

А. Ф. Иоффе и его идея ТОНКОСЛОЙНОЙ ИЗОЛЯЦИИ

Возникновение и падение в 30-е годы идеи А. Ф. Иоффе о так называемой «тонкослойной изоляции». Молодые А. П. Александров, И. В. Курчатов, Л. Д. Ландау — среди участников этой эпопеи.

Осенью 1925 года в Советском Союзе широко отмечалось 200-летие со дня основания (императором Петром Великим) Российской академии наук. Хотя к этому времени столица страны переместилась из Ленинграда в Москву, торжества происходили не только там, но и в Ленинграде. Юбилейная сессия была призвана показать, что в стране продолжают развиваться мирные процессы, прерванные мировой и гражданской войнами. На сессию съехались не только крупнейшие ученые Советского Союза, но и знаменитые гости из-за рубежа. Многие из них были или почетными или иностранными членами Академии. Страницы газет, как центральных, так и ленинградских, пестрели подробными описаниями торжеств.

Среди советских физиков особым вниманием прессы пользовался 45-летний академик А. Ф. Иоффе, руководитель крупнейшего в стране исследовательского института — Физико-технического, который за семь лет своего существования снискал себе широкую международную известность. Центральная «Правда» в своем выпуске от 8 сентября сообщила следующее:

Академику А. Ф. Иоффе удалось разрешить один из величайших мировых научных вопросов, имеющих для народного хозяйства огромное значение. В нескольких лабораторных опытах академик А. Ф. Иоффе получил максимальную для нашего времени концентрацию энергии в минимальном объеме. Сконструированный аккумулятор может помещаться в жилетном кармане и содержать заряд энергии, достаточный для самого мощного автомобиля в течение суток.

Лавина публикаций, старт которой был дан статьей от 8 сентября, продолжалась. Та же «Правда» в номере от 11 сентября взяла интервью у приехавшего на сессию Макса Планка — отца квантовой физики, попросила его прокомментировать газетные сообщения о работах Иоффе по «концентрации энергии» (которые годом раньше поддержал виднейший физик-теоретик Пауль Эренфест, преемник Г. Лоренца по кафедре теоретической физики Лейденского университета). Планк был осторожен в своей оценке.

«К сожалению, — сказал он корреспонденту, — я узнал об этом открытии из короткой газетной заметки, но считаю его вполне возможным и открывающим громадные перспективы для дальнейших научных достижений. Ближайшее будущее покажет, удастся ли использовать это открытие для практических целей».

Столь же осторожным был и выступивший в ленинградской газете Я. И. Френкель, охарактеризованный корреспондентом газеты как «известный физик, близко стоящий к акад. А. Ф. Иоффе и находящийся в курсе его работ». Но все же и он не перечеркивал возможностей идеи Иоффе, и концовка его статьи звучала ободряюще: «... имеются все основания, — писал он, — полагать, что кристаллы различных солеобразующих веществ, а также и некоторые аморфные вещества, сходные с ними по внутреннему строению, могут быть использованы для получения высоковольтных аккумуляторов малого веса и значительной емкости».

Что же стояло за всеми этими публикациями, сенсационность которых определялась не только темой исследований и раскрывающимися благодаря им перспективами, но и «залихватским» стилем сообщений тогдашних газетчиков?

В 1902 году молодой выпускник Петербургского технологического института Абрам Иоффе (1880-1960), заручившись рекомендательными письмами двух профессоров своего института, направился на стажировку к находившемуся в зените своей славы Вильгельму Конраду Рентгену в Физический институт Мюнхенского университета. Среди нескольких тем, предложенных ему для разработки, наибольшее влияние на дальнейшие интересы и работы Иоффе имело изучение электрических свойств

диэлектриков. В течение четырехлетнего пребывания в Мюнхене Иоффе открыл и объяснил влияние внешних воздействий (тепла, облучения ультрафиолетовым светом и рентгеновскими лучами радия) на величину электропроводности ионных кристаллов. В частности, показал, как сильно (на несколько порядков!) меняется эта величина у предварительно подвергнутым данным воздействиям кристаллов под влиянием простого освещения.

Вернувшись в начале 1906 года в Россию, Иоффе продолжал исследования диэлектрических кристаллов. Наиболее важный результат был им получен в 1916 году в совместной с его ученицей, М. В. Кирпичевой, работе. Изучая электропроводность такого рода кристаллов и убедившись в воспроизводимости¹ полученных результатов, Иоффе пришел к важному и экспериментально подтвержденному выводу о том, что плотная упаковка кристаллической решетки на самом деле оказывается достаточно рыхлой и что в процессе диссоциации решетки (стимулируемой нагревом кристалла или какими-либо иными внешними источниками — излучением и т. д.) ионы перемещаются из узлов решетки в пространство междоузлий, по которому и передвигаются под влиянием приложенного электрического поля в соответствующем направлении. При этом с хорошей точностью выполняется закон Фарадея.

Видимо, с этой работы и началось у Иоффе формироваться представление о природе пробоя диэлектриков и ионных кристаллов. Коль скоро ионы и лишённые валентного электрона атомы решетки могут свободно перемещаться по пространству междоузлий, то и процессы пробоя кристаллов могут трактоваться по аналогии с достаточно хорошо исследованным к тому времени процессом пробоя газов. В газе пробой осуществляется за счет образования лавины электронов, ускоряемых во внешнем электрическом поле, приложенном к электродам трубки, напол-

¹ Первоначально использованные им кристаллы считались *purissimi*. На самом деле, все они содержали примеси — и в больших количествах, чем и определялся по началу разброс результатов измерений. Иоффе и Кирпичева различными методами добились «изгнания» примесей и получили истинно чистые образцы. Эти исследования получили позднее развитие, в частности, в 1940-х и 1950-х годах в приложении к очистке полупроводников.

ненной исследуемым газом. Процесс носит характер «разветвляющейся цепи», который как раз в это время успешно исследовался Н. Н. Семеновым в институте Иоффе в приложении к кинетике химических реакций. Наряду с электронной, в газе возникает и ионная лавина. Первоначально образованный ион (за счет какого-либо даже случайного единичного акта ионизации нейтрального атома или молекулы) ускоряется в поле, сталкиваясь с нейтральным атомом газа, выбивает из него электрон, образуя новый ион. Теперь уже в поле движутся два иона. При следующем столкновении их будет четыре, потом — восемь, и т. д.²

Дальнейший ход рассуждений А. Ф. Иоффе, вероятно, был таков. Электрическая прочность газового промежутка, U , может быть увеличена за счет уменьшения его «толщины», d . Если d меньше длины свободного пробега λ атома в газе при данном давлении, то энергия, набранная на этом пути и равная eEd , где E — напряженность приложенного электрического поля и e — заряд электрона, будет меньше U , и лавина не сможет развиваться — пробой будет предотвращен.

Ион, движущийся в пространстве междуузлий, по Иоффе, также набирает энергию и может выбить атом из решетки и ионизовать его — начнет формироваться лавина. Нельзя ли повысить электрическую прочность диэлектрика, уменьшая толщину соответствующего слоя? Не окажется ли, что она, эта прочность, будет возрастать по мере уменьшения толщины слоя? В лаборатории Иоффе начали исследовать электропроводность и пробой тонких пленок изоляторов — слюды, стекла, различных масел. К этой работе Иоффе привлек своих молодых сотрудников — К. Д. Синельникова, П. П. Кобеко. Чуть позже к ним присоединился двадцатидвухлетний И. В. Курчатov, поступивший на работу в

²Эта схема лавины боле привычна теперь в приложении к цепной реакции деления урана-235 медленными ионами. Подчеркнем, что соответствующая теория была разработана учениками Иоффе и Семенова — Ю. Б. Харитонов и Я. Б. Зельдовичем. Ю. Б. Харитон своей работой (совместно с З. Ф. Вальта) по механизму окисления фосфора стимулировал теоретические исследования Семенова по цепным разветвляющимся реакциям, за которые он в 1956 году получил Нобелевскую премию по химии (разделенную им с английским исследователем С. Хиншельвудом).

ФТИ в октябре 1925 года.

Фигура Курчатова в этой истории особенно привлекает внимание в связи с тем, что в сравнительно недалеком будущем — через 20 лет — он стал руководителем советского атомного проекта. Иоффе предложил Курчатову, сразу по его поступлении в ФТИ, проверить странный результат, полученный американским исследователем Хартегом [1]. По Хартегу получалось, что тонкие слои металлов (порядка 30 микрон) оказываются «прозрачными» для электронов, в том числе низкоэнергетических, ускоренных всего до каких-то двух-трех десятков электрон-вольт. Курчатов, работая с тонкими пленками металлов, показал источник ошибки Хартега (пленки просто-напросто были дефектными и имели отверстия, через которые и пролетали медленные электроны) [2]. Вот почему Курчатов быстро снискал известность в ФТИ как специалист по тонким пленкам, во-первых, и как экспериментатор с развитым чувством научной критики, во-вторых.

Первые опыты по проверке идеи Иоффе подтвердили наличие предсказанного эффекта «электрического упрочнения» (соответствующие работы были позднее изложены в [3]). Отсюда открывались чрезвычайно широкие перспективы, о которых и шла речь в упомянутой газетной публикации. Другая возможность использования эффекта — создание сравнительно небольших по размерам изоляторов в линиях высоковольтных передач — взамен существовавших более громоздких.

Итак, электрическую энергию W , запасенную в конденсаторе емкостью C , с толщиной прослойки d и площадью S приложенным напряжением U , определяют по формуле $W = CU^2/2$, где $C = \varepsilon S/4\pi d$ и ε — диэлектрическая проницаемость. В свою очередь, как видим, $U \sim 1/d$, то есть растет с уменьшением толщины, и, поскольку C пропорциональна $1/d$, получается, что W обратно пропорциональна третьей степени толщины конденсатора!

Для определения зависимости $U(d)$ нужно было уметь определять толщину d . Для этого существовало много достаточно хорошо известных методов, начиная от самого простого — зная площадь слоя изоляции S и удельный вес соответствующего ма-

териала, d определяется простым взвешиванием (правда, в связи с возможной неоднородностью по толщине, этот метод мог быть не очень точным). Второй способ — по разряду конденсатора через данное сопротивление R и времени релаксации $\tau = 1/RC$. Зная это время, определяют C , а, значит, и d . Имелся еще один, достаточно точный, но тоже прямой метод определения толщин — оптический. При толщинах в несколько десятков микрон оптический метод и метод «релаксационный» (назовем его емкостным) давали хорошо совпадающие результаты. Поэтому от оптического метода отказались, а проверять наличие совпадения обоих методов во всем измерявшемся диапазоне, включая и совсем малые, микронные, толщины, не сочли нужным. (Иоффе был знатоком и приверженцем методов диалектического материализма, в один из принципов которого входил закон «перехода из количества в качество», но о возможности такого перехода и неадекватности емкостного метода при малых величинах Иоффе как-то не подумал!)

А тем временем о полученных в лаборатории Иоффе результатах становилось известным не только газетчикам, а ученым и инженерам, причем, не только в СССР, но и за его пределами. Особенно сильное впечатление эти опыты произвели на специалистов фирмы «Сименс», с которой было заключено соответствующее соглашение в 1927 году. Заинтересовались работами Иоффе и в США в фирме «Дженерал Электрик». Всюду Иоффе знали и он пользовался заслуженно высокой репутацией.

Еще более существенным было то, что Иоффе получил поддержку своих идей и в руководстве СССР. Председатель Высшего совета народного хозяйства В. В. Куйбышев, с которым и раньше институт поддерживал тесные деловые контакты, поддержал работы Иоффе и для придания им должного размаха распорядился о выдаче на их развитие значительных средств. О соответствующих перспективах, которые сулило внедрение идеи Иоффе в промышленность, Куйбышев рассказал на XVI партийном съезде ВКП(б) в 1930 году.

Иоффе был чрезвычайно доволен развитием событий, тем более, что на их примере реализовывались провозглашенные им

принципы взаимодействия фундаментальных и прикладных исследований. Он был уверен, что фундаментальная физика обязательно обогатит технику будущего — так было всегда, а в современной ситуации, при необычайном расцвете физических исследований во всем мире и в нашей стране, «временная» дистанция между физическим открытием и его использованием в технике только сокращалась. Иоффе принадлежал популярный в середине 20-х — начале 30-х годов лозунг: «Физика — это техника будущего». Единство физики и техники, кстати, нашло отражения и в том названии, которое Иоффе в 1918 году выбрал для своего института — физико-технический. И факультета, который он в 1919 году организовал в Ленинградском политехническом институте — этот факультет в течение ряда лет назывался инженерно-физическим.

Однако, триумфальный ход исследований с конца 20-х годов начал давать сбои. Если раньше «сдержанный оптимизм» (или, в некоторых случаях, «осторожный пессимизм») высказывали теоретики, то постепенно и экспериментаторы, работавшие в других научных центрах, сначала в СССР, а потом и за рубежом, не могли подтвердить результаты, полученные в лаборатории Иоффе. Особенно резкой была критика молодого ученого из теоретического отдела ФТИ — Л. Д. Ландау. Подвергая сомнению полученные результаты, он, в частности, исходил из ошибочности самого представления о свободном пробеге иона в кристаллической решетке. Ион на пути, необходимом для того, чтобы «скопить» энергию, достаточную для ионизации, должен провзаимодействовать со многими другими атомами решетки, на которых он эту энергию может «разбазарить». С этой точки зрения длиной свободного пробега можно было бы считать межатомное расстояние; на этом пути набрать энергию, необходимую для ионизации, невозможно! Свои соображения Ландау в достаточно резкой форме излагал на семинарах в ФТИ. А потом, тоже очень резко — и на страницах физических журналов: сначала — советском [4], а потом — немецком [5].

В августе 1930 года в Одессе состоялся Первый всесоюзный съезд советских физиков. На нем с докладами об электрических

свойствах диэлектриков выступила группа молодых физиков из Киева. Доклады очень понравились Иоффе (председатель Съезда). Он пригласил этих молодых людей к себе в институт. Особенно выделялся из их числа А. П. Александров (в будущем — еще один советский ядерный «барон», сподвижник Курчатова, и в 1974-86 годах — президент АН СССР). В качестве одной из первых задач, поставленных директором ФТИ перед ним, надо было разобраться в ситуации, сложившейся в тонкослойной изоляции — в надежде, что контраргументы, в основном, экспериментальные, удастся отвести.

Александров взялся за эту работу, и причина расхождений, как вскоре он установил, была — увы! — не в пользу Иоффе. Можно себе представить, с каким тяжелым сердцем признал Иоффе правильность выводов Александрова! Молодой физтеховец, желая хоть как-то поддержать своего маститого директора, предложил изложить полученные им результаты в совместной статье. В результате, в ЖТФ, основателем и главным редактором которого был Иоффе, появилась статья «К вопросу об электрической прочности тонких пленок» [6] в разделе «Оригинальные работы».

Приведем ее аннотацию:

Исследование источников погрешностей при измерении пробивных напряжений очень тонких стеклянных и слюдяных пленок, показывают, что часто наблюдавшиеся исключительно высокие пробивные напряжения таких пленок могли быть обусловлены ошибками в измерениях. При устранении этих ошибок пробивные напряжения или совсем не повышаются, или повышаются крайне мало, при уменьшении толщины от 10^{-3} до 7×10^{-5} см. Опыты указывают на повышение электропроводности стеклянных и слюдяных пленок вблизи пробивных напряжений.

Сама статья начинается с осторожного (но, конечно, тогда понятного многим!) упоминания о том, что «в последнее время, по ходу измерений электрической прочности, производившихся на тонких лаковых пленках при участии авторов данной работы, оказалось желательным выяснить все возможные источники ошибок старых работ, и ниже приводятся результаты такого исследования».

В заключении к работе говорится о том, что измерения толщин пленок по разряду конденсатора, в котором в качестве слоя диэлектрика используются пленки соответствующих материалов, могут привести к ошибкам, которые дают повышение прочности для тонких слоев. При этом, помимо неточности самого метода измерений, указывается также и неучтенные другие его особенности — влияние влажности окружающего воздуха, при больших значениях которой имеет место утечка по поверхности электрического заряда. «При исключении источника ошибок в интервале от 10 $\mu\text{м}$ до 0,7 $\mu\text{м}$ упрочнение в стекле не наблюдается, в слюде наблюдается слабое».

В жизни почти каждого творческого человека бывают периоды взлетов и падений, удач и неудач. У писателей, художников, композиторов эти неудачи никогда не бывают ошибками. Обычно они забываются и становятся предметом изысканий историков искусств; такие неудачи обычно лишь оттеняют успехи. Неудачи ученых чаще всего сводятся именно к ошибкам, крупным и мелким³. Случается, что эти ошибки легко прощаются (пример — А.Эйнштейн, на счету которого имеется около десятка такого рода ошибок, включая знаменитую экспериментальную ошибку в их совместной с де Гаазом работе по определению величины гиромангнитного отношения — эффект Эйнштейна-де Гааза — или ошибку в оценке работы А. А. Фридмана по расширяющейся нестационарной Вселенной).

Не так сложилась судьба ошибки Иоффе. Спустя четыре года после признания им этой ошибки он снова был подвергнут за нее жесткой критике со стороны многих своих учеников и сотрудников. Такой всплеск эмоций, какой имел место на мартовской сессии АН СССР в 1936 году, просто трудно объяснить! Пожалуй, наиболее резкими выступлениями против Иоффе, прозвучавшими на ней, были выступления А. И. Лейпунского (в то время — директора харьковского Физико-технического института)

³ Можно причислить к их числу не лучший, сложный метод представления полученных результатов, слишком длинную цепочку рассуждений и выводов, ведущих от идеи к результату. Такие вещи легко прощаются их авторам. «Красоты я требую от портных», — говорил по этому поводу Людвиг Больцман, подчеркивая важность именно результата, а не его представления.

и Л.Д.Ландау (заведующего теоретическим отделом того же института). Лейпунский критиковал Иоффе за его общие соображения о соотношении между физикой и техникой и считал сильно преувеличенными его оценки успехов советской физики, данные Иоффе в основном докладе на сессии. Ландау, солидаризировавшийся с Лейпунским в критике этой оценки, вернулся к вопросу о тонкослойной изоляции, назвав воззрения Иоффе на этот предмет «примитивными и малоудовлетворительными» [7, С. 86], резко осудив небрежность в проведении экспериментальных работ по тонкослойной изоляции.

А. Ф. Иоффе, возражая против ряда замечаний Ландау, с нашей точки зрения, во многом несправедливых, также отошел от тона академической беспристрастности, применив в контр-критике адекватную лексику. Но возразить против критики своих «тонкослойных» работ не сумел. Оценивая же состоявшуюся дискуссию между учителем и учениками, можно вспомнить высказывание А. С. Пушкина, сделанное им за 100 лет до этого и продиктованное желанием защитить патриарха русской словесности, писателя И. И. Дмитриева, на которого ополчились молодые его последователи. «Не гоже, — возражал им Пушкин, — кусать груди кормилицы нашей».

В 1933-36 годах чисто научная активность А.Ф.Иоффе существенно понизилась, несомненно, под влиянием постигшей его неудачи. В этот период он публиковал не более трех физических работ⁴. В основном они относились к новой тогда области физики, развитие которой связано с именем Иоффе — физике полупроводников.

Можно говорить о трех типах научных работ. Первый из них, даже если речь идет о крупных научных достижениях, осуществляется без непосредственной связи с техникой и государственными структурами. Эти работы можно отнести к области чистой науки. Другой тип или задумывается и выполняется с перспективой их технического применения, или потом, независимо от планов авторов, находит такое применение. Наконец, некото-

⁴Здесь мы не учитываем его многочисленные выступления в печати по всякого рода организационным вопросам, а также научно-популярные статьи.

рые работы оказываются затянутыми в тугой узел чисто человеческими отношениями. (Вспомним, например, о такого рода отношениях, сложившихся между Исааком Ньютоном и Робертом Гуком, или между Людвигом Больцманом и его оппонентами Эрнстом Махом, Иоганном Лошмидтом и Эрнстом Цермело, или, наконец, большую главу истории русской науки — работы А. С. Попова по беспроволочной телеграфии и конфликт с Гульельмо Маркони.)

Цикл работ Иоффе по физике диэлектриков, о которых было здесь рассказано, на разных этапах включал в себя все эти три составляющие. Сначала, с 1902 по 1916 год они представляли собой пример чисто физических исследований. В середине 20-х годов его работы этого направления, связанные с предшествующими, могут служить примером исследований второго типа. Иоффе получил поддержку государственных структур, вовлек себя самого в тесные и ответственные отношения с промышленностью, вложившей большие средства в его исследования и имевшей право требовать от него их оправдания. И, наконец, в этих работах проявилась третья характерная особенность.

А.Ф.Иоффе, известный ученый с мировым именем, выдвинул необычную идею. Она нуждалась в экспериментальной проверке. Обсудив со своими молодыми сотрудниками способы ее подтверждения, приняв на первых этапах непосредственное участие и получив обнадеживающие результаты, он предоставил своим сотрудникам самостоятельное ведение соответствующих работ. Подтвердив его соображения, последние в какой-то мере «утратили бдительность», допустили, если называть вещи своими именами, грубую экспериментальную ошибку. Тем самым, они «подставили» своего учителя и руководителя. У Иоффе были, казалось, основания обидеться на них, поменять к ним свое отношение, если не на враждебное, то на настороженное. Этого не случилось, И. В. Курчатов и ранее был, и потом оставался, несомненно, самым любимым учеником Иоффе. Иоффе продолжал поддерживать и П. П. Кобеко, также «приложившего руку» к тонкослойной изоляции.

Напротив, с чисто человеческих позиций и исходя из прису-

шей обычным людям слабостям, можно было бы ожидать, что Иоффе не простит А. П. Александрову опровержение взлелеянной им идеи. Но этого тоже ни в коей мере не случилось — он продолжал поддерживать Александрова во всех его начинаниях и работах последующего времени.

Заключая, можно отметить еще один пример «дальнедействующего» воздействия работ по тонкослойной изоляции на одного из принявших в них активное участие — И.В.Курчатова. Неудача с этими работами, надо думать, оказала сильное влияние на стиль его дальнейших исследований и приучила быть исключительно осторожным в выводах. Интересно, что однажды такая осторожность обернулась и сильным разочарованием. Увлечшись многочисленными проверками и перепроверками своих работ по селективному (резонансному) поглощению медленных нейтронов легким изотопом урана, Курчатов запоздал с отправкой своих результатов в печать и потерял приоритет в открытии этого важного в ядерной физике эффекта. Контрольные опыты, проводившиеся по его настоянию Г.Н.Флеровым и К.А.Петржаком, открывшими явление спонтанного деления ядер урана, также были долгими и тщательными. К счастью, здесь приоритет важнейшего открытия отечественной физикой утерян не был.

Литература

- [1] *Hurtig H.E.* The apparent transmission of low velocity electrons through aluminium foil. // *Phys. Rev.* 1925. Vol. 25. P. 112; *ibid.* 1926. Vol. 26. P. 221.
- [2] *Kurchatov I. V., Sinelnikov K. D.* On the transmission of low velocity electrons through thin metallic foils. // *Phys. Rev.* 1926. Vol. 28. P. 367.
- [3] *Ioffe A. F., Kurchatov I. V., Sinelnikov K. D.* On the electrical strength of dielectric. // *Acad. Sci. USSR Doklady (ser. A).* 1927. No 4. P. 65; *Ioffe A. F. II Phys. ZS. d. SU* 1932. Vol. 1. S. 155.
- [4] *Landau L., Rosenkevitch L.* // *Idem* Vol. 2. S. 200.
- [5] *Landau L., Rosenkevitch L.* Über die Theorie des elektrischen Durchschlages von A. Ioffe. // *Z. Phys.* 1932. Vol. 78. S. 847.
- [6] *Александров А. П., Иоффе А. Ф.* К вопросу об электрической прочности тонких пленок. // *ЖТФ.* 1933. Т. 3. С. 32.
- [7] *Изв. АН СССР (сер. физ.).* 1936. № 1-2.