нагрето до точки кипения, и действительное приращение давления может быть непренебрежимым. Так как охлаждение происходит за несколько тысячных секунды, этого времени может оказаться достаточным для того, чтобы более мелкие капельки успели испариться даже при различии давлений всего только в одну сотую процента». Сколько времени требуется при таких условиях для испарения малых частиц, исчезновения их и конденсации их паров на больших частицах? Когда мы проделали расчёт, мы нашли, что для этого требуется только несколько тысячных секунды, что действительно близко ко времени, необходимому для смешения вырывающихся из сопла паров с воздухом. Итак, количественно теория дала результаты, находившиеся в соответствии с нашими первыми наблюдениями.

Мы проделали вычисления для паров масла, вырывающихся из сопла данного размера под давлением, скажем,  $0,7 \text{ ат}$ . Как велики должны быть образующиеся при этом частицы дыма? Мы нашли, что если сопло недостаточно мало, частички окажутся слишком большими. В конце концов мы пришли к заключению, что для получения частиц диаметром  $0,6 \mu$  следует использовать сопло диаметром  $4,8 \text{ мм}$  при давлении паров  $0,7 \text{ ат}$ . Хотя эти расчёты производились ещё до того, как наши опыты продвинулись достаточно далеко, в настоящее время армия использует именно сопло указанного размера.

Теория была усовершенствована, но по существу это была та же теория, которую мы использовали в связи с нашими опытами по получению дымов для исследования противогазовых фильтров.

Работа продвигалась очень быстро. Сперва мы начали с одним соплом под давлением  $0,7 \text{ ат}$ . При этом расходовалось около 40 литров масла в час. Мы изготовили маленький кипятыльник и кипятили смазочное масло при температуре около  $452^\circ \text{C}$ , заставляя его пары выходить через сопло со скоростью, близкой к скорости звука. Мы нашли, что при этом получают чрезвычайно однородные частицы нужных размеров. Это был очень эффективный маскирующий дым.

Один из первых сконструированных нами полевых генераторов показан на рис. 1(B). Он представлял собой небольшое, грубо выполненное устройство, испарявшее 40 литров масла в час. С целью сравнительных испытаний с нашим полевым генератором армия при-

слала нам некоторые из своих дымовых генераторов. В них использовалось частичное сгорание минерального масла, создававшее грязный сажистый дым чёрного цвета. Когда наш генератор был принят армией, она прежде всего аннулировала очень большой заказ на эти дымовые генераторы.

Для полевых испытаний нам был нужен большой ветровой туннель. Мы избрали долину Скогари. Она имеет двадцать километров

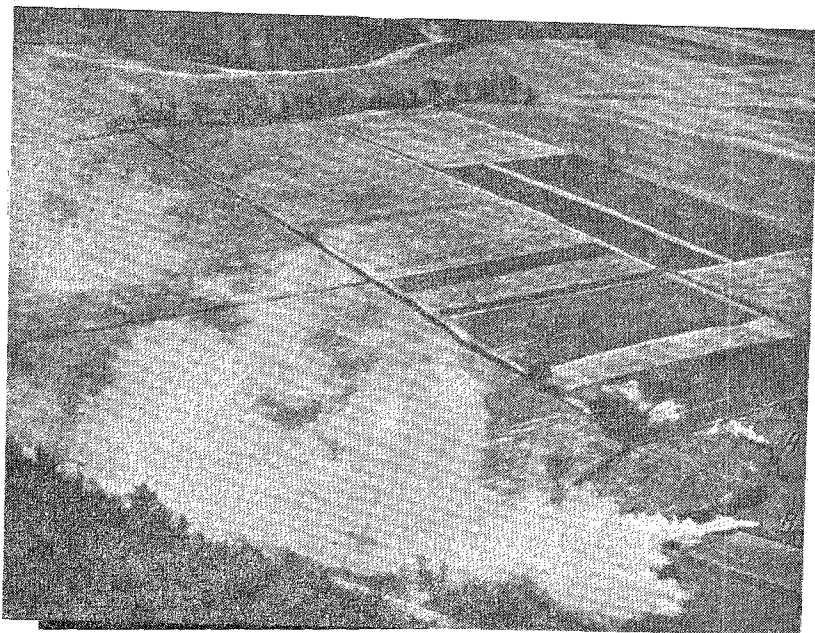


Рис. 1. Сравнение двух дымовых генераторов (долина Скогари, 22 апреля 1947 г.) *A*—армейский дымовой котёл М-1. *B*—дымовой генератор General Electric Research Laboratory. Оба генератора используют одно и то же количество дымообразующей жидкости.

в длину, около двух километров в ширину и ровное дно. С одной стороны её закрывают высокие холмы, до 600 м высотой, с другой стороны — крутые обрывы высотой 200 м, возвышающиеся над долиной как раз там, где долина изгибается, так что с них можно видеть долину в обоих направлениях.

Мы решили создать в этой долине дым и посмотреть, насколько он будет устойчив и как далеко он будет распространяться. На рис. 1 видна линия дыма (*B*), которая тянется через всю фотографию. Она создана нашим генератором, испаряющим 40 л в час. Буквой *A* указан армейский дымовой котёл, который сжигает то же количество масла — 40 л в час.

Когда мы по другой фотографии измерили относительную эффективность обоих генераторов, мы нашли, что область покрытия для нашего генератора, в 400 раз больше, чем для лучшего генератора, имевшегося в распоряжении армии. Недавно я узнал, что при создании маскирующих дымов армия использовала один генератор старой конструкции на каждые 8500 м<sup>2</sup> маскируемой площади. После того как они получили новые генераторы, они стали их устанавливать по

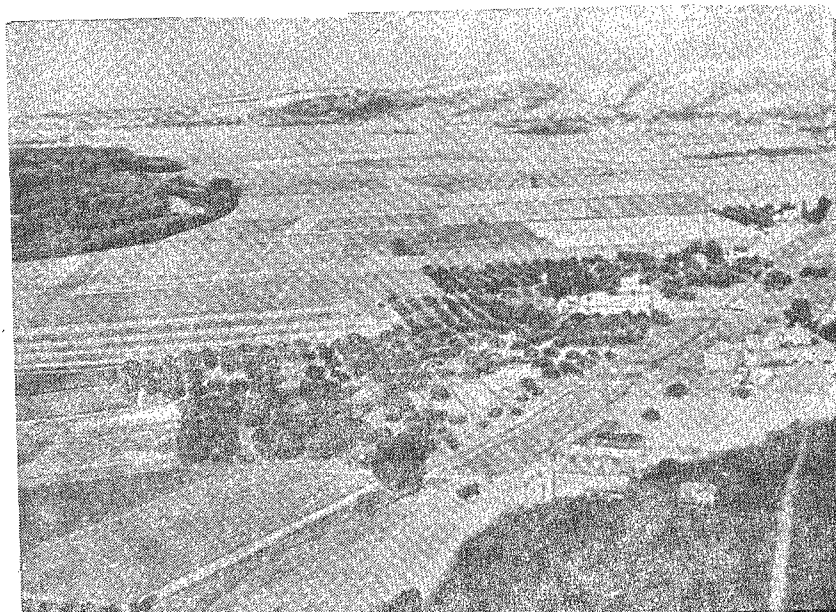


Рис. 2. Долина Скогари.

одному на 3,5 км<sup>2</sup> маскируемой площади, что соответствует увеличению площади, маскируемой одним генератором, примерно в 400 раз — близко к значению, полученному в наших первых измерениях.

Улучшение маскирующей способности является результатом использования частиц подходящего размера и применения мало летучего масла. Эффективность армейского котла зависела главным образом от сажистости продуктов сгорания, ибо используемое масло было столь летучим, что большая часть его испарялась.

Рис. 2 представляет собой фотографию долины Скогари, снятую в юго-западном направлении с вершины обрывов, возвышающихся на 200 м над долиной. Первые испытания велись у подножья холмов, а дальнейшие — с более мощными генераторами, расходовавшими 400 л масла в час, — на участке близ правого верхнего угла фотографии.

Рис. 3 показывает ту же долину, заполненную одним из наших опытных облаков маскировочного дыма. Он даёт наглядное представление о том, что может быть достигнуто с одним генератором в отсутствии сильного ветра.

Значительный интерес представлял день наших заключительных испытаний в присутствии представителей армии и флота. При выяс-



Рис. 3. Фотография сделана с того же места, что и рис. 2, но после того как был пущен в действие дымовой генератор и дым приблизился к точке наблюдения.

нении различных свойств защитного дыма очень многое зависит от погоды. Это было 13 июня 1942 г. Мы прибыли на место испытаний за полчаса до рассвета. Всё обошлось без аварий. Солнце взошло. Небо было безоблачным. Ветер был очень слаб, и за короткое время вся долина заполнилась дымом. После того как мы в течение получаса продолжали дымообразование и вся долина на протяжении 10 или 15 км была окутана дымом, поднялся, как мы и надеялись, ветер и разогнал дым. Нас это очень обрадовало, так как показало, что произойдёт в отсутствии благоприятных условий, когда дым

уносится в небо. Очень важно было выяснить, каким образом должно учитываться влияние ветра при проведении маскировочных операций.



Рис. 4. Большой дымовой генератор, использованный 13 июня 1947 г. (долина Скогари).

На рис. 4 показан большой дымовой генератор, испытанный 13 июня. Как только результаты испытаний нашего малого 40-литрового генератора оказались удовлетворительными, было решено начать расширенную программу. Мы заказали генератор, который испарял 400 литров масла в час при  $450^{\circ}\text{C}$ , причём пары выходили под давлением  $0,7\text{ ат}$  через 10 сопел. После первых же удачных испытаний, проведённых 13 июня, началось массовое производство таких генераторов, продолжавшееся до тех пор, пока не было изготовлено их

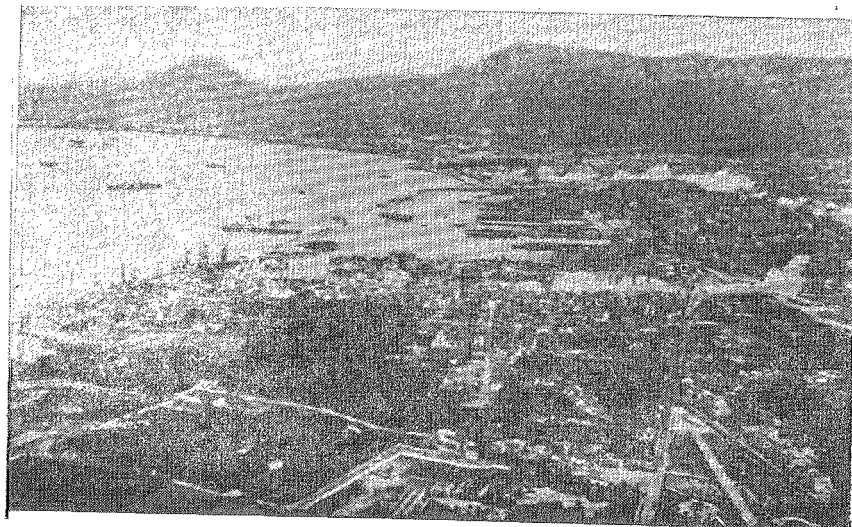


Рис. 5. Гор. Палермо (Сицилия) во время войны, тотчас после включения дымовых генераторов.

много тысяч. Позднее они были использованы в довольно больших масштабах как за морем, так и на Тихом океане. У меня имеется

ряд фотографий, показывающих некоторые из полевых применений таких генераторов.

На рис. 5 приведена фотография города Палермо (Сицилия) в момент, когда дымовые генераторы только что начали работать. На рисунке видно, что генераторы расположены цепью вдоль линии, начинающейся примерно в середине фотографии и идущей направо, а затем налево вверх, огибая центральную часть города. Всего не-



Рис. 6. Тот же вид, что и на рис. 5, несколькими минутами позже, когда дым начал скрывать город.

сколькими минутами позже город выглядел так, как показано на рис. 6. Вся центральная часть города окутана густым дымом. Позднее выяснилось, что защитное действие дыма, создаваемого такими генераторами, оказывается лучше, если дым образуется на некотором расстоянии и приносится к маскируемому объекту ветром уже на некоторой высоте над землёй. Дым тогда располагается не столь низко, чтобы в какой-нибудь мере мешать наземным операциям, но от самолётов земля остаётся полностью закрытой.

Рис. 7 показывает один из генераторов, обслуживающих армию в настоящее время. Генераторы эти более компактны, чем первый; последние образцы ещё меньше.

С тех пор как стали широко использоваться генераторы, испаряющие 400 л масла в час, возникла серьёзная проблема снабжения. Я полагаю, что в общей сложности было израсходовано несколько миллионов литров масла. Канадцы использовали огромное количество таких генераторов в Голландии. Дымовые генераторы этого типа применялись на 120-километровом фронте в течение трёх последовательных дней накануне и во время форсирования Рейна. Тихоокеанский флот сперва не намеревался использовать генераторы. Предполагалось,

что потребности в них не возникнет. Но после того, как японские воздушные атаки оказались очень успешными, было решено воспользоваться дымовыми генераторами и едва они были введены в действие, ни один корабль не был повреждён в результате воздушной атаки.

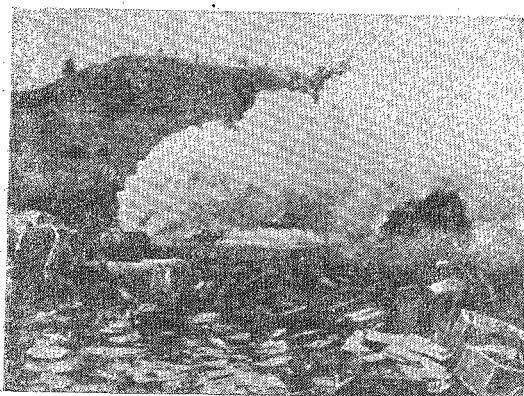


Рис. 7. «Механический» дымовый генератор М-1 на фронте после четырёх часового артиллерийского обстрела немецкой артиллерией.

певают коагулировать. В процессе достижения оптимального размера частицы не имеют шансов прийти в непосредственный контакт друг с другом. Это крайне существенно. Поскольку множество дымовых частиц содержится в ограниченном объёме и выходит через одно сопло, частицы могли бы расти путём слияния друг с другом, достигая много больших размеров, чем это имеет место в действительности, и эффективность дыма была бы много меньшей.

Я хотел бы заметить, что имеется возможность тем же способом производить такое же количество частичек иодистого облака, возникнет в

пользоваться дымовыми генераторами и едва они были введены в действие, ни один корабль не был повреждён в результате воздушной атаки.

Рис. 8 показывает крупным планом дым, вырывающийся под высоким давлением из десяти сопел. Интересно отметить, что, по нашим вычислениям, генератор такого типа создаёт в каждую секунду  $10^{17}$  или 100 квадрильонов дымовых частиц. Он образует их столь быстро и столь быстро выбрасывает их в воздух, что они не ус-

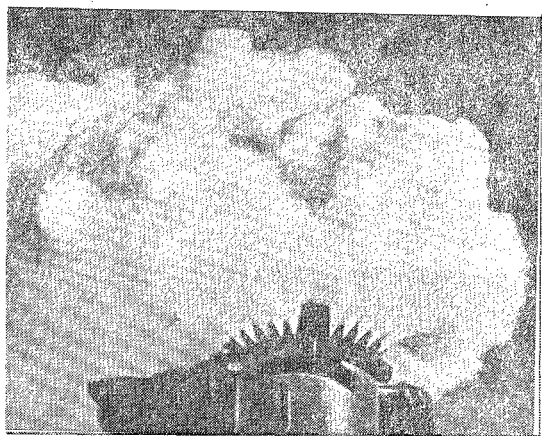


Рис. 8. Десятисопельный «механический» дымовой генератор М-1 снятый крупным планом.

серебра, если, в связи с их влиянием на этом потребность. Имеется возможность

создавать с помощью одного генератора около  $10^{17}$  частиц в секунду.

На рис. 9 показан другой пример дымовой защиты, использованный в боевых условиях. Это понтонный мост через Рейн. Он, очевидно, полностью скрыт от наблюдения с воздуха, в то время как люди продолжают на нём работу. Дым, образуемый генератором, не обладает ни сколько-нибудь заметным запахом, ни токсическим действием.

Как только армия взяла на себя ответственность за дальнейшее усовершенствование и производство генераторов, мы полностью устранились и вплоть до последнего времени ничего не знали об их судьбе.

Совершенно независимо от нашей работы над маскирующими дымами военный министр предложил нам заняться вопросами электростатики выпадения осадков. Это было в 1943 г. Предполагалось, что нападение Японии будет сопровождаться в широких масштабах воздушными атаками через Алеутские острова, через Аляску и с севера. Это вызвало огромное увеличение числа полётов через Алеуты.

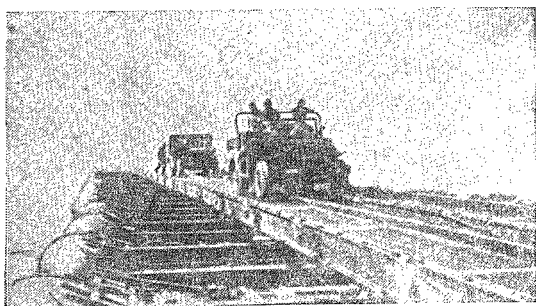


Рис. 9. Переправа через Рейн по понтонному мосту под прикрытием защитного дыма.

Трудности полёта в районе Алеут очень серьёзные. Одной из наибольших трудностей является обледенение самолётов. Однако ещё большим препятствием является полная потеря радиосвязи, когда самолёты попадают в снежные штормы. На Аляске самолёты, попавшие в шторм, заряжаются порой до 250 000 V и более. Это электрическое поле образует коронный разряд со всех частей самолёта, создающий такие электрические помехи, что использовать радиоаппаратуру для связи становится невозможным. Кроме того, серьёзные затруднения испытываются пилотами при отыскании их баз и посадке в туманную погоду.

У нас не было по этому вопросу никаких специальных соображений, не считая того, что в этом виновата погода. Мы полагали, что для исследований подобного рода не может быть лучшего места, чем гора Вашингтона в зимнее время. Гора Вашингтона имеет зимой удивительный климат. Средняя температура около  $-20^{\circ}$  C. Скорость ветра в среднем составляет около 110 км в час, днём и ночью, и большую часть времени с этой высокой скоростью над вершиной проносятся облака.

Нам казалось, что всё, что нам надлежит сделать с этим несущимся снегом — это взять различного рода поверхности, типа алюминия, взять различные покрытия для этих поверхностей, выставить их на несущийся снег и затем в благоустроенной лаборатории обсерватории на горе Вашингтона с хорошей аппаратурой и т. п. измерить величину электрических зарядов, которые образуются от ударов снега о выставленные поверхности.

Мы заблаговременно, до того как в середине октября закрылась дорога, отправили на обсерваторию большое количество оборудования. Затем несколько раз в течение зимы Шефер отправлялся туда проводить опыты во время штормов. Полученные результаты нас очень разочаровали. К нашему большому удивлению мы нашли, что какие бы поверхности мы ни выставляли на вершине горы Вашингтона в течение всей зимы, когда только там были облака, а они были там почти всё время, поверхности немедленно начинали покрываться льдом. Это говорило о присутствии капелек переохлаждённой воды. Мы слышали об инее, мы его видели, но мы не знали, что в местах, подобных вершине горы Вашингтона, он встречается постоянно. Очень немногие зимние дни обходились без инея. Это очень изумило нас.

Далее, по сообщениям пилотов, самолёты очень мало обледеневают или совсем не обледеневают во время снегопада. Известно, что когда воздух имеет температуру выше точки замерзания, лёд плавится, а когда температура воздуха ниже точки замерзания, то предполагается, что содержащаяся в нём жидкая вода замерзает. Это означает, что лёд более устойчив, чем вода. Едва вода приходит в контакт со льдом при температуре ниже точки замерзания, вода обращается в лёд. Следовательно, давление паров надо льдом ниже, чем над водой. Лёд имеет меньшую тенденцию к испарению, чем вода. Если вы имеете облако, содержащее водяные капельки, которые ещё не замёрзли, хотя температура ниже точки замерзания, давление паров над капельками будет выше, чем надо льдом. Это не необычно, и я ещё вернусь к этому.

Я выполнил много работ по испарению частичек согласно теории испарения, определяя, как много времени требуется более мелкой частице, чтобы испариться и сконденсироваться на более крупной. Когда вы обращаетесь к различию между льдом и водой, различие в давлении паров составляет 20% вместо нескольких тысячных процента в случае наших защитных дымов, о которых я упоминал ранее. Это в сотни или тысячи раз больше, чем в других случаях. Поэтому темп исчезновения водяных капелек в присутствии снега должен быть действительно очень большим.

Однако это предел. Возьмём некоторую массу воздуха и поднимем её достаточно быстро в облако — всякий раз, когда воздух поднимается в атмосфере, его давление падает. Это падение давления вызывает падение температуры вследствие расширения воздуха. Если

воздух сух, охлаждение составляет около  $1^{\circ}\text{C}$  на каждые 100 м подъёма. Если воздух содержит туман, следует учесть количество выпавшей влаги, ибо при конденсации влаги образуется некоторое количество тепла. Поэтому падение температуры с высотой будет меньше чем  $1^{\circ}$  на каждые 100 м. Когда облако растёт, водяные пары конденсируются всё время и имеют склонность к диффузии на снежные хлопья. Возникает вопрос — будет ли давление паров достаточно велико, чтобы возрасти на 10 или 20%, необходимых для образования водяных капель?

Если скорость подъёма делается достаточно большой, то водяные капли могут образовываться. Мы проделали некоторые вычисления и сравнили их с условиями, наблюдаемыми на горе Вашингтона. Если горизонтальная компонента скорости ветра составляет 110 км в час и если склоны горы образуют с горизонтом угол  $30^{\circ}$ , то вертикальная компонента скорости будет около 50 км в час, что является довольно высокой вертикальной скоростью. При вертикальной скорости 50 км/час охлаждение воздуха происходит столь быстро, что выпадающая влага не успевает сконденсироваться на снежных кристаллах и образует переохлаждённые водяные капли. Когда подобные облака приходят в соприкосновение с твёрдыми поверхностями, оседающие на поверхностях жидкие капельки немедленно замерзают, покрывая поверхность слоем льда. Именно так образуется обледенение самолётных крыльев.

Эта проблема нас настолько заинтересовала, что мы занялись её изучением. У нас оказалось много сотрудников из числа персонала обсерватории на горе Вашингтона. Они уже работали над вопросами обледенения и выпадения инея. На обсерваторской башне они выставляли цилиндры и проволоки различных диаметров и измеряли темп оседания на них льда, когда эти объекты находились в проходящих облаках. Цилиндры экспонировались в течение 15 минут, медленно вращаясь, для того чтобы лёд не отлагался только с одной стороны. Потом измерялась толщина и вес отложившегося льда, и цилиндры вновь выставлялись в облако и вращались ещё 10 или 15 минут, причём измерялась скорость ветра. Таким образом, определялось количество льда, накопившегося за определённый интервал времени. Они пытались интерпретировать свои данные и вычислять из них содержание переохлаждённой воды в воздухе и размеры жидких частиц. Было получено много ценных результатов относительно содержания переохлаждённой воды в воздухе, однако определения размеров частиц слишком сильно зависели от некоторых фотографических измерений, которые они делали с предметным стеклом, выставленным в проходящие облака. В действительности, прежде чем производилось фотографирование, происходило слияние капелек. Сотрудники обсерватории не отдавали себе отчёта в том, что сфотографированные капельки не являются первичными, но образовались путём слияния маленьких капелек в большие.

Я узнал, что немцы, а позднее англичане работали над теорией осаждения на вращающихся цилиндрах льда из водяных капелек. Проблема состояла в определении траекторий капелек.

Представьте себе цилиндр, находящийся в воздушном потоке. Воздух не пройдёт сквозь цилиндр, а обогнёт его. Он будет обтекать цилиндр так же, как ветер обтекает крыло самолёта. Поверхностное трение невелико. Скорость воздушной струи будет наибольшей близ поверхности цилиндра. Если скорость ветра невелика и велики размеры объекта, то частицы движутся вместе с воздухом, огибая цилиндр. Большие частицы тумана могут оказаться не в состоянии следовать этой искривлённой траектории. Частицы будут вести себя как артиллерийские снаряды. Если частицы достаточно велики, эффективность их собирания может достигнуть 100%. Это означает, что цилиндр будет собирать всю влагу в объёме воздуха, равном площади проекции цилиндра, умноженной на скорость воздушной струи.

Если теперь, напротив, частицы малы или скорость ветра низка, или цилиндр велик, многие частицы будут огибать цилиндр вместе с воздушной струёй, и эффективность собирания льда будет низка.

Для того чтобы определить эффективность, необходимо сделать некоторые вычисления, совершенно подобные тем, которые делают артиллеристы, вычисляя траекторию 16-дюймового снаряда при наличии ветра, имеющего тенденцию отнести снаряд в сторону. Это довольно трудоёмкие вычисления.

В оригинальных работах вычисления были сделаны применительно к не столь большим скоростям ветра, как те, которые господствуют на горе Вашингтона. Нам пришлось расширить эти вычисления. С этой целью мы использовали дифференциальный анализатор, созданный несколькими годами ранее для того, чтобы сделать подобные вычисления несравненно более лёгкими. Нам пришлось работать с этой машиной около трёх недель, вычисляя траектории частиц, минующих цилиндры и объекты различных очертаний. В результате мы могли вычислить процент воды, который должен осесть на цилиндре в специфических условиях. Мы намеревались использовать данные для горы Вашингтона и таким образом вычислить диаметры и число частиц, образующих облако. Теория оказалась в прекрасном согласии с опытом. Мы могли брать цилиндры различных размеров и получать значения, которые замечательно согласовались между собой. Мы почувствовали, что получили весьма удовлетворительный метод для изучения структуры облаков и причин, заставляющих расти образующие их частицы.

У основания облака на горе Вашингтона происходит непрерывное поднятие воздуха в облако. Это обусловлено формой горы. Внизу, в долине, воздух прозрачен, но так как воздух поднимается, он становится всё холоднее и холоднее и, наконец, когда достигает точки

росы, в нём образуются капельки воды. В каждом кубическом сантиметре возникают тысячи мельчайших частичек, образующих облако.

Чем определяются их размеры? «Хорошо, — я подумал, — разве это не то же самое, что в дымовом генераторе? Я вернусь назад, к той самой теории испарения-конденсации, которую я использовал для вычисления темпа роста дымовых частиц».

Я нашёл, что частицы должны уменьшаться в числе и возрастать в размерах в зависимости от скорости ветра и содержания жидкой воды. Мы получили значения для диаметров капелек, которые очень хорошо согласовались с действительно наблюдаемыми. В самом деле, два ряда значений дали коэффициент корреляции 0,94, что для метеорологических проблем предельно высоко.

Мы почувствовали тогда, что имеем фундаментальную теорию для некоторых из факторов, обуславливающих рост частиц в облаках до тех размеров, которые они имеют в действительности.

Однако условия горы Вашингтона весьма запутаны. Ветер дует над неровной поверхностью горы, создающей турбулентность и осложняющей структуру ветра. Было бы значительно лучше изучать рост частиц в облаке во время полётов на аэроплане, исключая то обстоятельство, что было бы необходимо придумать новый прибор для измерения вертикальной скорости ветра.

Шефер и я много размышляли над прибором, который можно было бы сконструировать и поставить на самолёт, чтобы получить все необходимые данные в единичном полёте сквозь облака. Мы хотели бы измерить, как много воды содержится в облаке? Как велики частицы, образующие его, и как они распределены по размерам? Каковы вертикальные скорости ветра? Сколько времени потребовалось, чтобы воздух достиг основания облака? Как быстро он поднялся внутрь облака?

Таковы были сведения, которые мы хотели получить. Это означало акселерометр или что-нибудь подобное для измерения воздушных возмущений. Получение таких данных — это огромная работа.

Война подходила к концу, и у нас кончались армейские контракты. Я не видел, почему Джeneral Электрик Компани должна интересоваться метеорологическими работами. Однако, казалось, что, продолжая их, мы сумеем понять много существенного в отношении облаков. Мы поставили вопрос перед военным ведомством, полагая, что кто-нибудь, может быть, предоставит самолёт для опытов подобного рода. Дело продвигалось не очень быстро. Мы продолжали исследование в значительной мере самостоятельно, используя приборы на горе Вашингтона, но мы не использовали самолётов.

Нас чрезвычайно поражала относительная редкость в течение зимы на горе Вашингтона и в других местах облаков, которые содержали бы кристаллы льда или снега. Обычно по виду облаков нельзя судить, выше или ниже точки замерзания их температура. Облака не отличаются по внешности. Если же облака содержат снег, они

выглядят иначе. Мы выяснили, что существуют заметные различия в виде облаков. Диск солнца, если его рассматривать через снежное облако, кажется размытым (fuzzy). Если облака содержат водяные капельки, диск солнца никогда не размывается. Мы создавали дымы с частицами самых различных размеров, но если смотреть сквозь дым, то края солнца кажутся совершенно резкими.

Вы могли, наблюдая луну, заметить, что временами видимый диск столь велик, что трудно определить его размеры. Это явление обусловлено перистыми облаками. Существует и много других явлений, характеризующих снежные облака.

Больше всего наше внимание привлекло то обстоятельство, что если в облаке имеются снежные кристаллы, то они должны расти и выпадать. В зимнее время вы увидите слоистые облака, из которых не выпадает снега, даже если температура в облаке ниже точки замерзания. Это просто означает именно то, что в облаке отсутствуют кристаллы в сколько-нибудь заметном количестве. Такие облака состоят из водяных капелек. Они могут быть переохлаждены до чрезвычайно низкой температуры.

Мы полагали, что эту проблему следует изучить. Почему получается так, что в некоторых случаях снег образуется очень легко, не испытывая, повидимому, недостатка в ледяных ядрах, на которых могли бы расти кристаллики, а в других случаях этого не происходит? В атмосфере должно происходить что-то, заставляющее капельки превращаться в лёд только в определённое время и при определённых условиях. Шефер и я пришли к выводу, что следует произвести тщательные лабораторные опыты и постараться воспроизвести эти условия. Я уехал тогда на три или четыре месяца в Калифорнию и когда вернулся, то нашёл, что Шефер проделал замечательные опыты. Он взял домашний холодильник, употребляемый для хранения пищи, объёмом около  $0,4 \text{ м}^3$ , отделал его изнутри чёрным бархатом и направил внутрь него луч света с тем, чтобы можно было видеть, что происходит в камере. Затем он подышал внутрь камеры, и хотя температура была около  $-23^\circ \text{C}$  влага сконденсировалась в виде частичек тумана, вполне подобных обычным облачным частичкам. Никаких ледяных кристалликов не образовалось. С целью вызвать кристаллизацию он распылял внутри ящика различные вещества, но практически никогда не добивался кристаллизации. Получалось достаточное количество кристалликов, чтобы убедиться, что если они получаются, то их легко можно увидеть. Однако число их было совершенно ничтожным. Наконец, однажды температура в камере была недостаточно низкой. Желая понизить её, он принёс большой кусок сухого льда и положил его в камеру. Тотчас же воздух заполнился ледяными кристалликами, миллионами кристалликов.

Тогда он вынул сухой лёд и, несмотря на это, кристаллики сохранились. Затем он нашёл, что даже мельчайший кусочек сухого льда вызывает заполнение всего объёма камеры кристалликами. По-

том он взял иголку, охладил её жидким воздухом и провёл ею поперёк камеры. В результате опять образовались сотни миллионов ледяных кристалликов — путём только кратковременного контакта с иголкой. Эффект быстро распространился по всей камере. Это удивительный опыт. Его следует посмотреть. Прodelать его очень легко и он должен прodelываться в каждой высшей школе. Одна студентка сделала камеру из бака для кипячения белья, охладив его рассолом. Наблюдаемый эффект поразителен и простым способом воспроизводит все естественные условия, имеющие место в действительных облаках на небе.

Итак, это открытие изменило всю ситуацию. Первое, что было обнаружено, это то, что сухой лёд не оказывает никакого непосредственного влияния на переохлаждённое облако; существенна только его температура. Иголка, вместо того чтобы быть охлаждённой жидким воздухом, может охлаждаться сухим льдом. Вместо сухого льда может быть использовано любое тело, охлаждённое до температуры, меньшей —  $40^{\circ}\text{C}$ .

Наконец, дальнейшее исследование показало, что имеется критическая температура, около —  $39^{\circ}$  (температура замерзания ртути), при которой происходит спонтанное образование естественных ядер. Это можно очень убедительно показать, если закрыть камеру стеклом, охладить её до —  $40^{\circ}\text{C}$  и осуществить непрерывную подачу в неё влаги путём испарения льда. Ледяные кристаллики непрерывно выделяются и оседают на дно.

Если, напротив, охладить камеру до —  $20^{\circ}\text{C}$  и впустить в неё воздух из лаборатории, порой можно обнаружить незначительное количество кристалликов, но если ящик закрыть, то они вырастут и выпадут, дальнейшее же образование кристалликов прекратится, пока вы не впустите внутрь камеры некоторого количества нового воздуха.

Немного позднее Воннегут в нашей лаборатории проанализировал опубликованные данные о кристаллических формах ряда других веществ и нашёл, что иодистое серебро имеет почти в точности ту же самую кристаллическую форму, что и лёд, и что оно может служить в качестве ядер для роста ледяных кристаллов.

Вы можете прodelать этот опыт. Возьмите серебряную монету и, держа её в руках, внесите в высокочастотную искру от трансформатора Тесла. В момент, когда монета находится в искре, дуньте на неё сверху вниз в открытую сверху и заполненную холодным воздухом камеру. Затем, многовение спустя, откройте баночку иода и вдуньте в ящик немного его паров. Вскоре вы обнаружите, что воздух в камере заполняется ледяными кристалликами, отстоящими друг от друга менее чем на миллиметр. Это означает, что от частичек иодистого серебра, которые образовались путём испарения серебряной монеты в тот момент, когда вы держали её в руках, в 100 л воздуха возникает около 100 миллионов снежных кристалликов.

Электронно-микроскопическое исследование этих частиц показывает, что из одного грамма иодистого серебра может быть получено около  $10^{17}$  ядер. Следовательно, нескольких килограммов иодистого серебра было бы достаточно, чтобы снабдить ядрами воздух над всей территорией США одновременно, причем в каждом кубическом сантиметре будет содержаться одна частичка, что значительно больше, чем число ядер, обычно содержащихся в воздухе в естественных условиях.

Тот дымовой генератор, о котором я говорил уже ранее, может создавать  $10^{17}$  дымовых частиц в секунду. Если дым иодистого серебра получать этим путём, то материал стоил бы пять долларов в час. Более трудной является проблема обеспечения должного распространения частиц. Если частички в естественных условиях сохраняют активность, которую они имеют в лабораторных опытах, то широкое распространение их в атмосфере может оказать существенное влияние на климат.

Таблица I показывает зависимость между температурой и давлением паров. Во второй и третьей колонках приведены значения  $e_v$  и

Таблица I

Давление паров над поверхностью воды и льда и критические диаметры ледяных ядер в функции температуры

Температура в градусах С	$e_v$ в милли- барах	$e_c$ в милли- барах	$e_v - e_c$ в милли- барах	$\frac{e_v - e_c}{e_v}$	Критический диаметр в $10^{-6}$ см
0	6,11	6,11	0	0	$\infty$
-1	5,27	5,17	0,10	0,019	7,8
-5	4,19	3,99	0,20	0,048	3,10
-10	2,86	2,60	0,26	0,091	1,68
-15	1,89	1,64	0,25	0,133	1,18
-20	1,25	1,03	0,22	0,174	0,93
-30	0,51	0,38	0,13	0,256	0,67
-40	0,19	0,13	0,064	0,332	0,56

$e_c$  — равновесных давлений паров над поверхностью воды и льда или снега соответственно. Следующая колонка содержит разность между давлением паров воды и льда. Она достигает максимума в 0,28 миллибара при  $-12^\circ\text{C}$ . В предпоследней колонке выписаны те же разности давлений паров воды и льда, выраженные в долях давления паров воды. Так, при  $-40^\circ\text{C}$  давление паров воды на 33% выше, чем для льда.

Последняя колонка показывает, как велики должны быть ледяные кристаллики для того, чтобы они могли расти. Очень маленькие ледяные частички имеют более высокое давление паров, чем крупные ледяные кристаллы, и если их диаметр меньше указанного в таблице

критического диаметра, то давление паров над их поверхностью больше, чем над поверхностью воды. Поэтому кристаллики льда, размеры которых меньше критических, не в состоянии расти даже в облаке переохлаждённых водяных капелек. Ясно, однако, что в переохлаждённом облаке при температуре ниже  $-5^{\circ}\text{C}$  все ледяные частички (ядра), диаметр которых больше чем  $3 \cdot 10^{-6}$  см, должны расти.

Таблица II  
Падение шариков  $\text{CO}_2$  в воздухе при  $-20^{\circ}\text{C}$

Диаметр шарика в см	Скорость падения в см/сек	Время падения до испарения всего шарика в сек.	Расстояние,ходимое шариком до его полного испарения в м
1	2120	350	4300
0,4	1420	127	1130
0,2	950	59	330
0,10	564	26	82
0,04	233	8	10
0,02	105	3	1,6
0,01	41	1	0,3

В таблице II приведены данные о падении шариков из сухого льда в воздухе и расстояния, которые проходят шарики различных диаметров при падении, прежде чем успевают полностью испариться.

Так, падающая частица диаметром 0,4 см, прежде чем испариться, пройдёт расстояние 1000 м. Этот расчёт даёт некоторое представление о размерах частиц, которые необходимы для того, чтобы использовать их, бросая сквозь облака.

Используя принципы, развитые в течение наших исследований роста дымовых частиц и образования инея, я смог вычислить количество воды, которое конденсируется из паров путём контакта с падающим шариком сухого льда. Результаты приведены во второй колонке таблицы III. Четвёртая колонка даёт объём воздуха, охлаждаемого за 1 секунду до температуры, меньшей  $-40^{\circ}\text{C}$ ; в этом объёме спонтанно образуются ледяные кристаллики. Концентрация образующихся ядер вначале столь велика, что даже в течение короткого времени контакта с падающим шариком частицы вырастают вследствие коагуляции, создавая концентрации, указанные в третьей колонке.

Из этих данных можно вычислить диаметр (пятая колонка) и полное число (шестая колонка) образующихся ядер. Опыты показали, что расчёт очень точен. Большинство мельчайших частиц сухого льда, бросаемых в шеферовскую холодильную камеру, создавало сотни миллионов ледяных кристалликов.

13 ноября 1946 г. Шефер сбросил с самолёта в переохлаждённое слоисто-кучевое (StCu) облако около 3 кг гранулированного сухого

Таблица III  
Количество и размеры ледяных ядер, создаваемых в облаке падением шарика твердой углекислоты при температуре облака  $-20^{\circ}\text{C}$

Диаметр шарика в см	Полный вес воды, конденсируемой в объёме, охлаждаемом падающей частицей, в мг	Концентрация ядер в 1 см <sup>3</sup>	Объём воздуха, охлаждаемого падающей частицей в 1 секунду, в см <sup>3</sup>	Диаметр образующихся ядер в 10 <sup>-6</sup> см	Полное количество ядер, образующихся при падении частицы
1	960	$3 \cdot 10^{13}$	70	2,9	$1,7 \cdot 10^{17}$
0,4	61	$5 \cdot 10^{13}$	18	2,2	$2,6 \cdot 10^{16}$
0,2	7	$7 \cdot 10^{13}$	6	1,9	$6 \cdot 10^{15}$
0,1	1,0	$8 \cdot 10^{13}$	2,2	1,6	$1 \cdot 10^{15}$
0,04	0,06	$8 \cdot 10^{13}$	0,5	1,4	$1,2 \cdot 10^{14}$
0,02	0,007	$7 \cdot 10^{13}$	0,2	1,4	$5 \cdot 10^{13}$
0,01	0,001	$56 \cdot 10^{13}$	0,1	0,6	$2 \cdot 10^{13}$

льда, из расчёта примерно 400 г на 1 км. Затем он пролетел назад, наблюдая результаты, оказавшиеся крайне поразительными. Всё переохлаждённое облако превратилось в мельчайшие ледяные кристаллики. С этого времени мы

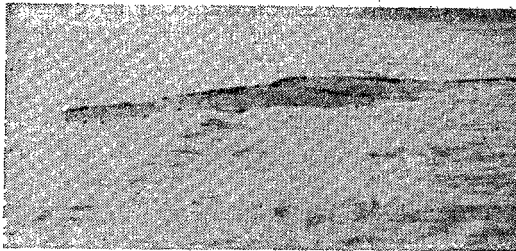


Рис. 10. Часть L-образного пробного засева слоистых облаков, произведённого в 4 часа 39 минут после полудня. Самолёт находился на высоте 3400 м в 5 часов 04 минуты после полудня (7 апреля 1947 г.).

заклучили контракт с корпусом связи. Работа (Cirtus Project) проводится корпусом связи и флотом в сотрудничестве с военно-воздушными силами. Операции выполняются экспериментальной группой, состоящей целиком из военнослужащих.

Рис. 10 показывает результаты испытаний, проделанных 7 апреля 1947 г.; во время которых слоистые облака были засеяны сухим льдом. Вершина облака находилась примерно на высоте 2000 м. Слой облаков имел толщину около 1200 м. Фотография получена с высоты примерно 1400 м над вершиной облака.

Длинная тёмная полоса, видимая на фотографии, — это только часть засеянной области, имевшей сколо 22 км в длину и 5,5 км в ширину. Засеянная область состоит из снежных кристаллов, тогда как окружающее облако образовано переохлаждёнными капельками.

Засеянная область кажется тёмной на белом фоне незасеянных облаков. Ледяные кристаллы и капельки воды различным образом

рассеивают лучи света. С некоторых направлений облака ледяных кристаллов выглядят темнее, чем переохлаждённые облака, но с других направлений относительно солнца они светлее переохлаждённых облаков.

Рис. 11 показывает ту же область, снятую несколько раньше с другого направления. Линия засева имела форму буквы *L*, каждая сторона которой простиралась примерно на 11 км, в длину. На фотографии она выглядит, как белая река.



Интересная фотография приведена на рис. 12. В засеянной области видно прямое зеркальное отражение солнца. Это характерно для ледяных кристаллов, имеющих форму гексагональных пластинок. Они имеют тенденцию падать в горизонтальном положении, и если развернуть самолёт так, что солнце окажется

Рис 11. Тот же самый L-образный засев, снятый в 4 часа 54 минуты после полудня с высоты 2800 м.

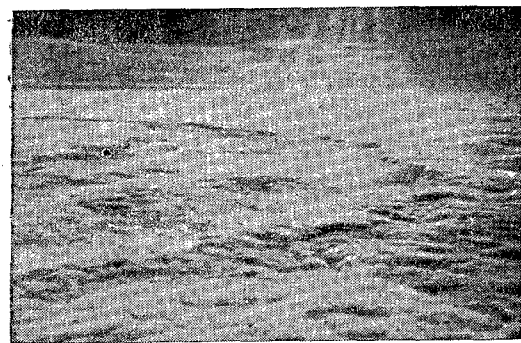


Рис. 12. Фотография L-образного засева, снятая в 5 часов 16 минут после полудня с высоты 3600 м в направлении на солнце.

в соответствующем направлении, то высокая интенсивность отражения будет определяться тем фактом, что вы смотрите сверху на эти маленькие плоские кристаллики, плавающие горизонтально. Наличие такой «солнечной колонны» под солнцем является решающим доказательством образования ледяных кристаллов. Она никогда не появляется в переохлаждённых облаках.

Нам не встретилось ни одного случая, когда обычное облако с температурой ниже точки замерзания нельзя было превратить в облако ледяных кристаллов путём засева его сухим льдом.

Рис. 13 показывает размеры засеянной области в километрах. Эта область охватывает площадь, близкую по размерам к озеру

Джорджа в Нью-Йорке. Временами поражённые области достигали размеров острова Манхеттен. Мы сознательно засевали излучающую площадь, чтобы она была не слишком велика для фотографирования.

Этой зимой мы надеемся произвести опыты с пятью самолётами. Когда я сказал «мы», я подразумевал экспериментальную группу, контролирующую эти самолёты.

Мы не проводили широких исследований на этом типе слоистых облаков. Из результатов, полученных нами, совершенно очевидно, что с помощью одного самолёта может быть засеяно и превращено в ледяные кристаллики примерно  $1700 \text{ км}^2$  слоистых облаков за 1 час полёта. До настоящего времени мы не предприняли ни одного опыта столь большого масштаба, ибо было бы трудно проследить изменения, происходящие в области площадью  $1700 \text{ км}^2$ .

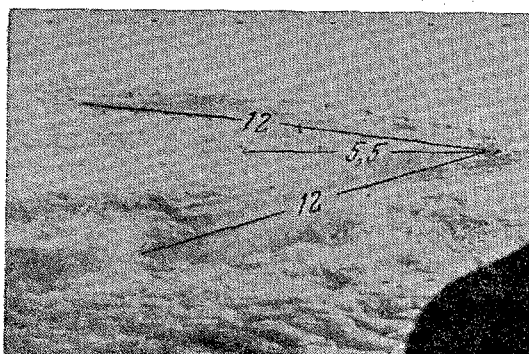


Рис. 13. L-образный засев, снятый в 5 часов 24 минуты после полудня с высоты 4500 м. Указаны действительные размеры засеянной площади в км, вычисленные из углов, измеренных на фотографии.

Этой зимой, вероятно на побережье, может быть на Аляске, мы надеемся провести опыты в очень больших масштабах, чтобы выяснить, окажется ли возможным полностью устранить условия обледенения самолётов на большой площади путём превращения всех переохлаждённых водяных капелек в этой области в ледяные кристаллики, не представляющие уже никакой опасности с точки зрения обледенения.

Во время некоторых из полётов, произведённых минувшей зимой, можно было наблюдать с земли, что через 10—15 минут после засева появлялось большое пространство, свободное от облаков. Я видел однажды в Скенектеди целых  $350 \text{ км}^2$  ясного неба, тогда как ни перед засевом, ни после него в облаках не было никаких просветов, исключая эту единственную область, около 40 км в длину и 9 км в ширину, двигавшуюся вместе со всем образованием к горам; на границах просвета можно было наблюдать падающий снег.

Результат этот очень интересен, хотя и трудно поддаётся фотографированию. Производился также засев кучевых облаков (Cu). Мы разрабатывали технику, тренировали персонал и занимались, по существу, организационными вопросами для обеспечения эффективной работы

этой зимой. Удивительно, что в течение июля и августа, несмотря на то, что вообще было крайне мало дождей, было поразительное число дней, когда можно было наблюдать несколько очень больших кучевых облаков, имевших нижнюю границу на высоте около 1500 м или выше и не дававших никакого дождя. Облака эти выглядели, как грозовые, но они не развивались до этой стадии. Часто они простирались до высоты 7500—9000 м и даже более. Такой высоты они достигали не всегда, но довольно часто. Основное, что наблюдается при засевах таких облаков — это то, что всё происходит очень быстро.

Вершина облака может быть охлаждена ниже точки замерзания всего только на протяжении около 2,5 км. Уровень замерзания может располагаться около 5,5 км и вершина облака — около 8 км. Когда вершина такого облака засеивается сухим льдом, то наблюдаемый результат часто оказывается по меньшей мере необычным.

Однажды мне пришлось ехать на автомобиле под облаком, которое в это время засеивалось. За всю мою жизнь я никогда не видел такого тяжёлого дождя. Я попал под ливень примерно на 15 минут. Ветер был столь силен, что казалось он хочет выкорчевать деревья. И, действительно, несколько деревьев было снесено. К счастью, он не нанёс ущерба. Мы отъехали к краю дороги, ибо не знали, что ещё может случиться. Затем начался небольшой град — мелкие кусочки диаметром около сантиметра, затем дождь. Обычно первым приходит град, но здесь первым был дождь, продолжавшийся в течение пяти или десяти минут и лишь после этого немного града.

Я понемногу тронулся в путь и проехал менее километра. Дождь прекратился. Я вышел из машины и огляделся. Дорога была суха. Здесь вообще не было дождя. Мы полагали, что гроза должна пойти в нашу сторону, на восток. Но эта гроза не пошла на восток. Она просто окончилась. Полностью. К этому времени, через пять минут после прекращения дождя, дождя не было видно нигде. Итак, это совсем необычный тип грозы.

Другие люди проделывали то же в другой части страны, и совпадение результатов было совсем поразительным. Сообщения отмечали, что наибольший эффект получался через десять или пятнадцать минут. Дождь обычно достигал наибольшей силы на пятнадцатой — двадцатой минуте и кончался немногим позже получаса. В нескольких случаях они вызывали длительный дождь, продолжавшийся несколько часов и дававший до 2 см и больше осадка. Осадок в 2 см, видимо, очень обычен для дождя над ограниченной областью. Это близко примерно к тому, что можно ожидать из содержания воды в таком облаке.

Иными словами, повидимому, за короткое время оседала большая часть влаги, содержащейся в облаке. Для меня было крайне интересно узнать, каким образом такие вещи могут происходить столь быстро, каким образом так быстро мог пойти дождь. Влияние сухого

льда состоит в охлаждении небольшого объёма воздуха до  $-40^{\circ}\text{C}$ , вследствие чего образуется огромное количество ледяных кристалликов, которые затем растут, пока не используют всю содержащуюся в облаке влагу. Чем больше кристаллов заключается в данном объёме облака, тем меньше размеры образующихся на них снежинок. Близ границ засеянной области ледяных кристалликов образуется несколько меньше, они вырастают до больших размеров и быстрее выпадают. Напротив, введение в облако избыточного количества ледяных кристалликов приводит к тому, что выпадает мелкий дождь — это заключительный дождь. Избыточные кристаллики в основном будут просачиваться через облако без того, чтобы что-то образовывалось вновь.

В действительности, вопрос заключается в том, что снежная буря продолжается длительное время, хотя вначале в воздухе присутствует лишь незначительное количество ледяных ядер. Должен существовать некоторый процесс, при котором образуются новые ядра или ледяные кристаллы, обуславливающие развитие цепного процесса. Цепной процесс — это когда вы начинаете с одной снежинки, и с помощью некоторого механизма их становится две. Тогда эти две превратятся в четыре, восемь и т. д., процесс распространяется очень быстро, в точности тем же путём, как в стоге сена, если вы зажжёте его спичкой. Он загорится. Нет никакой разницы — зажигается ли он в трёх местах или в одном месте. Пламя распространится по всему стогу. Тепла, создаваемого при сгорании одной частички сена, достаточно, чтобы нагреть следующую частичку.

То же и со снежинками. Пока я не знаю, но подозреваю, что цепным процессом, идущим в естественном шторме, является разламывание кристаллов. Мы пытались исследовать это явление и мы полагаем, что электрические явления имеют место позднее, чем стимулирующий процесс. Мы можем с помощью электричества стимулировать рост ледяных кристаллов после того, как они созданы, но мы не можем инициировать их. Мы можем пропустить через нашу камеру мощный электрический разряд, но никогда не образуется ни одного кристалла из переохлаждённой воды. Если мы введём в холодильный шкаф с переохлаждённым облаком сухой лёд и приложим сильное электрическое поле, то ледяные кристаллы вырастут в длинные иглы или волокна, которые при достаточно сильном поле разламываются на пары сильно заряженных обломков. Поэтому мы думаем, что электрические эффекты играют роль, но только на более поздней стадии.

Итак, это цепной процесс, который мы в состоянии осуществить в зимние метели с помощью сухого льда, если мы засеём имеющую достаточный запас влаги метель, которая растёт естественным образом. Мы старались избегать этого в населённых районах. Мы не хотели вызвать шторма, который мог бы причинить значительные убытки. Крайне важно выяснить, возможны ли эти вещи и тщательно изучить, как получать наилучшие результаты.

Недавно имел место крайне интересный полёт Л. Б. Леопольда и М. Х. Хельмстеда над Гавайями, во время которого сухим льдом засеивались облака при температуре  $+10^{\circ}\text{C}$ , в результате чего возник дождь. Облака начали расти вверх с высоты 2,5 км и, достигнув высоты 4,5 км, поднялись над уровнем замерзания, после чего они были повторно засеяны большим количеством сухого льда. Облака выросли до высоты 8000 м, стали дождить, разрослись, пересекли море, прошли от острова к острову и дождили всю ночь.

Результат этого опыта заставил меня сильно задуматься, ибо я интересовался образованием дождя ещё с 1944 г., когда начал развивать математическую теорию роста частиц в облаках.

У кучевых облаков, засеивавшихся этим летом, над уровнем замерзания находилась только вершина. Снег, который образовывался в этой вершине, падал вниз, таял и превращался в капельки воды, которые затем собирали всю воду, содержащуюся в облаке, и разрушали облако всего за 15 или 20 минут. Стало быть, нечто происходит во всём облаке, а не только в его вершине. У меня возникла мысль, что это должен быть цепной процесс.

Я стал размышлять над этим вопросом. Мною были проделаны все математические расчёты, но я никогда раньше не думал об этом, как о цепном процессе. Я применил идею цепного процесса к рассказанному случаю в Гонолулу. Он показал мне, что в действительности эффект очень прост и оставалось только удивляться, почему никто до сих пор не обратил на это внимания. Если в облаке имеется большая капля воды, только одна, и если эта капля падает, то при своём падении она будет расти. Это произойдёт только в том случае, если её размеры больше некоторой величины. Для того чтобы определить, каковы должны быть эти размеры, необходимо использовать те же математические методы, какие мы применяли при вычислении процесса образования инея на цилиндрах.

Соответствующие вычисления производились мною в течение последних трёх месяцев, и в результате было выяснено, как именно велика должна быть капля для того, чтобы она росла при падении.

Если капля растёт, она растёт экспоненциально. Чем капля больше, тем быстрее она растёт и тем быстрее падает. По мере увеличения площади её поперечного сечения она захватывает всё больше капелек, встречающихся на пути и заключающихся в объёме примерно конической формы, сечение которого увеличивается к основанию облака. Капля растёт всё быстрее и быстрее, пока не вырастает настолько, что распадается на части, образуя капельки меньших размеров.

Если отсутствуют восходящие воздушные потоки, все эти капельки будут продолжать падение, пока не достигнут нижней границы облака и не выпадут из него. Цепного процесса не возникает.

Предположим, однако, что имеется восходящий поток воздуха, так что маленькие капельки, возникшие при распаде выросшей до

предела падающей капли, уносятся вверх. Через некоторое время они вернутся на уровень, где началось падение исходной капли, и в свою очередь могут повторить её историю и вырасти до предела, когда они распадутся на части. Тогда одна капля создаёт две или десять и каждая из них в свою очередь создаёт две или десять. Поскольку фактор размножения больше 1, — это цепной процесс, и всё облако превратится в тяжёлый дождь.

Теперь мне ясно, что всё это имело место при опытах в Гавайе. Это имело место каждый раз, когда мы засевали кучевые облака.

Я разработал математическую теорию, которая вскоре будет опубликована\*). Она проста. Она гласит, что условия, которые должны выполняться, чтобы привести к цепному процессу, суть вертикальная скорость ветра 9 км/час и содержание влаги, обеспечивающее по крайней мере 2,5 мм осадков. Частицы, образующие облака, должны быть довольно большими — около 20 микрон в диаметре. Очень маленькие частицы не создадут дождя. Когда эти специфические условия имеют место, то одна единственная капля воды способна разрушить всё кучевое облако и принести на землю большую часть содержащейся в нём влаги.

Засев водой окажется столь же эффективен, как и засев сухим льдом, и, кроме того, может применяться значительно чаще, например в тропиках, где высокие температуры не встречаются.

Литература полна примеров, когда люди наблюдали явления этого рода, но не понимали их. В течение всей войны военные наблюдали тяжёлые тропические ливни, но не могли понять, каким образом такой тяжёлый дождь может образовываться без снежных хлопьев в вершине облака, служащих основой для роста дождевых капель.

Разумеется, мы намереваемся испытать этот тип засева в больших масштабах на тропических островах с целью выяснить, способен ли водяной засев занять место наряду с засевом сухим льдом.

Мы сделали ещё две вещи, представляющие интерес. Одна — это засев облаков в Новой Англии с целью попытаться вызвать дождь, достаточный для тушения лесных пожаров. Результаты оказались неубедительными, ибо рассеянные дожди, возникшие в тот день, начались примерно за час или два до засева.

Другая интересная вещь — это наша деятельность в отношении ураганов. Вы помните, что 23 сентября над Миами прошёл ураган, нанесший городу повреждения. Газеты были полны сообщений, что кое-кто летал засеивать его. Летавших называли «разрушителями ураганов». Я не знаю, откуда взялось это название, ибо, поскольку мне известно, никто не собирался разрушать ураган. Полёт был совершён для получения сведений. Однако мы не были к этому готовы. Требовалось много работы и полётов. Наша группа не была подго-

\*) Эта теория цепного процесса была доложена на собрании Американского метеорологического общества 28 января 1948 г. и будет опубликована полностью в журнале этого общества.

товлена к большим операциям, таким как изучение возможного влияния засева урагана сухим льдом. На самолётах отсутствовало необходимое оборудование и люди не были достаточно тренированы.

Следующий ураган появился, или мы впервые узнали о нём, 10 октября. Самолёты были готовы 11 октября. Они отправились в Мобиль и затем в Тампа произвести разведку. На следующий день, в воскресенье, ураган двигался с необычайной быстротой. Он пересёк Кубу, неожиданно направился во Флориду и вскоре был по другую сторону Миами, над морем. Самолёты могли бы отправиться в воскресенье в полдень и попытаться что-нибудь сделать, но было решено от этого воздержаться и выждать, пока условия станут наиболее благоприятными.

13 октября действительно был произведён экспериментальный засев урагана. Опыт был проведён под контролем экспериментальной группы Cirrus Project. Я не принимал в них участия, но Шефер и представитель General Electric находились в качестве наблюдателей на двух самолётах. Привожу рапорт, составленный главой экспериментальной группы Д. Ф. Рексом.

13 октября 1947 г. экспериментальной группой Cirrus Project был произведён засев в небольшом масштабе тропического урагана, локализованного в 350 милях на восток-северо-восток от Джексонвилля, Флорида. Группа, состоявшая из трёх самолётов, базировалась в Тампа, Флорида. Старт состоялся утром в понедельник, в 8 часов 30 минут по американскому времени. Самолёты направились в область шторма и достигли внешнего вала ока в 10 часов 45 минут.

Ураган состоял из ока примерно 55 км в диаметре, окружённого мощным валом облаков, простиравшихся в высоту примерно от 250 м до покрова перистых облаков, располагавшегося на высоте 6 км. В радиальном направлении толщина вала составляла около 50—90 км. От внешнего вала тянулось несколько ярусов (4 или 5) стратифицированных облачных гряд. Вершины облаков верхнего яруса достигали 5,5 км. Эти гряды заполняли большую область (3.0—700 км<sup>2</sup>) и имели вид плотного тонкого подстила (300—600 м толщиной), разделённого большими просветами, через которые часто видна была поверхность моря. Чрезвычайно активная шквальная линия, выходящая, как почти непрерывная линия дождевых кучевых облаков (CuNi) с перистыми вершинами, поднимавшимися примерно до 18 км, имела форму спирали, протягивающейся от центра на восток и юг. От центрального основания, расположенного близ внешнего вала на высоте около 6 км, тянулись хорошо развитые перистые купола, поднимавшиеся у краёв до 10 км.

Самолёты приблизились к центру шторма с юго-запада. Этот курс привёл группу в правый задний квадрант шторма. После короткого разведывательного полёта вокруг внешнего вала было принято решение засеять дорожку над наиболее высокой облачной грядой. Самолёты построились дугом с засевающим самолётом, летевшим на уровне облаков в качестве ведущего. Фоторазведывательный самолёт следовал за засевающим на расстоянии 2—4 км и примерно на 1 км выше него. Контрольный самолёт двигался на высоте 1,5 км над облаками, отставая от ведущего на 30—40 км. Засев был начат в 11 часов 38 минут по американскому времени с 29°,8 северной широты и 74°,9 западной долготы и производился с высоты 5800 м. Температура воздуха была около —5° С. Непрерывный засев продолжался по прямому курсу до 30°,2 северной широты и 73°,9

западной долготы и затем до  $30^{\circ},8$  северной широты и  $73^{\circ},1$  западной долготы, где был закончен в 12 часов 08 минут по американскому времени. В течение этого тридцатиминутного интервала вдоль 200-километрового пути было рассеяно 36 кг твердой углекислоты. Кроме того, две порции, по 23 кг каждая, были высеяны в вершину большого кучевого облака около  $30^{\circ},7$  северной широты и  $73^{\circ},4$  западной долготы. По окончании засева все самолеты взяли обратный курс вдоль засеянного пути, производя визуальные и фотографические наблюдения. Ввиду отсутствия групповых навигационных средств (радиокомпаса и сигнальных ракет) не было предпринято никаких попыток проникнуть через вал шторма в его око или засеять шторм внутри или близ упомянутой выше шквальной линии. Попытка такого рода, хотя и желательная, имела бы, вероятно, результатом разделение самолетов с последующей неудачей в выполнении первоочередной задачи.

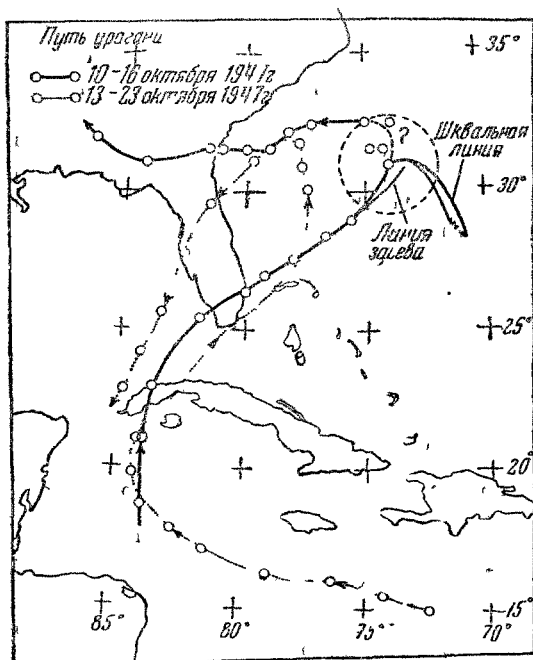


Рис. 14. Путь ураганов 10—16 октября 1947 г. и 13—23 октября 1906 г.

Никаких дальнейших полётов с целью продолжения наблюдений не предпринималось.

Итак, данный ураган возник около островов западнее Ямайки, двинулся на север, прошёл через Флориду за Миами, затем вышел в море и в момент засева находился в 650 км от берега. Круг на рис. 14 указывает приблизительно область, занятую облаками. Путь засева — это короткая линия, проходящая почти прямо чуть ниже центра окружности. Шквальная линия показана стрелкой справа. Дальнейший путь урагана в течение суток, или около того, оставался неизвестным. Специалисты сперва предполагали, что ураган имел два центра, но затем пришли к выводу, что двух центров не было. Шторм повернул и направился на запад.

Группа вернулась в Тампа и приземлилась в 16 часов 13 октября 1947 г.

Необычной является крайняя мягкость шторма, отмеченная наблюдениями с самолётов. Во многих районах вообще не было шторма и погода казалась сравнительно сносной. Не было кучевых облаков, не было дождя, скорость ветра на высоте полёта составляла около 55 км в час и эффект засева был такой же, какого можно было ожидать в подобных условиях в Скенектеди.

Чувствовалось, однако, что если бы самолёты могли оказаться на другой стороне шквальной линии, о которой я уже упоминал, то могли бы произойти некоторые действительно важные вещи. Что произошло на самом деле — никто не знает. Шквальная линия не является формальным признаком урагана. Когда она возникла, когда она исчезла, что с ней случилось — никто не знает. Бюро погоды не располагает никакими данными. На фотографиях, сделанных с самолёта, шквальная линия хорошо видна, но кроме этого нет никаких метеорологических данных, которые свидетельствовали бы о её существовании и позволяли бы судить, чем она вызвана и что она означает.

Основное, что мы вынесли из этого полёта — это то, что об ураганах необходимо знать несравненно больше, чем мы знаем в настоящее время.

Рассмотрим, например, ураган 23 сентября. Он был далеко в море, восточнее Флориды, и двигался на север или северо-восток. Согласно прогнозу погоды ожидалось продолжение его движения на северо-восток параллельно берегу. Вместо этого он неожиданно круто повернул, пошёл на запад и нанёс ущерб Миами.

В 1906 г. между 13 и 23 октября был ураган, который прошёл по пути, указанному на рис. 14 пунктирной линией, очень близко к пути урагана в октябре 1947 г. Он также повернул почти назад и двинулся обратно к берегу. Возможно, он также имел шквальную линию и это способствовало его странному поведению.

Если мы изучим эти вещи достаточно основательно, то будем в состоянии разобраться в явлении урагана. Мне кажется, что ближайшая программа действий должна заключаться в изучении ураганов вдали от земли, может быть, в центре Атлантического океана, далеко за Бермудами. Это должны быть обширные исследования путём полётов вдоль и поперёк ураганов, наблюдений и выяснения возможностей изменения ураганов или смещения их местоположения путём засева или какими-нибудь иными путями.

Я полагаю, что по мере роста наших знаний шансы получить возможность что-либо сделать для избежания вреда, наносимого ураганами, становятся очень большими.

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУКИЗ ИСТОРИИ ФИЗИКИ

## РЕФОРМА Ф. Ф. ПЕТРУШЕВСКОГО

*М. С. Соминский*

22 февраля 1865 г. скончался Эмилий Христианович Ленц, один из выдающихся членов Российской Академии наук, замечательный физик, работы которого известны всему миру, первый декан физико-математического факультета, а впоследствии ректор Санкт-Петербургского университета.

Акад. Ленц представлял собой незаурядную, яркую личность, в которой удачно сочетались неугасающий талант исследователя, дар первоклассного, темпераментного лектора и неистощимая энергия общественного деятеля. Слушать Ленца приходил весь университет. По словам одного современника, он читал свои лекции «как власть имущий».

Вклад в мировую науку, внесённый петербургским профессором может быть охарактеризован следующими словами акад. С. И. Вавилова: «Ленц навсегда вписал своё имя в историю электромагнетизма наряду с Эрстедом, Ампером и Фарадеем. Его знаменитое «правило, по которому происходит сведение магнитоэлектрических явлений на электромагнитные» до сего времени поражает своей глубиной и инстинктивным предчувствием закона сохранения энергии. Во всех своих многочисленных экспериментальных работах Ленц поражает наблюдательностью, точностью и глубиной дедукции. Работы эти составляют непрерывную цепь, во многом сохраняющую своё значение для современной электротехники».

Имя Ленца, конечно, широко было известно не только в России, но и далеко за её пределами, — основные его исследования в области электрических явлений вошли во все учебники мира.

Не удивительно поэтому, что в день смерти Ленца Санкт-Петербургский университет оказался в трудном положении, ибо не так легко и просто можно было в то время рассчитывать на равноценную замену.

Выбор пал на Фёдора Фомича Петрушевского, помощника Ленца, читавшего в университете лекции по физике с 1862 г. И, как ниже

будет видно, выбор оказался вполне удачным; университет получил прекрасного профессора, прогрессивного педагога, сумевшего в довольно короткое время резко улучшить систему преподавания физики в таком ведущем высшем учебном заведении, каким тогда был Петербургский университет.

В 1865 г., успешно защитив диссертацию на тему: «О нормальном намагничивании», Петрушевский получает степень доктора. Нельзя не отметить, что в том же 1865 г. в Петербургском университете степень доктора химии получил Д. И. Менделеев и магистра физики — М. П. Авенариус, родоначальник известной киевской школы физиков.

Являясь с 1862 г. помощником Э. Х. Ленца по кафедре физики, Фёдор Фомич уже в свои первые годы пребывания в Петербургском университете показал, что студенческая аудитория имеет дело с незаурядным лектором, вдумчивым, серьёзным и высоко эрудированным.

Эти качества позволяли считать, что кафедра, прежде возглавлявшаяся прославленным академиком, попадает в верные руки, и в 1865 г., после смерти Э. Х. Ленца, Петрушевский возглавил физику в Петербургском университете. Этот год явился переломным годом для всей системы физического образования. Дело в том, что первоклассный учёный и несомненно замечательный лектор, Э. Х. Ленц строил свою педагогическую работу исключительно только на лекционном материале. Никаких практических занятий студентов по физике в то время не существовало. Ленц близко не подпускал никого к своим приборам, а, кроме того, научной деятельностью он занимался не в университете, а в Академии наук. Таким образом, в таком ведущем высшем учебном заведении, каким являлся университет на протяжении всего своего существования, не было по существу физической лаборатории.

Один из учеников Петрушевского — В. В. Лермантов — в своих воспоминаниях, посвящённых учителю, пишет:...«свои работы по физике Эмилий Христианович делал в академической лаборатории, студентов туда он не пускал и при всяком желании «потрогать» приборы после лекции запрещал это, говоря «испортите». Физический кабинет университета при нём содержал лишь приборы для лекций, да и то Эмилий Христианович предпочитал пользоваться своими знакомыми приборами из академии, которые приносил его механик Ноак, служивший ему ассистентом на лекциях. В академическую свою лабораторию Эмилий Христианович допускал только немногих избранных, из числа своих кончивших уже курс учеников, в числе которых был и Фёдор Фомич: первая его научная работа была сделана там в 1853 г.»<sup>1</sup>.

Повидимому, даже демонстрации, сопровождавшие лекции, Ленц не очень любил производить, и если всё же их очень скупно и изредка показывал студентам, то делал это в силу неизбежной необходимости.

Фёдор Фомич хорошо понял, что нельзя так дальше преподавать физику, науку, все выводы которой строятся на точных экспериментальных данных. Никакой, даже самый одарённый лектор не в состоянии своей блестящей по форме и глубокой по содержанию речью заменить показ физических явлений, демонстрируемых в лаборатории. Петрушевский прекрасно понимал, что для того чтобы из воспитанников университета выходили физики, хорошо владеющие не только теорией вопроса, но и техникой эксперимента, существенно необходимо параллельно с теоретической подготовкой развивать в студенте экспериментальные навыки, а для этой цели нужна солидная лабораторная практика. Эти соображения, продиктованные самой жизнью, заставили Фёдора Фомича кардинально перестроить систему университетского обучения и ввести практические занятия студентов по физике.

Ближайший помощник Фёдора Фомича, В. В. Лермантов, отдавая должное реформам своего учителя, пишет: «Великой заслугой покойного Ф. Ф. Петрушевского было то, что он «вдохнул душу живую» в преподавание физики в нашем университете. До него физику только «читали», как всякий другой предмет, нужный студентам для экзамена; Фёдор Фомич первый во-время понял, что наступает время, когда умения, основанные на знании фактов этой науки, станут необходимыми и для обыденной жизни. Понял он и то, что одним слушанием лекции никакого реального умения приобрести нельзя, кроме умения сдавать экзамены у своих профессоров. Реальные умения приобретаются лишь обращением с реальными объектами изучаемой науки, т. е. с явлениями природы и с приборами, служащими для их воспроизведения и измерения, в случае физики»<sup>2</sup>. Осенью 1864 г. Петрушевский был назначен распорядителем физического кабинета. Эта должность позволяла ему особенно близко соприкоснуться с приборами, и он без особых промедлений приступил к организации физического практикума.

В начале 1865 г. начались практические занятия студентов четвёртого курса — на младшие курсы нехватало приборов. В следующем году к прохождению практикума приступил уже третий курс.

На первых порах все занятия протекали в физическом кабинете университета, мало приспособленном для лабораторных работ, так как всё помещение кабинета в основном было заставлено громоздкими шкафами, в которых хранились демонстрационные приборы. Сами приборы, конечно, не были предназначены для серьёзной научной работы. Вспоминая об этом периоде, В. В. Лермантов, лично принимавший большое участие в деятельности кабинета, рассказывает:

«В первое время можно было пустить в ход лишь очень немного опытов: удавалось отсчитывать показания барометра и устанавливать другой барометр с катетометром, помощью уровня определять удельный

вес, постоянные точки термометра, фокусные расстояния стёкол и силу света, измерять силу тока тангенс-буссолью. Занимающиеся заявляли желание делать и более сложные опыты, но средства оказывались недостаточны. Был, например, спектрометр, переделанный из теодолита но недоделанный: трубы были, как пушки на лафетах, и не закреплялись, так что одна смотрела в небо, а другая в землю, и большого труда стоило хотя бы увидеть через них свет. Были и кулоновы крутильные весы, с которыми уже в первый год один студент «наблюдал оба электричества и поверял законы Кулона», как гласит его запись в журнале. Но подобие было только внешнее и никакого действительного измерения сделать ими было невозможно. Все почти работы делались с небольшим числом приборов, приобретённых уже Фёдором Фомичом в первые годы его заведывания кабинетом.

Комнаты физического кабинета были почти вполне заняты шкафами и приборами, так что для занятий оставалось очень мало места»<sup>8</sup>.

Однако Фёдор Фомич настойчиво добивался улучшения условий физического практикума. Уже к осени 1867 г. ему удалось получить ещё пять комнат, были добыты зеркальные гальванометры и другие точные измерительные приборы. По существу, была создана первая физическая лаборатория, в которой не только проводились лабораторные занятия со студентами, но также можно было ставить серьёзные научные исследования.

Физическая лаборатория быстро росла и развивалась. Появились новые люди, энтузиасты замечательного начинания. Весной 1869 г. на должность сверхштатного лаборанта пришёл В. В. Лермантов, только что окончивший университет; затем, в следующем году горячее участие в делах лаборатории стал принимать И. И. Боргман, впоследствии профессор университета, ученик Петрушевского и продолжатель его дела. Появились Н. А. Гезехус и Н. Г. Егоров — в будущем известные физики.

Физическая лаборатория неуклонно процветала. Характерно, что она привлекала в свои стены большое количество «добровольцев» — студентов и магистрантов. Среди последних были: Н. П. Слугинов, Г. А. Любославский, С. Г. Егоров, А. И. Ефимов, Е. А. Роговский, А. И. Садовский, Ф. Я. Капустин, Э. Э. Форш, И. В. Лебедев, В. К. Лебединский, М. В. Иванов, М. А. Шателен и др.

По мере того как физическая лаборатория Петербургского университета росла и развивалась, и всё больше и больше увеличивался приток студентов и магистрантов, стало нехватать помещения. Фёдор Фомич предпринимает настойчивые хлопоты, в результате которых получает старое и недостроенное здание Же-де-Пом, сильно запущенное, требующее капитальных переделок. Однако уже осенью 1874 г. нижний этаж был приведён в порядок, и физическая лаборатория перенесла свою деятельность в более обширное и приспособленное

здание. Свою новую жизнь она начала при 60 занимающихся студентах, что по тем временам было довольно значительной цифрой.

В лаборатории увеличивался также штат обслуживающего персонала. После того как по настоянию Ф. Ф. Петрушевского, выхлопотавшего новую ставку для П. П. Фан-дер-Флита, последний был переведён на должность лаборанта, стало возможным взять высококвалифицированного механика. На должность механика был приглашён известный в то время Г. Х. Брауэр, а подмастерьем у него был исключительно способный, быстро растущий В. Л. Францен, скоро ставший известным в университетских кругах старой России.

Несмотря на то, что физическая лаборатория непрерывно совершенствовалась — оснащалась новыми приборами, улучшала свою производственную площадь, привлекала к себе передовую, талантливую молодёжь, увеличивала свой постоянный штат работников, — несмотря на всё это Фёдор Фомич не успокаивался на достигнутом, а продолжал неуклонно добиваться ещё больших улучшений. В 1877 г. ему удалось достать средства на покупку динамомашин и газового двигателя — электрический свет осветил все комнаты Же-де-Пом. В этом же году число занимающихся достигло цифры в 150 человек.

Сам Петрушевский и его физическая лаборатория пользовались большой любовью и популярностью; это видно хотя бы из того, что вплоть до 1884 г. практические занятия студентов по физике не были обязательными, и всё же количество студентов, практикующихся в лаборатории, непрерывно возрастало из года в год.

Наконец, наступил и такой период, когда лаборатории стало тесно в старом помещении, назрела явная необходимость сильно расширить производственную площадь, ибо число занимающихся студентами, магистрантами, профессорами резко увеличилось. Фёдор Фомич задумал кардинально решить проблему, неоднократно возникавшую на протяжении всех лет существования университетской физической лаборатории. Становилось очевидным, что для своего успешного развития лаборатория требует просторного и приспособленного помещения с учётом дальнейшего её роста и развития. В 1884 г. Ф. Ф. Петрушевский возбудил ходатайство о постройке во дворе университета нового здания, специально предназначенного для физической лаборатории. Сначала ходатайство, основательно мотивированное и обоснованное, осталось без всяких последствий. Однако Фёдор Фомич не терял надежд. Осенью 1891 г. ходатайство было снова возобновлено и снова безрезультатно. И лишь в 1897 г. удалось всё же окончательно добиться положительного решения этого существенно важного в развитии русской физики вопроса — 28 апреля министр финансов согласился отпустить необходимые средства на постройку нового здания.

По проекту крупного архитектора И. И. Коковцева здание было построено, и первая учебная, затем научная, лаборатория России

покинула стены Же-де-Пом. Позднее физическая лаборатория была переименована в физический институт, научная деятельность которого достигла своего апогея уже в годы советской власти.

Так, благодаря претворению в жизнь передовых идей, благодаря исключительной энергии и неутомимой работоспособности и преданности делу Фёдора Фомича Петрушевского, из скромного физического кабинета, предназначенного для демонстрации лекционных опытов и хранения физических приборов, вырос целый научный институт, в стенах которого в наши советские годы ведутся первоклассные научные работы, некоторые из которых удостоены сталинской премии.

Таков чрезвычайно сжатый и беглый обзор деятельности Фёдора Фомича только на одном, но несомненно важном участке.

Остаётся сказать несколько слов о той выдающейся роли, которую сыграла в научной жизни нашей страны физическая лаборатория, созданная усилиями проф. Петрушевского.

До реформы Петрушевского физику только «читали», даже не иллюстрируя основные физические явления демонстрационными опытами. По существу, для большей части аудитории физика являлась «меловой» наукой. При такой постановке преподавания кончающие университетский курс имели чрезвычайно слабые представления о технике физического эксперимента, большинство из них, естественно, посвящало себя педагогической карьере. Лишь отдельные талантливые одиночки находили в себе силы и способности подняться выше окружающей их среды, иными словами, такие физики, преодолевая затруднения, всё же находили возможности для занятия не только педагогией, но и научной деятельностью.

Конечно, заниматься наукой в то время было трудно, ибо, по существу, всюду, за исключением Академии наук и Медико-хирургической академии, условия были очень неблагоприятными.

В России до и во времена Э. Х. Ленца посвящать себя творческой научной деятельности, находясь в относительно хороших условиях, могли только физики, работавшие в Академии наук. Собственно говоря, благодаря необычайной прозорливости Петра I, а в дальнейшем энергичной деятельности академиков-физиков: Бюльфингера, Лейтмана, Крафта, Рихмана, Ломоносова, Петрова, Паррота и других, стала возможной организация физического кабинета и его дальнейшее развитие, из которого потом вырос известный в нашей стране, руководимый акад. С. И. Вавиловым Физический институт Академии наук СССР.

Незадолго до реформы Петрушевского магистерские и докторские диссертации, конечно, защищались, но соискателей было всё же очень мало, а кроме того, характер диссертаций в основном был не экспериментальный, а теоретический.

Каково же было положение за границей? По существу, точно такое же. Никаких практических занятий студентов по физике ни в одном

заграничном высшем учебном заведении не существовало. Впервые они начались в Гейдельберге после того как Кирхгофом был учреждён широко известный «физический семинар». Студентам, прослушавшим курс физики, читался особый раздел, посвящённый разъяснению некоторых достаточно простых экспериментальных задач, которые затем проделывались всеми участниками. Известный берлинский физик Магнус, имевший многочисленных учеников, имел частную лабораторию. То же самое можно сказать про Жолли, В. Томсона и других. Первые научно-исследовательские физические институты появились за границей лишь в последней четверти XIX века (Грац, Берлин, Страсбург, Париж, Шарлотенбург и т. д.).

Учитывая всю эту обстановку, становится особенно ясным огромное значение той реформы, которую последовательно проводил Ф. Ф. Петрушевский. Можно с уверенностью сказать, не преувеличивая значения этого факта, что практические занятия студентов по физике, в условиях подлинной научно-исследовательской лаборатории, сперва начались в России и лишь позднее—за границей. Огромная заслуга Петрушевского заключается, конечно, не в том, что он сумел опередить иностранцев—дело, естественно, не в этом. Заслуга Петрушевского состоит в том, что он во-время понял необходимость такой реформы и последовательно её провёл, создав тем самым мощный импульс, вызвавший к жизни скрытые возможности, таившиеся в народе.

За 35 лет, с 1865 по 1900 г., через лабораторию Петрушевского прошло три с половиной тысячи человек. Эта цифра красноречиво говорит о популярности физической лаборатории Петербургского университета.

Прогрессивная реформа Петрушевского, проведённая им со всей решительностью убеждённого человека, оказала большое влияние на постановку образования в высших школах России. Вслед за Петербургским университетом появились физические практикумы в университетах других городов. Это не могло не способствовать созданию кадров физиков нового типа, искушённых в технике физического эксперимента, получивших не только определённые лабораторные навыки, но и, главное, почувствовавших вкус эксперименту.

Введение Петрушевским физического практикума в университетскую программу в корне изменило профессиональное лицо оканчивающего университет—теперь это уже был физик совсем другого порядка, физик, который не только слушал лекции своих профессоров, но и сам своими руками собирал схемы, экспериментальные установки, ставил опыты.

Однако реформа Петрушевского шла гораздо дальше и завершилась, как известно, созданием научно-исследовательского физического института, в котором имели возможность творчески работать многие физики. Всё это, естественно, привело к резкому увеличению

числа экспериментаторов, что не могло не сказаться на дальнейшем подъёме физики в старой России.

Замечательный организатор и, несомненно, выдающийся педагог, Ф. Ф. Петрушевский был в то же время и хорошим учёным. О части его работ уже было кратко рассказано в одном из номеров журнала \*). Настоящая статья, посвящённая научно-организационной деятельности Фёдора Фомича, не преследует цели осветить даже в самом сжатом виде научные его заслуги. Однако, рассказывая об этой стороне деятельности Ф. Ф. Петрушевского, нельзя обойти молчанием ещё одно крупное событие — создание Петрушевским в 1872 г. Физического общества при Петербургском университете. Как известно, фактический основатель Общества, он вполне заслуженно был избран его первым председателем и состоял в этой должности, т. е. являлся научным руководителем Общества, почти тридцать лет.

Весьма характерно, что один из крупных деятелей Русского физико-химического общества, замечательный русский физик Н. А. Гёзехус, вспоминая историю создания физического общества, писал:

«Почва для нового учреждения постепенно подготавливалась как упомянутыми частными собраниями, так и введёнными в шестидесятих годах Ф. Ф. Петрушевским практическими занятиями студентов в физическом кабинете Санкт-Петербургского Университета, приохотившими многих молодых людей к физическим исследованиям и побудившими некоторых из них посвятить себя всецело науке» †.

Физическое общество, а затем физическое отделение Русского физико-химического общества, на протяжении всего своего существования играло серьёзную роль в научной жизни страны. Объединяя всех физиков России, оно связывало физиков столицы с работниками провинции.

Ф. Ф. Петрушевский чрезвычайно много сделал для процветания этой столь полезной и необходимой организации.

Общество проводило большую и нужную работу и несомненно внесло ценный вклад в дело развития физики в России.

В своих воспоминаниях о Петрушевском проф. Петербургского университета И. И. Боргман писал: «Но не одними своими статьями и книгами заслужил Фёдор Фомич весьма почётную известность!

Создание им нашего Физического общества, объединившего всех русских физиков, увековечит его память. Я помню, с каким воодушевлением относился Фёдор Фомич к устройству Физического общества, им задуманного. И с каким спокойствием и достоинством он исполнял обязанности председателя во время довольно часто проис-

---

\*) В. Л. Ченакал, Фёдор Фомич Петрушевский и его работы по оптике и цветоведению. Успехи физических наук, XXXVI, вып. 2-й, стр. 210 — 218 (1948).

ходивших в первые годы существования Общества жарких полемик. С полной корректностью, с отсутствием какой-либо оскорбляющей резкости сделанное Фёдором Фомичом и подчас довольно строгое авторитетное замечание охлаждало пыл спорящих и не давало возможности каких-либо дальнейших неприятных осложнений. Почти 30 лет оставался Ф. Ф. неизменным председателем нашего Общества и и всё это время он одинаково горячо относился к делам Общества, редко и то только по болезни пропуская заседания. Сложив с себя обязанности председателя при перемене устава нашего Общества, он, тем не менее, попрежнему оставался во главе этого Общества в качестве почётного председателя его. Будучи уже безнадежно болен, лёжа в постели, Ф. Ф. продолжал следить за деятельностью Общества, он просил других сообщать совету Общества его мнения по наиболее важным вопросам. Можно смело сказать, что для Физического общества Ф. Ф. был самым справедливым, самым любящим отцом»<sup>5</sup>.

Так же как и Э. Х. Ленц, Ф. Ф. Петрушевский не создал школы физиков, однако имел многочисленных учеников, среди которых были: И. И. Боргман, О. Д. Хвольсон, В. В. Лермантов, А. Якимов, А. Гершун, А. Петровский, Н. Гезехус, Н. Георгиевский, Э. Цытович, В. Нелюбов, Ф. Индриксон и ряд других.

В отличие от других Фёдор Фомич не ездил учиться за границу, как это было принято в то время. Как экспериментатор он, собственно говоря, был самоучкой. Не отрицая серьёзного значения иностранного опыта, воспринимаемого русскими физиками, уезжавшими на несколько лет за границу, Фёдор Фомич всё же считал, что молодым, начинающим учёным свои первые научные исследования необходимо производить у себя дома, в России. Необычайная любовь к своему народу и стране, высокое чувство долга и ответственности являлись гени стимулирующими началами, которые на протяжении всей сознательной жизни Фёдора Фомича заставляли его всегда и неизменно отдавать себя целиком служению науке и народу и того же требовать от других.

17 февраля 1904 г. после длительной и тяжёлой болезни Фёдор Фомич скончался. Петербургский университет, а вместе с ним и наука России понесли тяжёлую утрату. И несомненно справедливы слова Боргмана, сказавшего:

«Велика потеря Фёдора Фомича для нашего Общества, но еще большею, быть может, эта потеря представляется для нашего университета. 42 года Ф. Ф. в качестве профессора принадлежал университету: он начал чтение лекций в 1862 г. и хотя в 1901 г. оставил преподавание, но вплоть до своей болезни, на 10 месяцев приковавшей его к постели и затем унесшей в могилу, он продолжал быть самым аккуратным членом факультета и совета, продолжал интересоваться делами университета, выражая во время прений свои мнения с полной откровенностью, с полной независимостью от ка-

ких-либо предвзятых идей или внешних давлений. И все сотоварищи Ф. Ф. по университету, как бы они ни расходились с ним во взглядах по какому-либо вопросу, глубоко уважали кристальную чистоту его души и чутко прислушивались к его слову...

Всегда скромный и строгий во всех своих поступках, не исключая даже формы своей речи, он требовал того же и от других. Его до глубины души возмущало самомнение или какое-либо действие, рассчитанное на произведение внешнего эффекта. 53 года сначала преподавательской, а затем профессорской и литературной деятельности прошли в непрерывном труде, доставлявшем Фёдору Фомичу только самое необходимое для жизни его и его семейства»<sup>6</sup>.

#### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Сборник статей по физике, посвящаемый памяти Ф. Ф. Петрушевского. 1904, стр. VIII.
  2. То же, стр. VII.
  3. То же, стр. VIII.
  4. Н. А. Гезехус. Исторический очерк десятилетия деятельности Физического общества при Петербургском университете, ЖРФХО, XIV, вып. 9, 519, 1882.
  5. И. И. Б о р г м а н, Памяти Ф. Ф. Петрушевского, ЖРФХО, XXXVI, вып. 3, 51, 1904.
  6. То же, стр. 54.
-

**УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК****О МЕТОДОЛОГИЧЕСКИХ ОШИБКАХ  
В КНИГЕ проф. С. Э. ХАЙКИНА «МЕХАНИКА» \*)**  
(второе издание, Гос. издательство техн.-теор. литературы, 1947)**Ф. А. Королёв**

Книга проф. Хайкина «Механика» предназначена в качестве учебника для физических факультетов университетов по курсу общей физики. Согласно учебным планам физических факультетов университетов раздел «Механика» читается на первом курсе. Само собой разумеется, что подготовка студентов в методологических вопросах в этот период является значительно более слабой, нежели это имеет место на старших курсах, когда студенты прослушают ряд общественно-политических дисциплин. С этой точки зрения к учебникам для младших курсов должны быть предъявлены особенно высокие требования в отношении выдержанности их в вопросах марксистско-ленинской методологии.

Итоги сессии ВАСХНИЛ с полной очевидностью показали, к каким пагубным последствиям приводит проникновение в среду советских учёных враждебной марксизму-ленинизму буржуазной идеологии.

Поддавшись буржуазной идеологии, учёный не только становится на путь низкопоклонства перед зарубежной наукой, но и вслед за буржуазными учёными становится на путь извращений специальных наук, приспособления их к идеалистическим положениям буржуазной идеологии. Извращая науку, такие учёные отрывают её от вопросов практики социалистического строительства и уводят науку в болото формализма.

Наглядным подтверждением этих положений является борьба менделистов-морганистов с передовым мичуринским учением. Проникновение чуждой марксизму идеологии в среду советских учёных, не ограничивается рамками биологических наук, а имеет место и в других науках, в частности, и в физике.

Одним из примеров такого проникновения и является книга проф. Хайкина «Механика». Будучи предназначенной в качестве учебника

\*) Печатается в порядке обсуждения.

для студентов первых курсов физических факультетов университетов, эта книга является совершенно непригодной для этих целей, так как содержит большие методологические извращения.

Основным пороком этой книги является стремление привить читателю мировоззрение, которое идёт полностью в разрез с марксистско-ленинским мировоззрением. Для того чтобы это показать, достаточно поставить вопрос о том, как решается основной вопрос философии—об отношении мышления к бытию—в книге проф. Хайкина. Диалектический материализм исходит из положения, что первичным является материя, природа, её законы, а сознание является свойством природы, отражением её объективных закономерностей. Идеализм исходит из признания первичности сознания, а материю, природу, её законы признаёт как продукт нашего сознания.

Обратимся теперь к книге проф. Хайкина и посмотрим, как в ней решается основной вопрос философии.

На стр. 22 (2-е издание) Хайкин даёт определение закона в следующей формулировке: «Всякий количественный физический закон содержит в себе утверждение относительно связей между теми или иными физическими величинами».

В первом издании проф. Хайкин формулировал это несколько лаконичнее: «Всякий количественный закон есть утверждение относительно связи между теми или иными величинами» (1-е издание, стр. 18). Таким образом, на первый план выставляется сознание, в противоположность диалектическому материализму, признающему первичным не сознание, а объективную закономерность, существующую вне и независимо от нашего сознания.

Приведённое выше понимание закона как утверждения развивается и проводится во всём дальнейшем изложении. Таким образом, настойчиво проводится субъективно-идеалистическая точка зрения.

Неискущённому читателю может показаться, что между формулировками закона в первом издании и во втором издании книги проф. Хайкина есть разница. Однако это только на первый взгляд. При дальнейшем чтении убеждаешься, что проф. Хайкин приложил много «творческих усилий» и виртуозности, чтобы хоть как-нибудь замаскировать очевидную, субъективно-идеалистическую формулировку понятия закона. На стр. 23 (2-е издание) проф. Хайкин пишет:

«При формулировке всяких физических законов нужно ясно отдавать себе отчёт, в какой мере те или иные положения представляют собой утверждения, нуждающиеся в проверке на опыте, и в какой мере они являются лишь определениями новых физических величин. Различать утверждения и определения необходимо потому, что утверждения и определения стоят в совершенно различной связи с опытом. Утверждения можно и нужно проверять на опыте. Именно постольку, поскольку эти утверждения поддаются опытной проверке и подтверждаются на опыте, они представляют собой физические законы (курсив—Хайкина).

Проверка состоит в том, что результаты нескольких независимых измерений различных физических величин удовлетворяют соотношению, выражаемому законом. Определения же не нуждаются в опытной проверке такого рода».

В первом издании проф. Хайкин был несколько отчётливее. Он там прямо говорил, что «Утверждения можно и нужно проверять на опыте, определения—нет» (стр. 18, 1-е издание). Таким образом, по Хайкину получается, что есть такие положения, которые являются априорными творениями чистого разума.

В приведённой выше цитате со стр. 23 второго издания категорически утверждается, что закон есть «утверждение», т. е. субъективная категория.

То, что «утверждения нужно и можно проверять на опыте», как это говорится у Хайкина, несколько не улучшает положения дела, так как словечко «опыт»—ходовая категория махистов, которые считают, что в опыте мы имеем дело лишь со своими собственными ощущениями и переживаниями, а не с материальными предметами и явлениями.

Но ещё хуже то, что одни и те же положения, можно, смотря по обстоятельствам, рассматривать и как утверждения (т. е. в определении Хайкина—законы), и как определения (которые по Хайкину законами уже не являются). То-есть одно и то же положение может быть и законом и может им не быть, в зависимости от человека, имеющего дело с этими положениями. В подтверждение сказанного здесь приведём ещё одну цитату со стр. 22 второго издания. Там сказано следующее:

«Так, положение, содержащееся во втором законе Ньютона, что ускорение пропорционально действующей силе, только тогда можно рассматривать как утверждение, поддающееся проверке на опыте, если мы располагаем независимым способом измерения ускорений и сил. Если же мы не располагаем независимым способом измерения силы, а определяем силы по тем ускорениям, которые они сообщают телу, то положение, что ускорение пропорционально силе, уже не является утверждением, поддающимся опытной проверке, а представляет собой определение силы, которое, как и всякое определение, в непосредственной опытной проверке не нуждается».

В приведённой цитате проф. Хайкин выложил все, что думал, и что утверждения (т. е. законы) могут становиться определениями (т. е. не законами), и то, что определения есть внеопытные априорные категории.

Позволительно задать проф. Хайкину вопрос, который всегда в таких случаях ставится субъективным идеалистам. Если бы не было на свете того, кто высказывает «утверждения и определения», существовали бы тогда или нет законы природы, в том числе и законы Ньютона? Достаточно так поставить вопрос, чтобы стало совершенно очевидным, что проф. Хайкин развивает в своей «Механике» субъективно-идеалистическое мировоззрение.

Это мировоззрение проф. Хайкин проводит и при изложении основных законов механики — законов Ньютона. На стр. 86 (2-е издание) он говорит:

«В том изложении основных законов движения, которое было приведено выше, способ измерения массы был заимствован из второго закона Ньютона. Вследствие этого второй закон Ньютона уже нельзя было рассматривать целиком как утверждение, поддающееся опытной проверке. Можно, однако, поступить иначе, а именно, заимствовать способ измерения массы из третьего закона Ньютона. Тогда характер утверждений, содержащихся во втором и третьем законах Ньютона, соответствующим образом изменится. И несколько далее, на стр. 87 (2-е издание) проф. Хайкин говорит: «Итак, в зависимости от того, *как мы выберем* (курсив наш—Ф. К.) способ измерения массы, характер утверждений, содержащихся во втором и третьем законах Ньютона, оказывается различным».

Итак, по Хайкину содержание законов природы целиком зависит от воли субъекта, который оперирует этими законами. Мах похвалил бы проф. Хайкина за его откровенное изложение мировоззрения Маха.

Так дело обстоит с изложением основных законов механики, законов Ньютона.

Не лучше обстоит дело и в вопросах пространства и времени. В разделе «Механика специальной теории относительности» проф. Хайкин обсуждает методы измерения пространственных и временных промежутков. Касаясь методов измерения пространственных промежутков, Хайкин говорит (стр. 512, 2-е издание):

«Для того, чтобы результаты измерения длин удовлетворяли известным требованиям повторяемости, однозначности и т. д., линейка, которой мы пользуемся для этой цели, должна обладать определёнными физическими свойствами (должна быть достаточно жёсткой). Но пока для измерения длин мы пользуемся только линейкой, например, метром, хранящимся в Палате мер и весов, мы лишены возможности проверить на опыте, не изменяет ли эта линейка своей длины — длина её, по определению, постоянна».

Замечательный вывод, проф. Хайкин!

Итак, свойства тел не есть объективные явления, а зависят от ваших желаний, определений и требований (как Вы выражаетесь, требований повторяемости, однозначности и т. д.). Чувствуя шаткость своих позиций, Хайкин к этим своим рассуждениям в сноске пытается сделать поправку. Но поправка эта не улучшает дело, а ещё ухудшает, и видимо рассчитана лишь на неосведомленного читателя, какими и являются ещё студенты первых курсов. В этой сноске (стр. 512, 2-е издание) проф. Хайкин разъясняет: «Конечно, применяя разные линейки и сравнивая их между собой, мы можем обнаружить, что одни из них изменяют длину по сравнению с другими, но какую-то линейку (самую жёсткую) мы должны принять за эта-

лон, и её длина по определению является постоянной. В настоящее время в качестве эталона длины часто используют длину определённой световой волны, но это значит лишь, что длина этой световой волны по определению считается постоянной». Итак, проф. Хайкин разъяснил!

Значит, всё же свойства тел есть результат определений. Захотел проф. Хайкин, чтобы световые волны имели постоянную длину волны, изрёк определение и готово — длины волн становятся постоянными по определению. Совершенно откровенная субъективно-идеалистическая точка зрения, извращающая и конкретные физические факты.

Физикам-спектроскопистам и физикам-метрологам, имеющим дело со световыми волнами, хорошо известно, что длины световых волн непостоянны, как и любые другие физические объекты. У одних источников света они более постоянны, у других — менее. Но это зависит не от «определений» и вообще не от наших желаний, а от объективных свойств источников света. Основные метрологические учреждения заняты тщательным изучением степени воспроизводимости длин световых волн, и только опыт покажет, у каких источников света длины волн окажутся достаточно воспроизводимыми, чтобы они могли заменить метр при измерениях длин. Таким образом, дело обстоит совершенно наоборот, нежели это хочет изобразить проф. Хайкин.

После таких «обоснований», что свойства пространства должны удовлетворять субъективным требованиям наблюдателя, проф. Хайкин переходит к свойствам времени и его измерения. По поводу этого он говорит следующее (стр. 512, 2-е издание): «Точно так же и световые сигналы, при помощи которых мы устанавливаем время, когда «там» произошло событие, т. е. определяем одновременность двух событий, происходящих в разных местах, должны обладать определёнными физическими свойствами, чтобы результаты измерения времени удовлетворяли требованиям однозначности, повторяемости и т. д. Но мы не можем, например, проверить на опыте, что скорость света туда и обратно всегда одинакова — она по определению одна и та же».

Итак, опять кантовская вещь в себе, априорная, внеопытная категория, как и в случае хайкинского инструмента измерения длины.

О невозможности опытной проверки одинаковой скорости распространения света туда и обратно проф. Хайкин говорит и далее, на стр. 517. В примечании на этой странице проф. Хайкин говорит:

«Только Эйнштейн указал на постулативный характер предположений о постоянстве длины линеек и хода часов, предположений, которые в классической физике рассматривались не как возможные постулаты, а как заимствованные из опыта факты».

Итак, все точки над «и» поставлены! Хороший подарок преподнёс нам проф. Хайкин — постулаты, которые есть творения чистого

разума, стоящие вне опыта, не заимствованные из опыта, объективной действительности.

Более 50 лет физики экспериментаторы исследовали эти положения на опыте и пришли к выводу, что скорость света постоянна туда и обратно, а проф. Хайкин хочет уверить неопытного читателя, что это внеопытные постулаты, заимствованные лишь из головы человека.

Таким образом, проф. Хайкин не только проводит идеалистическое мировоззрение, но и искажает конкретное содержание физической науки, как он это делает и в вопросах с эталонами длины. В нашу задачу не входит давать подробную рецензию на книгу проф. Хайкина. Целью этой статьи является выяснить, какое в ней проводится мировоззрение. Из приведённого выше видно, что это мировоззрение идеалистическое, махистско-кантианского толка. Нам, однако, хочется ещё остановиться на некоторых моментах книги, которые также отражают её общее направление.

Уже во введении проф. Хайкин настойчиво подчёркивает, что он намерен заниматься в своей книге «идеализированными схемами». Это преклонение его перед идеализированными схемами, повидимому, заставляет его преподносить материал на неверных физических моделях. Так, на стр. 275 изображена модель упругого тела, которая даёт учащимся неверное, искажённое представление об упругом теле. Этим же можно объяснить и то, что на стр. 304 проф. Хайкин утверждает: «Твёрдое тело можно растянуть или сжать в каком-либо одном направлении». Всем знающим людям известно, что этого нельзя сделать. Всегда при растяжении в одном направлении появляется сжатие в другом. Зачем же проф. Хайкин пишет это для неопытного читателя? И несколько дальше—такая путаница, которая неизвестно для чего приведена. На стр. 305 проф. Хайкин пишет: «Что же касается газов, то в них принципиально имеют место только деформации сжатия». Но полстраницей ниже проф. Хайкин пишет: «При быстрых деформациях сдвига в жидкости и газе могут возникнуть заметные силы».

На одной странице при формулировке основных положений механики жидкостей и газов изложены такие абсурдные противоречия.

Не приводят к добру попытки проф. Хайкина навязывать телам те свойства, которыми они не обладают.

На стр. 89 в § 28 проф. Хайкин делает упрощение, исключая из рассмотрения силы трения, т. е. переходя к частным случаям движений. Но перейдя к частным случаям, проф. Хайкин на этой основе тотчас же делает фальсификацию, и на стр. 90 формулирует уже основное положение механики. Он пишет: «Мы можем теперь по-иному формулировать основное положение механики Ньютона, для системы тел в любой момент времени вторые производные по времени от координат тел однозначно определяются координатами этих тел» (курсив Хайкина).

Для чего проф. Хайкину нужно было дать эту заведомо неверную формулировку основного положения механики? Это сделано с целью изгнать движение, этот атрибут материи, при объяснении возникновения ускорений, а значит, и сил. На той же стр. 90 проф. Хайкин пишет: «Образно выражаясь, для определения ускоренной системы тел в какой-либо момент времени нужно иметь только ментальную фотографию системы, соответствующую этому моменту, и совершенно не нужно знать, движутся ли тела или покоятся».

Вот, что нужно было доказать проф. Хайкину, т. е. что для определения ускорений (а следовательно, и сил) не нужно вообще рассуждать о движении тел. В первом издании по этому вопросу проф. Хайкин был откровеннее и на стр. 72 он прямо сформулировал: «Поэтому при объяснении происхождения сил в какой-либо системе тел *никогда* (курсив наш — Ф. К.) не следует привлекать соображений о том, что тела движутся. Происхождение сил всегда можно и нужно объяснять только исходя из того, какое положение в данный момент занимают все тела системы или отдельные их части». Вот для чего проф. Хайкину потребовались все выверты с формулировками основного положения механики Ньютона. Наконец, ещё один момент заслуживает внимания. Это вопрос о роли русских учёных в развитии науки. Хорошо известна выдающаяся роль Н. Е. Жуковского и С. А. Чаплыгина в разработке вопросов подъёмной силы крыла самолёта и других вопросов авиации. Проф. Хайкин счёл лишь возможным упомянуть имя Жуковского и Чаплыгина на стр. 373 в § 129 под заголовком: «Эффект Магнуса—циркуляция».

В параграфе же 127, где говорится о подъёмной силе, о Жуковском ни слова, и вообще остаётся совершенно неясным, что же сделал великий русский учёный Жуковский. У читателя в этом вопросе получается совершенно превратное представление. Ни слова не сказано о выдающихся работах Жуковского, связанных с гидравлическим ударом.

В § 162 «Ультразвуки» ни слова не сказано о блестящих работах русских физиков Лебедева и Неклепаева.

В параграфе «Реактивное движение» — ни слова о Циолковском и т. д. О работах советских учёных и вообще о достижениях советской науки в области механики не сказано ни звука, как будто такой науки и не существует.

Возникает вопрос, кому нужен такой учебник, в котором проведено идеалистическое мировоззрение, извращается конкретное содержание науки и принижается роль русских и советских учёных.

---

## УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК

### ИЗ ТЕКУЩЕЙ ЛИТЕРАТУРЫ

### КОМБИНИРОВАННЫЕ СВЕТОФИЛЬТРЫ ДЛЯ УЛЬТРАФИОЛЕТА

Каждому, кто имел дело с теми или иными измерениями в ультрафиолете, хорошо известно, как трудно подобрать светофильтры для выделения определённой области в этой части спектра. Это связано с тем

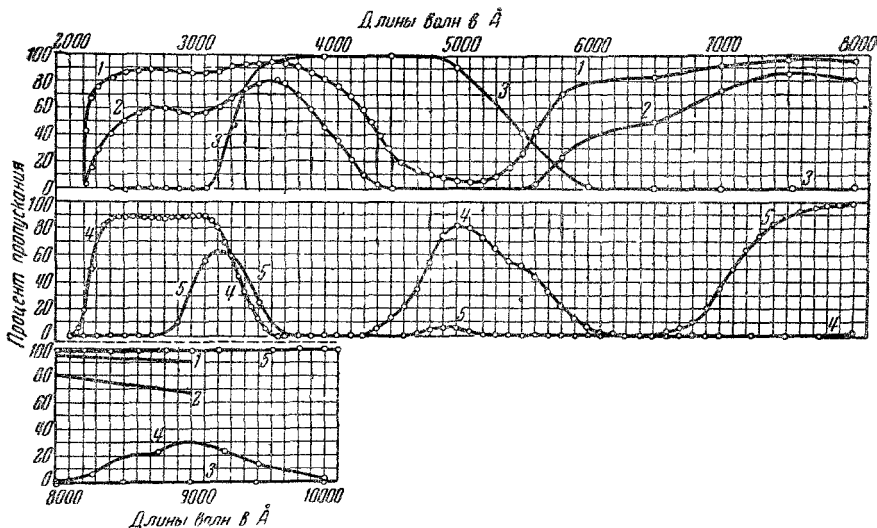


Рис. 1. Пропускание водных растворов некоторых неорганических солей от 2000 до 10 000 Å. 1— $\text{CoSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ , 75 г/л,  $d = 1$  см; 2— $\text{CoSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ , 300 г/л,  $d = 1$  см; 3— $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ , 100 г/л,  $d = 5$  см; 4— $\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ , 500 г/л,  $d = 1$  см; 5— $\text{KCl}(\text{SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ , 150 г/л,  $d = 1$  см.

обстоятельством, что почти нет веществ, хорошо поглощающих видимый и ближний инфракрасный спектр и пропускающих ультрафиолетовую часть. Лишь с помощью довольно сложных комбинаций из двух, трех или даже четырёх компонент можно построить светофильтры, выделяющие тот или иной участок ультрафиолетового спектра.

В небольшом сообщении М. Каша<sup>1</sup> «Светофильтры для ультрафиолета» приводятся рецепты шести «монокроматических» светофильтров, составленных из трёх или четырёх компонент, так что выделяются области 2400—2800, 2600—2900, 2900—3350, 3000—3350, 3200—3600, 3450—3900 Å с пропусканием в максимуме от 20 до 30% (см. рис 4). Все комбинации осуществлены таким образом, что лишь у некоторых из них отмечается ничтожное пропускание в других областях спектра. Автором обращено также специальное внимание на стабильность применяемых им веществ.

Таблица I  
Компоненты комбинированных светофильтров

Компо- нента	Вещество	Раствор	Толщина слоя	Примечание
1	$\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	100 г/л воды	5 см	Рис. 1, кривая 3
2	$\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	100 » »	5 »	
3	$\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	200 » »	5 »	
4	$\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	300 » »	5 »	
5	$\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ *) + $\text{CoSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	240 » » 45,0 » »	5 »	Рис. 1, кривая 4 (для 500 г/л) Имеет слабые макси- мумы пропускания: 1,5% при 5700 Å и 3,9% при 9000 Å.
6	Фильтры Корнинга С. S. 7-37 (5860 или 586)		5 мм	
7	С. S. 7-51 (5970 или 597)		4 »	
8	С. S. 7-54 (9863 или 986)		3 »	
9	2,7-диметил-3,6 диа- зациклогептан-1,6- диен-ноид	20 мг/100 см <sup>3</sup> воды	1 см	Исключительно ста- бильный краситель. Приготовление см. в литературе <sup>6</sup> . Иногда нужно учи- тывать флуоресцен- цию раствора.
10	Нафталин	12,8 г/л изооктана	1 »	
11	$\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$	0,200 г/л воды	1 »	
12	$\text{KHC}_8\text{H}_4\text{O}_4$	5,0 г/л воды	1 »	
13	$\text{CCl}_4$	Чистый, нераз- бавленный	0,5 »	Не вполне устойчив
14	1,4-дифенил-бута- диен	4,24 мг/100 см <sup>3</sup> этилового эфира	1 »	

\*) По поводу использования этих двух веществ см. также <sup>2</sup>, 4, 5.

В таблице I приводятся компоненты подобранных фильтров с указанием их концентраций и толщин, а в таблице II показаны комбинации этих компонент и оптические свойства получаемых фильтров. На рис. 1, 2, 3 приведены спектры пропускания компонент, на рис. 4 — спектры пропускания их комбинаций.

Таблица II

Комбинированные светофильтры для выделения отдельных участков ультрафиолетового спектра

Комбинированный фильтр	Применяемые компоненты табл. I	$\lambda_{\max}$ в Å	Примечания
A	1 + 6 + 9	~ 3650	Если приемник не чувствителен к $\lambda > 6000 \text{ Å}$ , то этот фильтр можно заменить кобальто-никелевым стеклянным фильтром
B	2 + 7 + 10	~ 3300	Вместо компоненты 7 можно взять кобальто-никелевое стекло
C	3 + 8 + 11 + 12	~ 3150	Компоненту 12 возможно заменить 2 мм зеленоватого стекла
C'	3 + 8 + 11	~ 3130	
D	4 + 8 + 9 + 13	~ 2620	Дает узкую полосу пропускания у $3470 \text{ Å}$
E	5 + 14	2550	Пропускает ~ 1% у $5700 \text{ Å}$ , что можно исправить добавлением стекла № 8 табл. I

Для осуществления описанных светофильтров нужно иметь 1) кювету с кварцевыми окошками; толщина слоя 5 см, 2) стеклянный фильтр и 3) вторую кювету с кварцевыми окошками и толщиной слоя 1 см.

В пучок света кюветы нужно помещать в указанном порядке, так как первая кювета предназначена для растворов неорганических солей в воде. Эти растворы достаточно стабильны и 5 см воды поглощают инфракрасную часть. Таким образом, лучи, попадающие на последнюю кювету, будут значительно ослаблены, и менее стабильные вещества, помещаемые в эту кювету, будут в большей безопасности.

Рис. 2. 1— $\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ , 240 г/л +  $\text{CoSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ , 45 г/л в водном растворе,  $d=5$  см; 2—пропускание фильтра 7-54 (9863 или 986) Корнинга,  $d=3$  мм; 3—то же, старый фильтр.

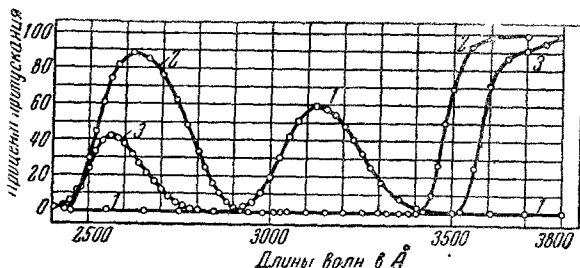
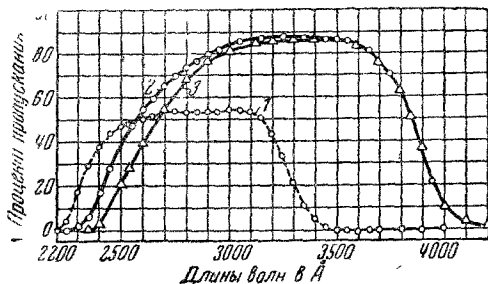


Рис. 3. 1— $\text{K}_2\text{CrO}_4$ , 0,200 г/л воды,  $d=1$  см; 2—цианино-подобный краситель (компонента 9, табл. I) 20 мг/100 см<sup>3</sup> воды,  $d=1$  см; 3—1,4-дифенил-бутадиев, 4,24 мг/100 см<sup>3</sup> этилового эфира,  $d=1$  см.

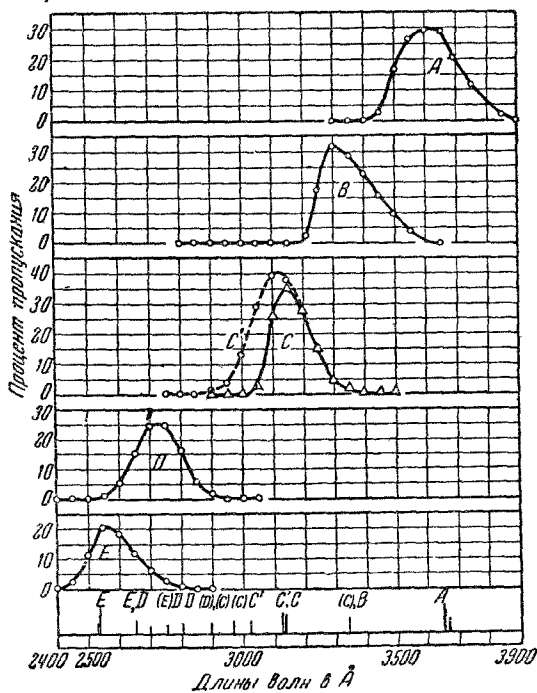


Рис. 4. Полосы пропускания комбинационных монохроматических ультрафиолетовых фильтров (см. табл. II).

При использовании указанных комбинированных светофильтров нужно стремиться к подбору соответствующих источников света. Так, например, комбинации *A*, *B* и *C* будут давать хороший эффект с лампами сверхвысокого давления (СВД-III). Комбинация *D* и *E* в этом случае ничего не даёт, так как в лампах СВД резонансная линия полностью самообращена и отсутствует также целая область вблизи неё. Светофильтр *E* может быть использован в комбинации с лампой низкого давления (типа «бактерицидных» ламп или ламп «короткого ультрафиолета» — КУФ). В этом случае светофильтр может быть сильно упрощён, так как сами лампы низкого давления излучают почти всю энергию в виде линии 2537 Å.

Лампы ПРК-2 или ПРК-4 можно комбинировать со всеми указанными светофильтрами; применение светофильтров *D* и *E*, однако, будет мало эффективным вследствие незначительного количества энергии, даваемой лампами ПРК в области  $\lambda < 3000 \text{ Å}$ .

*А. А. Ильина*

#### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

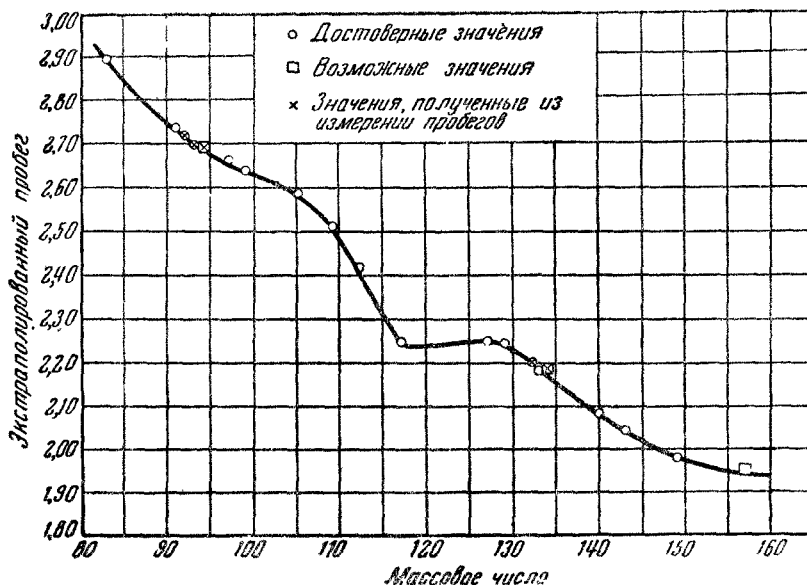
1. M. Kasha, JOSA 38, № 11, 929 (1948).
2. R. W. Wood, Phil. Mag. 5, 27 (1903).
3. Сборник работ по биологическому действию ультрафиолетовых лучей под ред. проф. Г. М. Франка, НКЗ, Медгиз, М. — Л., 1939 г. Статья Комарова.
4. T. Dreisch u. W. Trommer, Zeits. f. physik. Chemie B37, 37 (1937).
5. H. L. Bäckström, Naturwiss. 21, 251 (1933); E. I. Bowen, J. Chem. Soc., 76, 1935.
6. G. Schwarzenbach a. K. Lutz, Helv. Chim. Acta, 23, 1139 (1940).

## МАССА И ПРОБЕГ ОСКОЛКОВ ДЕЛЕНИЯ ПЛУТОНИЯ

Пробег осколков деления ядер можно определять при помощи различных методов. Для этого применяется камера Вильсона и ионизационная камера переменного давления или исследуется активность алюминиевой фольги различной толщины, окружающей вещество, подвергающееся делению.

В реферируемой работе<sup>1</sup> авторы использовали устройство, которое состояло из бериллиевой трубки длиной 225 мм, диаметром 25 мм. На одном конце трубки перпендикулярно к ее оси помещалась плутониевая фольга толщиной около 0,1 мг/см<sup>2</sup>. На расстоянии 100 мм от плутониевой фольги в интервалах 3 мм друг от друга, перпендикулярно к оси трубки, помещалось 14 одинаковых плёнок из цапон-лака. Толщина плёнок была равна 8 мг/см<sup>2</sup>. Трубка заключалась в неопреновую оболочку и наполнялась сухим воздухом при давлении 120 и 140 мм ртутного столба. Облучение нейтронами производилось на Лос-Аламосском котле в продолжение 30 минут или 14 часов. После облучения плёнки, за исключением первой и последней, растворялись в ацетоне и подвергались радиохимическому анализу. Почти всё торможение осколков деления плутония вызывалось воздухом и после остановки они осаждались на ближайшей плёнке. Активность каждой плёнки исследовалась на один или два периода полураспада. В некоторых случаях кривые полураспада исследовались на две компоненты. Исследования производились для 20 различных изотопов осколков деления с массами от 83 до 157. Активность каждой плёнки для данного изотопа давала кривую дифференциальных пробегов. Общая активность всех плё-

нок после данной давала кривую интегральных пробегов. С помощью этой кривой определялся экстраполированный пробег. В группе лёгких масс от 83 до 117 экстраполированный пробег менялся от 2,9 см воздуха (при нормальных условиях) до 2,26 см. В группе тяжёлых масс от 127 до 157 экстраполированный пробег менялся от 2,25 см до 1,95 см. График даёт пробег осколков в зависимости от их массы.



Вначале<sup>2</sup> осколки деления имеют кратность ионизации около 20 и, таким образом, удерживают основную часть атомных электронов. Падение скорости осколков почти линейно, что является следствием уменьшения заряда при торможении. Наблюдаемый разброс в пробегах осколков одной массы зависит от вариаций начального заряда и энергии, статистических флуктуаций в столкновениях осколков с электронами и ядрами и экспериментальных условий. Ни одна из полученных кривых дифференциальных пробегов не является гауссовой. Все они имеют более крутой наклон на расстояниях, близких к плутониевой фольге. Указывается, что метод может быть использован для изучения короткоживущих продуктов деления.

К. Д. Толстов

#### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. S. Katcoff, J. Miskel and C. Stanley, Phys. Rev. 74, 631 (1948).
2. N. O. Lassen, Phys. Rev. 69, 137 (1946).

**УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК****БИБЛИОГРАФИЯ**

**М.-Бургер.** Рентгеновская кристаллография. Перев. с англ. В. П. Тарасовой и М. П. Шаскольской под редакцией М. М. Уманского. Государственное издательство иностранной литературы, М., 1948, 484 стр. 252 рис., 34 таблицы. Три дополнения редакции.

Рцензируемая книга представляет собой оригинальный труд, посвящённый исключительно подробному изложению одной главы рентгеноструктурного анализа. Автор ограничил себя во многих отношениях: он рассматривает лишь те стадии рентгеновского анализа, которые заключаются в определении элементарной ячейки и пространственной группы кристалла, и, наконец, он ограничивает себя рассмотрением лишь тех методов рентгеновского структурного анализа, в которых рентгенограмма создаётся монохроматическим излучением. Последнее обстоятельство несколько удивляет нас. Действительно, в принципе, измерение ячейки кристалла и определение пространственной группы можно проделать и не прибегая к лауэграммам. Однако совершенно неоспоримо, что метод Лауэ исключительно удобен и изящен при решении, скажем, таких задач, как нахождение ориентировки бесформенного кристалла, уточнение ориентировки, определение рентгеновской симметрии. Лауэвский метод является если не необходимым, то во всяком случае исключительно целесообразным на той стадии исследования, изложение которой является темой книги. Можно смело утверждать, что исключение этого раздела из книги объясняется лишь тем, что её автор этим методом не работал, а излагать он решал в своей книге лишь то, чем он занимался сам.

Задача книги — это изложение способов получения и расшифровки рентгенограмм монокристаллов. Автор приводит лишь тот вспомогательный материал, который по его мнению в той или иной степени нужно знать, занимаясь получением и индцированием рентгенограммы. Вопросы применения того или иного метода остаются полностью в тени. Само построение книги таково, что всюду автор отталкивается от метода, а не от цели исследования. Трудно представить себе более типичный случай книги, посвящённой методике частного экспериментального исследования.

В книге изложена работа методами вращения и качания кристалла. методами рентгеновских гониометров различных типов. Автор работал во всех этих областях, не пользуясь всеми этими методами для решения структурных задач, а изучая эти методы сами по себе, ища пути их улучшения. Почти для всех без исключения случаев у автора имеется своя конструкция камеры и свой метод расчёта рентгенограммы. Однако автор излагает всю существующую литературу, так что читатель может вполне объективно судить о достоинствах всех разновидностей той или иной методики.

Книга Бургера ни в какой мере не является учебником. Это пособие или даже справочник, который имеет смысл подробно изучать, имея перед собой конкретную цель. В полезности этой книги нет сомнения: метод

изучения монокристаллов с каждым годом приобретают всё большую значимость, и число специалистов, работающих в этой области, непрерывно растёт. В то же время на русском языке (да и на иностранных) нет ни одной книги, посвящённой методике получения и расчёта рентгенограмм.

За кратким введением следует гл. 2 под названием «Некоторые геометрические особенности решёток»; 2—3 страницы посвящены понятиям кристаллографических индексов, а остальной материал занимает теория преобразования решётки, т. е. обсуждаются формулы преобразования координат, записанные в специализированном для решётки виде. В следующей главе излагается элементарная теория дифракции рентгеновских лучей; автор знакомит читателя в довольно популярной форме с уравнениями Лауэ, Брегга-Вульфа и понятием структурного фактора. В гл. 4 рассматриваются погасания, характеризующие пространственные группы. Несколько удивляет логика автора, излагавшего в гл. 2 элементарные геометрические факты, касающиеся решётки, и полагающего в гл. 4, что понятие пространственной группы является известным. Законы погасания выводятся при помощи чертежей, вместо того чтобы получить их на нескольких строках (а не на 20 страницах) алгебраическим путём.

Эти четыре главы выглядят, как приставка, написанная для того, чтобы оправдать заглавие книги. Автор, впрочем, указывает в предисловии, что первоначально в его план входило лишь описание получения и расчёта рентгенограмм. Поэтому с нашей точки зрения книга начинается с гл. 5.

Изложение методики рентгеносъёмки ведётся исключительно подробно. В гл. 5 автор делает «предварительный обзор» метода вращения. Далее, прежде чем перейти к расшифровке рентгенограмм, автор знакомит нас с методом обратной решётки. Делается это с большой подробностью: 22 страницы посвящаются материалу, который обычно излагается на трёх-четырёх страницах. Достаточно сказать, что автор не рискует ввести понятие обратной пространственной решётки сразу, а считает необходимым сначала ознакомить читателя с плоской квадратной обратной решёткой, затем с прямоугольной квадратной, после этого с косугольной плоской решёткой, и только потратив 9 страниц, переходит к изложению необходимого материала. Подробная детализация, излишняя пространственность изложения типичны, как мы увидим, для всей книги; автор не верит в наличие у читателя элементарной математической сообразительности.

Гл. 8 посвящена расшифровке рентгенограмм. Прежде всего автор скрупулёзно выводит формулы, связывающие координаты узла обратной решётки с координатами интерференционного пятна на плёнке. Делается это в двух параграфах, один из которых называется «Преобразование от координат обратной решётки к координатам плёнки», а второй «Преобразование от координат плёнки к координатам обратной решётки». Редактор перевода сообщает нам что он выбросил ряд элементарных промежуточных математических выкладок. Однако думается, что действовать можно было более решительно, оставляя в среднем одну пятую часть формул автора. В гл. 8 рассматривается индцирование рентгенограмм вращения. После этого в последнем параграфе сообщается то, что хорошо известно каждому рентгенографу, а именно, непригодность для индцирования рентгенограммы вращения. Специальная глава посвящена практическим вопросам метода вращения. Все сведения, сообщаемые здесь, очень полезны. Автору можно предъявить лишь тот же упрёк в совершенно излишней словоохотливости. Далее следует глава о методе качания. Она завершается описанием специальной хитроумной камеры автора, которая, видимо, призвана заменить исключительно простую камеру для съёмки лауэграмм. Автор же обязательно желает обойтись монохроматическим методом.

Гл. 11 — это введение к методам с движущейся плёнкой, гл. 12 — введение к методу Вейссенберга. Обе главы очень хорошо написаны. Гл. 13 излагает с исключительной подробностью расшифровку рентгенограмм, по-

лученных методом перпендикулярного пучка. Любовь к детализации заоддит автора и здесь очень далека. Например, в начале главы (и пытается доказать читателю, что при расшифровке мы воспроизводим пл.кость обратной решётки в той ориентировке, в которой она пребывала перед началом вращения (совершенно бессодержательное утверждение). Следующие две главы посвящены другим разновидностям метода Вейссенберга. Если отбросить упрёк, который отнесётся ко всей книге, — излишняя детализация, изложение наряду с существенными вопросами и ряда совершенно неважных подробностей, — то следует признать большую ценность тщательного описания всех возможностей метода Вейссенберга, продолжающего оставаться основным методом работы рентгенографа. Автор приводит значительное число таблиц и графиков, которые окажут большую услугу лицу, начинающему свою деятельность в области получения рентгенограмм Вейссенберга. Гл. 16 посвящена методам Саутера и Шибольда. Гониометры типа Саутера начали недавно производить в Ленинграде. Поэтому эта глава будет полезна для советского читателя. То же относится и к гл. 17, в которой описаны принципы работы методом Боумана и Де-Йонга. Камеры для работы этим методом начала производить Москва. Таким образом, одновременно с выходом в лабораторную жизнь новых камер, значение которых для развития у нас рентгеноструктурного анализа трудно переоценить, исследователь получает одновременно и хорошее описание принципов работы этими методами. В этих главах, так же как и в главах, посвящённых методу Вейссенберга, автор приводит необходимые для работы графики и таблицы.

Мы указывали выше, что первые четыре главы являются приставкой к основному содержанию книги; в отношении последних глав следует сказать то же самое. Совершенно тривиально содержание гл. 18 под названием «Геометрия косоугольных ячеек» и гл. 19 под названием «Экспериментальное определение констант решётки неортогональных кристаллов». В последней главе излагаются сложные искусственные методы, не применяющиеся на практике. В то же время эти методы совершенно просты для понимания, потому изложение их излишне со всех точек зрения. Гл. 22 под названием «Теория интерпретации проекции обратной решётки» также представляет собой в основном нежелательное усложнение простых вещей. Автор показывает в этой главе, как можно распознать лауэвский класс симметрии по виду рентгенограмм Вейссенберга, затем, как с помощью таких же рентгенограмм может быть выяснен тип пространственной решётки. Этот материал изложен на 20 с лишком страницах весьма «строго». Результат иллюстрируется многочисленными таблицами. Однако вполне очевидно, что никогда к такому способу распознавания класса симметрии или типа решётки не придётся прибегать в процессе исследования. Как изложено в этой же книге, все данные о симметрии кристалла, могущие быть полученными рентгеновским экспериментом, следуют из рассмотрения погашений отражений. В то же время невозможно представить себе случай, когда исследователь ограничился бы рассмотрением рентгенограмм Вейссенберга, не прибегнув к их индизированию. Если нужно получить сведения лишь о типе решётки, то для этого существуют значительно более простые способы, чем съёмка рентгенограмм Вейссенберга.

Совершенно тривиальны подробно рассматриваемые «соотношения обратности». Все они сразу вытекают из основного определения обратной решётки и самоочевидны. В этой главе, по нашему мнению, имеют право на существование лишь последние два параграфа, где сообщаются полезные сведения о выборе удобных осей ячейки в разных кристаллических системах и рассматриваются некоторые особенности «тела обратной решётки» (терминология Г. С. Жданова).

Редактор снабдил книгу тремя очень полезными дополнениями. Приведены таблицы погашений для определения рентгеновских групп, состав-

вленные Г. С. Ждановым и В. А. Поспеловым, дано описание камеры колебаний производства НИИФ (кстати сказать, эта камера значительно удобнее рассматриваемых в тексте образцов) и, наконец, дана статистика распределения кристаллов по сингониям.

Всяческие похвалы следует сделать по адресу переводчиков и редактора. Перевод сделан превосходно: в книге буквально нельзя найти прегрешений ни против литературного стиля, ни против технического языка. Редактор снабдил монографию необходимыми ссылками на книги и статьи советских авторов. Можно упрекнуть лишь лиц, выпустивших русское издание в излишнем пиетете перед автором. Безусловно, книга только выиграла бы, если бы подверглась значительному сокращению.

Как мы уже несколько раз отмечали, излишняя детализация и загромождение книги практически мало интересным тривиальным материалом являются единственным, хотя и не малым, недостатком рецензируемой монографии. Однако наличие в книге впервые появляющегося на русском языке материала по методике получения и расчёта рентгенограмм, изложение этого материала с полным знанием дела, наличие большого числа практически ценных таблиц, графиков и рекомендаций позволяют безоговорочно приветствовать выпуск на книжный рынок монографии Бургера.

*А. И. Китайгородский*

Редактор *Г. В. Розенберг*

Техн. редактор *А. И. Сипелёва*.

Подписано к печати 5/IV 1949 г. 8,5 печ. л. 10,84 уч.-изд. л. 50.900 тип. зн. в печ. л.  
Тираж 3 300 экз. Формат 60×92/16 А-04015. Цена книги 10 руб. Заказ № 109.

13-я тип. Главполиграфиздата при Совете министров СССР.  
Москва, Денисовский пер., 30

ЦЕНА 10 руб.

47  
З МИУССКАЯ 3  
ФИЗИЧ. ИНСТИТУТ АКАД.  
НАУК. ГИИЗБУРГ В.Л.  
22 1.72 УСП ФИЗ И

## СОДЕРЖАНИЕ

Н. Н. АНДРЕЕВ, В. С. ГРИГОРЬЕВ, И. Г. ЛЕЙЗЕР,

Л. Д. РОЗЕНБЕРГ, Б. Д. ТАРТАКОВСКИЙ

Архитектурная акустика в СССР . . . . . 269

ДЖ. К. СЛЕТЕР

Конструкция линейных ускорителей . . . . . 316

ИРВИНГ ЛЭНГМЮР

Рост частиц в дымах и облаках и образование снега из  
переохлаждённых облаков . . . . . 349

ИЗ ИСТОРИИ ФИЗИКИ

М. С. СОМИНСКИЙ. Реформа Ф. Ф. Петрушевского . . . . . 378

Ф. А. КОРОЛЁВ. О методологических ошибках в книге проф.  
С. Э. Хайкина „Механика“ . . . . . 388

ИЗ ТЕКУЩЕЙ ЛИТЕРАТУРЫ

Комбинированные светофильтры для ультрафиолета (А. А. Ильина) . 395

Масса и пробег осколков деления плутония (К. Д. Толстов) . . . . . 399

БИБЛИОГРАФИЯ

М. БУРГЕР. Рентгеновская кристаллография (А. И. Китайгородский) . 401