

О НАИНИЗШЕЙ ТЕМПЕРАТУРЕ, ДОСТИГНУТОЙ ДО НАСТОЯЩЕГО ВРЕМЕНИ ¹⁾.

Г. Камерлинг-Оннес.

Введение. Когда мы подходим к рассмотрению вопроса о производстве холода при помощи сжиженных газов и об использовании его для лабораторных исследований, то у нас, помимо изучений свойств тел при низких температурах и способов измерения этих температур, выступают на первый план две задачи. Первая из них касается устройства таких приспособлений, которые позволяли бы производство опытов и измерений в пределах всех до сих пор нами достигнутых температур, а вторая — спуститься до температур нам еще не доступных.

Не останавливаясь детально на первом пункте я считаю нужным подчеркнуть, что истинной характеристикой Лейденской лаборатории является состав ее служебного персонала и ближайших помощников, который мог сформироваться только при продолжительном ее функционировании ²⁾. Благодаря непрерывному контакту с точными исследованиями в различных областях экспериментальной физики, усваивая постепенно новые усовершенствования способов производства этих исследований при все более и более низких температурах, этот персонал приобрел традиции, позволяющие приложить всего приобретенного опыта и привычек к разрешению новых проблем самого разнообразного свойства. Таким путем лаборатория с ее персоналом осуществляет то, что все более и более становится целью стремлений международной науки. Современная

¹⁾ Речь, произнесенная перед дискуссией по вопросу о получении и применении холода, организованной Фарадеевским Обществом в Лондоне. *The generation and Utilisation of Cold; A general Discussion. Trans. of the Faraday Society, № 53. Vol. XVIII. Part 2.*

²⁾ Подробное описание Лейденской Лаборатории дано Камерлинг-Оннесом, например, в Побелевской речи, имеющейся в русском переводе (Вопросы Физики, 1914 г. стр. 219). Следует помнить, что в Лаборатории Камерлинг-Оннеса применяется каскадный метод Иккеса: Жидкий газ, получаемый при посредстве предшествующего цикла сам служит для охлаждения последующего. Для получения жидкого гелия, например, протекать циклы со следующими веществами: Хлористый метил (-90°), этилен (-145°), кислород (183°), воздух (-190°), водород (-255°).

наука требует специализации во многих ее областях. Исследователь, работающий в определенной области и желающий произвести некоторые опыты при низких температурах, например,—температурах достигаемых при употреблении жидкого водорода, найдет для себя существенную помощь, если воспользуется услугами персонала, хорошо знакомого с работами в области низких температур. Он сможет сосредоточить все свое внимание на экспериментах, непосредственно его интересующих, не отвлекаясь к приборам для получения низких температур, которые сами по себе достаточно сложны; таким образом, благодаря помощи этого опытного персонала, обращение с жидким водородом становится настолько простым, как если бы это был не жидкий водород, а например, вода. Число задач, подлежащих разработке в этой области, возрастает чуть не с каждым днем.

Когда я решился около 40 лет тому назад начать работать с низкими температурами, я, конечно, был убежден, что такая работа должна дать важные результаты в деле изучения свойств материи. Но то расширение и та важность, какую скоро приобрели работы в этом направлении много превзошли все мои предположения. В то время как умеренные количества жидкого воздуха были доступны для занимавших меня тогда исследований, возникла скоро необходимость произвести измерения с жидким водородом. Но, прежде чем водород был сжижен, был открыт гелий, и это вещество оказалось впоследствии способным далеко раздвинуть предел температуры, даваемой водородом. И далее, прежде чем гелий был сжижен, открытие Планком кванта сообщило совершенно новый взгляд на работы при низких температурах. После сжижения гелия открытие сверхпроводимости тел указало совершенно новое поле для исследования. Таким образом здесь возникали постоянно новые задачи, число которых все увеличивалось и которые могли найти свое решение скорее всего в Лейденской лаборатории. Хотя я с большим удовлетворением буду приветствовать сжижение гелия во вновь устраиваемых криогенных лабораториях, я все же думаю, что международный интерес Лейденской лаборатории будет неослабно возрастать и в будущем.

Для сегодняшнего доклада выступает на первый план одна важная задача, на которую я уже указывал, это—задача о расширении предела низших температур для наших исследований.

Поэтому я прошу разрешения сделать предварительный обзор опытов, направленных к осуществлению самой низкой до сих пор достигнутой температуры.

2. Первые опыты. Как только попытки сжижения гелия увенчались успехом, были, конечно, сделаны попытки добиться также его обращения в твердое состояние. Эти попытки были даже произведены в тот самый день, когда гелий в первый раз был виден в жидком состоянии. Метод состоял в испарении жидкого гелия под пониженным

давлением. Рис. 1 дает схему прибора, в котором гелий впервые был виден в жидком состоянии и того аппарата, при помощи которого было достигнуто его сжижение. После предварительного надлежащего охлаждения, сжатый гелий проходит через спираль холодильника, в котором он охлаждается до температуры водорода, испаряющегося под пониженным давлением воздушного насоса. Будучи охлажден до этой

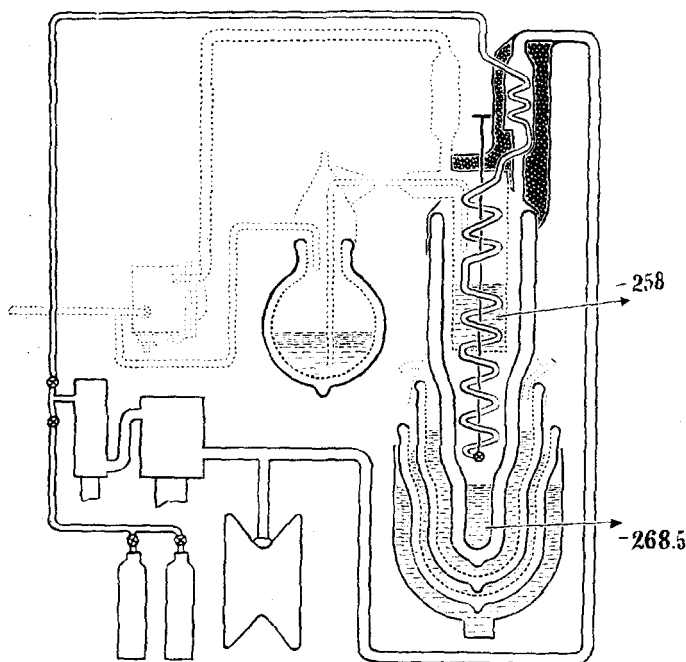


Рис. 1.

чрезвычайно низкой температуры, он входит в спираль собственно - холодильника, конец которой снабжен отверстием с винтом. Здесь он расширяется: часть его сжижается процессом Линде, и газ возвращается между витками только что названного спирального холодильника, при чем пары несконденсировавшегося гелия, при помощи насоса собираются в гасгольдер, а затем снова сжимаются насосами. Жидкий гелий собирается на дне сте-

клинного вакуум-сосуда ожидателя, где легко можно видеть его накопление. Для этой цели дно этого сосуда оставлено непокрытым, сам он окружен тремя другими Дьюаровскими сосудами, из которых первый содержит жидкий водород, второй, — жидкий воздух и в третьем циркулирует алкоголь при обыкновенной температуре; это последнее приспособление служит для того, чтобы сосуд с жидким воздухом не покрывался инеем от осаждения на нем паров воды из атмосферы. В начале опыта, в котором имелось в виду произвести отвердевание гелия испарением его жидкости, вентиль был заперт, и воздушные насосы остановлены. Пары гелия, выделяющегося из жидкости на дне вакуум-сосуда ожидателя, проходили под атмосферным давлением в гасгольдер, при чем было видно, что жидкий гелий кипел спокойно.

Чтобы затем произвести испарение гелия при пониженном давлении достаточно было прекратить сообщение его с гасгольдером и

пустить в ход компрессоры, которые теперь должны действовать как вакуум-насосы. Объем насосов оказался достаточно велик, чтобы удалять пары так быстро, что температура была значительно понижена, и когда их действие было усилено присоединением еще нового сильного вакуум-насоса, то давление понизилось до 1 см. но гелий все же оставался при этом жидким.

В то время было невозможно идти дальше в этом направлении, так как тогда можно было сделать только импровизированное присоединение аппарата к сильному вакууму-насосу. В 1909 году опыт был повторен после того, как надлежащие приготовления для этой цели были сделаны; упомянутый Буркхардов вакуум-насос, емкостью в 360 м³ в час, мог при этом развить всю свою мощь. Но и тут оказалось, что, несмотря на понижение давления до 2 мм, гелий все же не отвердевал. Хотя жидкость при этой низкой температуре потеряла свою способность стоять у стенок стекла с резкими границами наподобие лезвия ножа и обнаруживала теперь обычное свойство капиллярности, однако, ее удивительная подвижность сохранилась. Для получения твердого гелия такой результат был обескураживающим. Но, с другой стороны, это указывало на то, что область температур, в которой свойства тела могли быть исследованы, при помощи жидкого гелия, расширялась дальше, чем можно было надеяться по аналогии с другими газами, обладающими низкими критическими температурами, и в этом смысле результат был утешительный, потому что очень трудно получить постоянные и однородные температуры при помощи какого-либо вещества ниже точки его плавления. С гелием затруднения были бы столь велики, что температура его отверждения должна считаться предельной, ниже которой им было бы невозможно пользоваться. Поэтому за немением еще более летучего вещества, здесь был бы положен предел для научного исследования. Все время пока с дальнейшим понижением давления паров гелий продолжал оставаться жидким, эта неудача опытов с обращением гелия в твердое состояние являлась выигрышем: новая область температур, особенно важная в виду ее крайнего положения, делалась таким образом для нас доступной.

§ 3. Усовершенствования в гелиевом криостате и цикле¹⁾. По счастью можно было получить значительно более низкую температуру, чем говорилось выше, но мы достигли скоро такой точки, при которой малая плотность паров ставит нам новый предел, ниже которого мы не можем спуститься. Я остановлюсь теперь на опытах, которыми для жидкого гелия было достигнуто понижение до этого предела.

¹⁾ Здесь я должен с благодарностью упомянуть о том значительном увеличении запаса гелия, какой я получил от американского министерства мореплавания (Navy)—30 м³ и от профессора Мак-Ленана—6 м³.

Этот прогресс шел, однако, постепенно, пока в ногу с правильным развитием лаборатории, и последние этапы были возможны только после значительных усовершенствований в приспособлениях для достижения этих низких гелиевых температур. Важное усовершенствование было достигнуто, когда нам удалось перенести жидкий гелий из аппарата, в котором он был

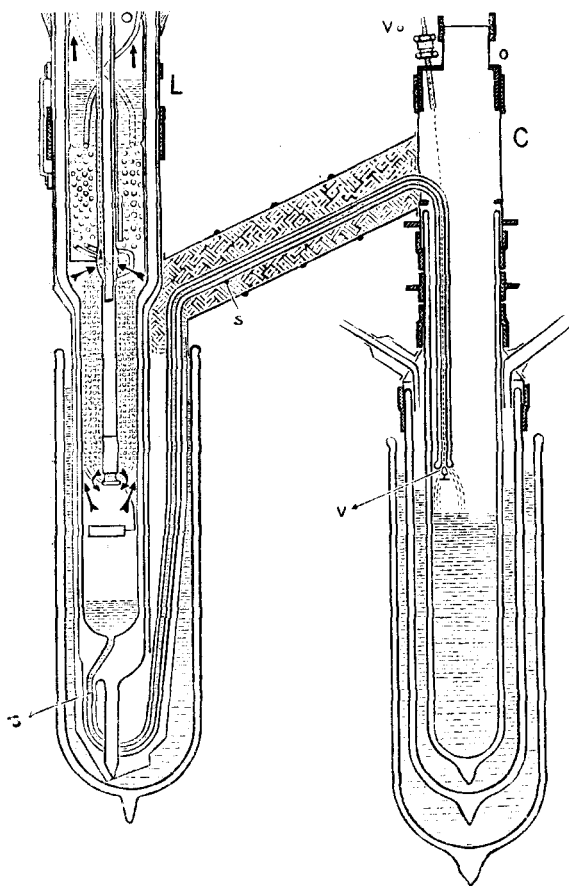


Рис. 2.

сжижен в криостат, в котором, подобно другим сжиженным газам, им можно было пользоваться обыкновенным способом в качестве ванны для низких температур. Криостат *C* оставался еще тесно связанным с прибором для сжижения *L* (рис. 2), но пространство в криостате, доступное для опытов, теперь не было стеснено наверху спиральным холодильником, как в прежнем аппарате. Разные приспособления могли быть внесены в криостат сверху через крышку (ср. рис. 5*b*), тогда как ванна, окружающая аппарат, с которым производится исследование, могла быть получена переливанием гелия при помощи сифона из сосуда для сжижения в криостат. Такие криостаты

употреблялись уже во многих исследованиях над свойствами веществ при очень низких температурах, особенно в области электричества и магнетизма. Рис. 3¹⁾ показывает аппарат вместе со схемой усовершенствованной циркуляции гелия; в эту схему и был введен такой криостат. Гелий, который сжижается, выходя через вентиль *k* спирального охладителя, собирается в нижней части вакуум-сосуда ожидателя, как в первоначальном аппарате. Однако дно этого сосуда не запаяно, но

¹⁾ Отчасти схематический, отчасти показывающий только относительные размеры частей.

продолжается в виде сифонной трубки s (рис. 2) с двойными высеребренными стенками, а сифон заканчивается вентилем v . Когда этот вентиль закрыт, вновь образующийся гелий собирается в вакуум-сосуде ожидателя. При открытии вентиля v_0 (рис. 2 и 5), жидкий гелий может поступить в криостат. Самый криостат состоит из непосеребренного вакуум-сосуда, в котором собирается жидкий гелий. Этот сосуд окружен другим вакуум-сосудом. При его серебрении были оставлены непо-

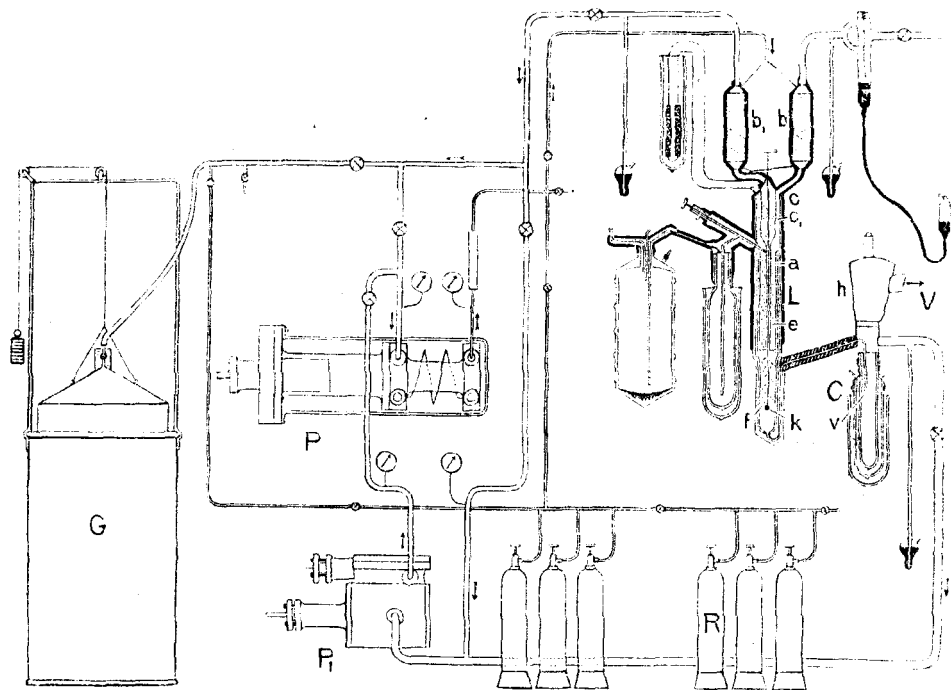


Рис. 3.

крытыми две противоположно стоящие полоски, чтобы видеть, что делается в сосуде с гелием (ср. рис. 56). Второй вакуум-сосуд окружен третьим, посеребренным таким же образом и содержащим жидкий воздух. Пары гелия, выделяющиеся из криостата и ожидателя, поступают в насосы P_1 и P (рис. 3), назначение которых следующее: когда циркуляция функционирует, пары перегоняются в ожидатель и пополняют здесь запас жидкого гелия. При помощи такой циркуляции процесс сжижения гелия продолжается непрерывно, все время, пока производится интересующие опыты в ванне из жидкого гелия в криостате. Как только гелий испарился в значительной мере из криостата, тотчас в последний впускается новая порция гелия в желаемом количестве.

Усовершенствование в работах с гелием, достигнутое разделением криостата от ожидателя, сопровождалось также усовершенствованием самого ожидателя, что привело к более быстрому приготовлению жид-

кого гелия и в то же время к более экономному расходованию жидкого водорода. Главная часть улучшения состояла в более совершенном использовании доступного холода. Гелий, после того как он сжат до

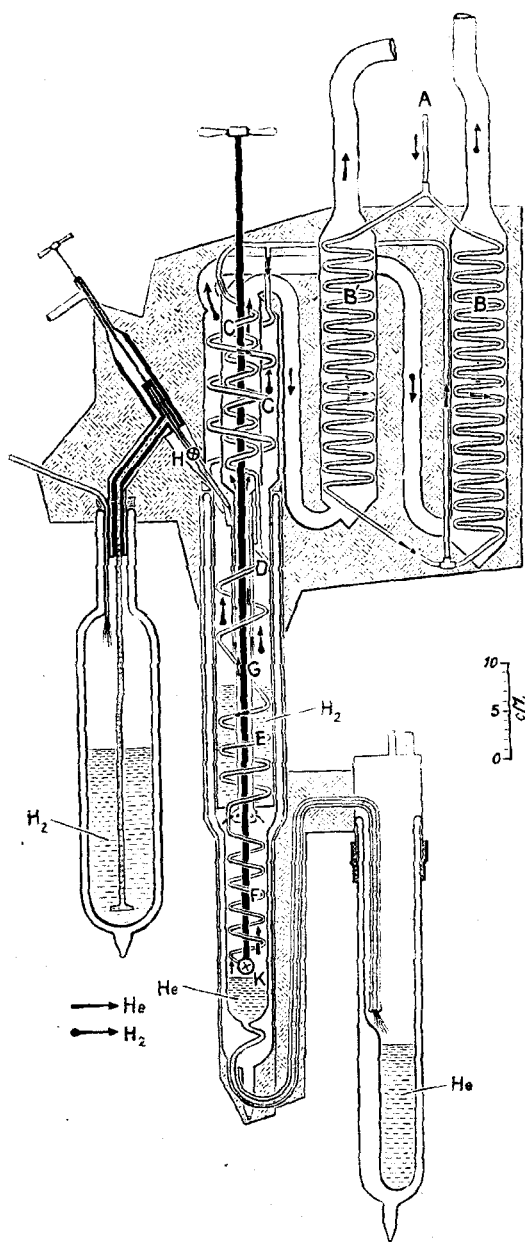


Рис. 4.

3) атмосфер, разделяется между двумя спиралями *B* и *B'* (рис. 4¹) которые опять соединяются, проводят гелий через трубу, содержащую уголь, охлаждаемый жидким воздухом, и затем снова разделяются на спирали *C* и *C'*. Спирали *B* и *C* охлаждаются холодным водородным паром, идущим из жидкого водорода в холодильнике, а *B'* и *C'* охлаждаются холодным гелиевым паром, поступающим из ожиждителя. Обе спирали много длиннее, чем в первом ожиждителе; они соединяются вместе и образуют спираль *D*, которая сначала охлаждается водородными парами, окружающими *D*, а затем жидким водородом, окружающим *E* и переходит в холодильную спираль *F*, заканчиваясь вентилем *K*, как и в первоначальном ожиждителе.

Помимо получения этим путем более совершенного действия ожиждителя, сама емкость циркуляции была увеличена введением двух больших компрессоров *P* и *P*₁, которые в то же время могут работать, как вакуум-насосы.

Таким образом в новом криостате целыми часами

¹) Соответствующие части на рис. 3 обозначены теми же, но малыми буквами *b*, *b'*, и т. д.

можно иметь в своем распоряжении ванну жидкого гелия, испаряющегося при давлении 3 мм, емкостью около 500 см³. Можно было в этих условиях производить в широких размерах опыты при температурах, достижение которых в прежних опытах с жидким гелием едва могло быть продемонстрировано. Такой криостат с ванной, чрезвычайно низкой температуры, применялся с большим успехом в опытах дальнейшего охлаждения гелия своим собственным испарением. Прибор для испарения (рис. 5), в котором гелий был охлажден до самой низкой температуры, какая когда-либо была достигнута, состоит из вакуум-сосуда *a* с двойными стенками (рис. 5а) содержащего гелий, когда он охлажден возможно сильно и из широкой отводящей трубки *b* для газа, образованного испарением. Сосуд для испарения погружен в сильно охлажденную ванну с гелием криостата *C*. Газ, выходящий через трубку *b*, оставляет криостат через крышку *h*, соединенную с мощными вакуум-насосами *F* (рис. 6). Ясно, что эти насосы не только должны производить вакуум высокой степени, но в то же время должны обладать весьма большой емкостью при давлении этого вакуума, ибо газ образованный испарением, будет занимать большой объем при атмосферной температуре и при низком давлении пара. Точно так же ясно, что цель может быть достигнута только, если криостат позволяет этим большим объемам газа уходить через широкие, выводющие трубки, как оно и есть в нашем аппарате. Если трубки, по которым движется газ, не очень широки или не находятся при очень низких температурах, то движение газа при низких давлениях требует разниц давлений такого же порядка, как и те, при которых сам газ откачивается. Эти разницы могут составлять значительную часть того давления, при котором происходит испарение гелия.

§ 4. Временная остановка. Эти два соображения уже показывают, что большие требования должны предъявляться к аппаратуре для такого рода опытов и особенно по отношению к емкости вакуум-насосов, если имеем в виду достичь очень низких давлений. В 1910 году был произведен первый опыт в этом направлении, основанный на выше описанном принципе, но с недостаточными средствами. Несмотря на то, что криостат обладал некоторыми недостатками, благодаря одной благоприятной случайности, был достигнут более низкий предел для давления пара, чем в 1909 году. Хотя этот результат не мог быть получен снова при повторении опыта с прибором, устроенным так же, как и в первом опыте, однако, не оставалось никакого сомнения, что давление пара может быть понижено весьма значительно против 2,2 мм без обращения гелия в твердое состояние и что при давлении в 0,2 мм он по всей вероятности должен оставаться жидким. Это значит, что для обеспечения дальнейшего прогресса в этом направлении должно предъявить к аппарату гораздо более высокие требования, если не хотим довольствоваться минимальным давлением 2,2 мм. Так прошло несколько лет, прежде чем можно было думать о понижении

предела ниже случайно достигнутого в 0,2 мм. Эта задача была отложена в сторону, и было приступлено к решению других проблем, более важных для данного момента и более доступных к разрешению при существующих средствах лаборатории. Таков, например, вопрос о сверх-

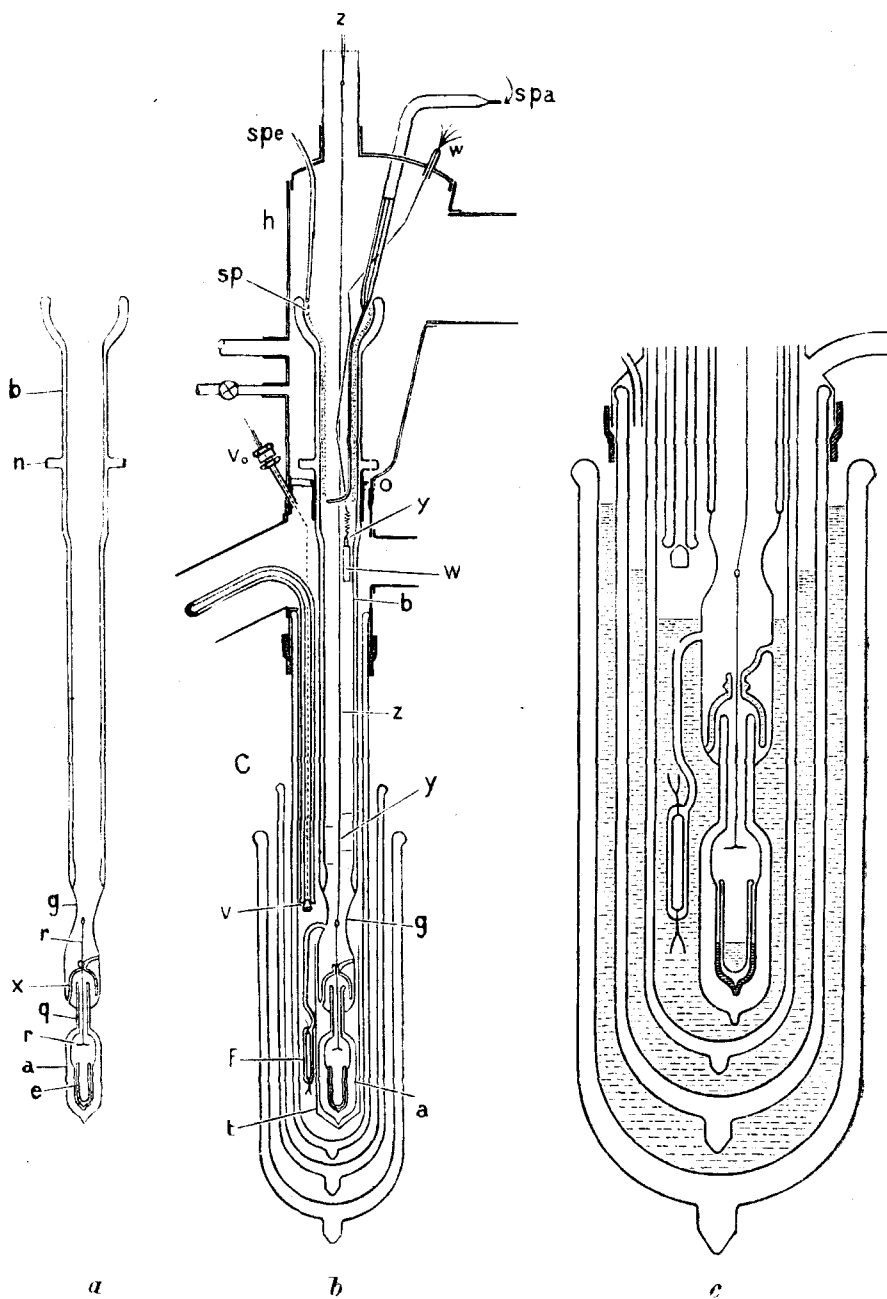


Рис. 5.

проводимости, о предельной величине магнитного поля, при которой обыкновенное сопротивление возникает в сверхпроводнике. Самая низкая полученная температура оставалась та, которая соответствует давлению пара 0,2 мм. Я оценивал эту температуру около $1,15^{\circ} K$ ¹⁾. Принимая во внимание ненадежность этой оценки, было бы осторожнее сказать, что в понижении температуры мы приблизились к $1^{\circ} K$. По мере того, как работы с гелием все более подвигались вперед, становилось все более и более необходимым добиться дальнейшего понижения предела давления против 0,2 мм, а также особенно выяснить вопрос о возможности понижения температуры ниже $1^{\circ} K$. Наконец к этой задаче снова можно было приступить в 1919 году, когда затруднения, связанные с войной и с кризисом, были преодолены.

§ 5. Новая попытка. Тогда впервые для удаления гелия из испарительного прибора был пущен в ход большой вакуум-насос Бурггардта V_B (рис. 6) емкостью 360 м^3 в час, который сочленялся в ряд с насосом V_A , 18 м^3 вместимости и с Сименсовым насосом V_3 , вместимости 2 м^3 . Устройство и действие большого насоса V_B было таково, что для газа из смазочного масла не представлялось никакой возможности поступать в вакуум. Кроме того, клапаны, которые в начале держались закрытыми посредством пружинки, пока газ своим собственным избытком давления не приподнимал их и не перетекал из цилиндра к выводной трубе, теперь открывались и закрывались механическим приспособлением в надлежащий момент для выравнивания давления в обоих пространствах. Впрочем, впоследствии клапаны на стороне давления были совсем устранены, и это пространство было прямо присоединено к засасываемому пространству вспомогательного насоса. С таким улучшением в действии насосов, благодаря которому удалось предельное засасываемое давление понизить до 0,04 мм (в лучшем случае до 0,025 мм) и с сосудом для испарения, который, хотя и не был так хорош, как в опытах, которые будут описаны ниже, удавалось все же откачивать в час около 2,7 литров газа (при нормальном давлении и температуре). При этом засасываемое давление в верхней части криостата было доведено до 0,1 мм.; отсюда был сделан вывод, что давление испарения было опять понижено против того, какое было достигнуто в 1910 году; может быть, его можно оценить в 0,15 мм. Когда давление спустилось до этой величины, то не было замечено никакого дальнейшего изменения в характере испарения, очевидно следствие наступления равновесия между притоком тепла и его убылью от испарения. И здесь гелий не затвердевал, и, следовательно, предел для давления должен быть еще более понижен, что, в свою очередь, вызывало повышенные требования к последующим опытам.

¹⁾ K (Kelvin)—символ градусов абсолютной шкалы температур.

§ 6. БАТАРЕЯ ИЗ КОНДЕНСАЦИОННЫХ ВАКУУМ-НАСОСОВ. Реальный прогресс мог быть достигнут только с выполнением давно желанного плана, именно с построением целой серии вакуум-насосов большой емкости, дающих крайние степени разрежения. Эту цель предполагалось осуществить устройством большого числа Лангмюровых конденсационных насосов, соединенных параллельно. В 1920 году был

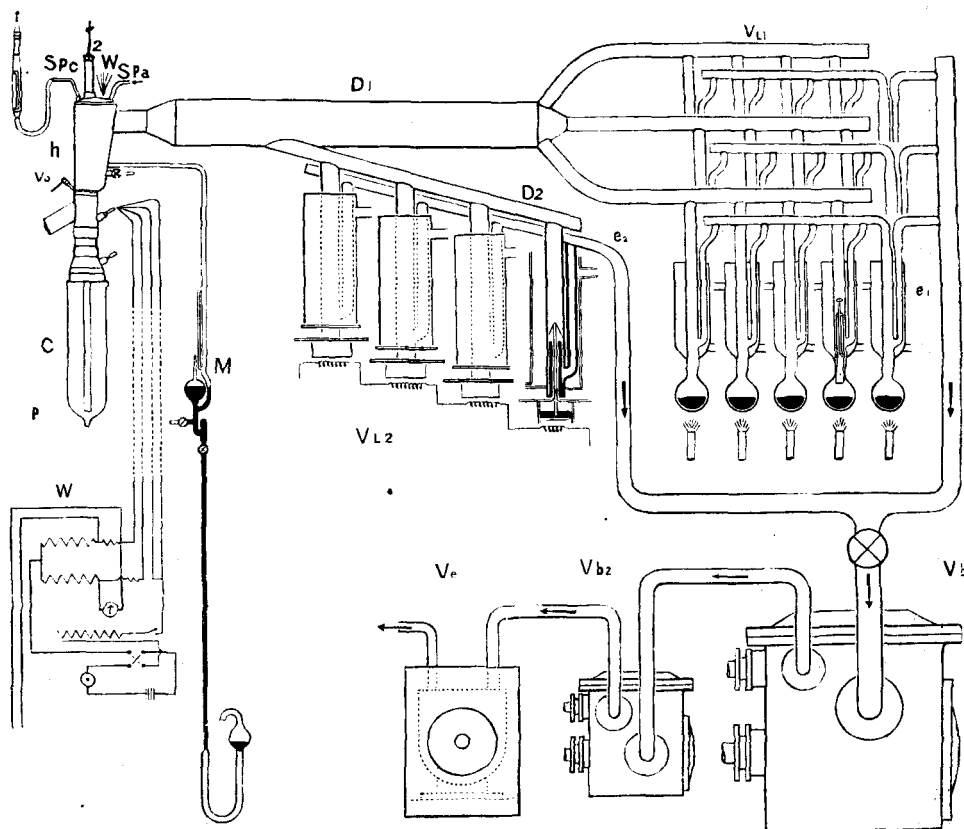


Рис. 6.

сделан первый шаг к осуществлению этого плана, и с тех пор батареи таких насосов постоянно увеличивались. В опытах, описываемых сегодня, такая батарея возрасла (рис. 6) уже до двенадцати стеклянных V_1 и до шести железных Лангмюровых насосов, соединенных параллельно в одно целое. Буркгардовские насосы, соединенные попрежнему в ряд, служили в качестве вспомогательных насосов. Все это видно на схематическом рисунке 6.

Батарея из двенадцати стеклянных насосов состоит из трех серий по четыре насоса, при чем каждая серия имеет еще как бы вспомогательный насос Лангмюра (рис. 6) прежде присоединения

ее к настоящему вспомогательному насосу, состоящему из комплекта Буркгардовских насосов. В этой батарее ртуть конденсационных насосов нагревается газом. Так как горение недопустимо в таком помещении, как отделение для опытов с гелием, то батарея насосов помещается в небольшой отдельной комнате, устроенной в том же помещении. Комната, содержащая батарею, проветривается внешним воздухом при помощи вентилятора, который поддерживает поток воздуха через щели в стенах в отделение с гелием ¹⁾. Все соединения в стеклянных насосах делались с помощью спайки. Различные серпигазы вмазывались в медные засасывающие трубы, которые соединялись в главной трубе D_1 в 12 см диаметром. Поскольку медные трубы не припаивались одна к другой, они соединялись между собою при помощи замазки, совершенно так, как главная труба была соединена с шлемом аппарата для испарения. Единственное соединение каучуковыми трубками было допущено в соединении трубок, идущих от вспомогательных Лангмюровых насосов к сосущей трубе Буркгардовского насоса V_{b1} . Все медные трубки были, кроме того, лакированы.

Вообще железные насосы для крайних разрежений не так хороши, как стеклянные, но они достаточно хороши, чтобы получить те высокие степени вакуума, с какими нам приходилось иметь дело. Они нагреваются электрически, и надо постоянно иметь в виду, чтобы ни одно из соединений при помощи замазки не испортилось. Но я не хочу более останавливаться ни на этих деталях, ни на тех неожиданностях и неудачах, с которыми по необходимости постоянно приходилось встречаться в описываемых работах.

При помощи батареи насосов, с которой я теперь работаю, при давлении в 0,035 мм. на сосущей трубе испарительного аппарата была, в конце концов, достигнута, емкость в один литр (при норм. условиях темп. и давл.) в один час удаленного газа, что соответствует количеству испаренного жидкого гелия равному $1,25 \text{ см}^3$, при температуре 2° K .

§ 7. УМЕНЬШЕНИЕ ДО МИНИМУМА КОЛИЧЕСТВА ТЕПЛОТЫ, СООБЩАЕМОЙ ИСПАРЯЮЩЕМУСЯ ГЕЛИЮ ЧЕРЕЗ ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ. Большая емкость вакуум-насосов может быть тем лучше использована, чем лучше испаряющийся жидкий гелий защищен от притока теплоты и чем более ослаблено сопротивление трения на пути пара гелия от испаряющейся поверхности к насосам. Однако, оба эти требования очень трудно выполнить одновременно в испаряющем аппарате: более широкая отводная труба будет, конечно, уменьшать трение, но в то же время она дает место и более сильному притоку тепла к гелию через стеклянные стенки и особенно через теплопроводность в колонне самого газообразного гелия в трубе. Оба требования были по-

¹⁾ В случае необходимости все газовые горелки могут быть сразу потушены.

возможности удовлетворены устройством испаряющего аппарата (рис. 4), который употреблялся в последних опытах в 1920 и 1921 гг. (для объяснения некоторых деталей в конструкции см. также § 9 и 10). Кроме малого сосуда испарителя *a*, с двойными стенками и с безвоздушным пространством между ними, и подобной же выводящей трубки *b*, в которой пространство между двойными стенками может быть выкачено через кран, мы замечаем еще часть *g* с простой стенкою. Последняя служит для введения при помощи особого искусственного приема жидкого гелия в сосуд-испаритель *a*.

Для этой цели жидкий гелий вводится в пространство, соединенное с насосами для производства наивысшего вакуума, т. е. в испаряющий аппарат, в трубу, соединяющую его с насосами и в самые насосы, в то время как они были остановлены. Таким образом в этом пространстве давлению было предоставлено возрасти выше давления паров в ванне криостата, и тогда внутри аппарата гелий стекал по стенкам в его нижнюю часть. Если пустить опять в ход вспомогательные насосы, то испарение под пониженным давлением начинается снова и продолжается до тех пор, пока в сосуде испарителя не останется только требуемое количество гелия, которое здесь охлаждается далее вследствие полной его защиты от притока тепла. Чтобы произвести еще дальнейшее охлаждение пускаются, наконец, в ход насосы высшего вакуума, и тогда уже может быть начат предположенный опыт. Давление наверху испаряющего аппарата, при котором совершалось засасывание, измерялось манометром Мак-Леода (М—рис. 6). Особые старания были приложены к тому, чтобы устранить приток тепла к гелию в испарителе через теплопроводность или через лучеиспускание. Необходимо также обратить внимание на излучение теплоты теми частями аппарата, которые оставались при обыкновенной температуре, напр., от шлема над выводящей трубой, по которой испаряющийся гелий удалялся. Порядок величины этой радиации может быть оценен через сравнение с черным излучением с плоской поверхности ($4,8 \cdot 10^{-9} T^4 \text{ gcal. в } 1 \text{ час. и с } 1 \text{ см}^2$). Подставляя в это выражение величину обыкновенной температуры получаем 30 gcal. , которых, ввиду малости теплоты парообразования гелия—около 6 cal. —достаточно, чтобы испарить количество жидкости, занимающей объем в 30 литров, при нормальных *T* и *P* в газообразное состояние. Однако весь комплект насосов рассчитан на удаление при рассматриваемых давлениях только количества газа, соответствующего 1 литру при норм. *T* и *P*. Поэтому необходимо, чтобы радиация к сосуду-испарителю принималась как можно больше непрозрачными металлическими экранами, охлажденными до низких температур, лучше всего—до температуры гелиевой ванны в криостате. Излучение от экранов, охлажденных в такой мере, ввиду его зависимости от 4-й степени температуры, настолько мало, что им можно пренебречь. Защита от радиаций, падаю-

щих сбоку на стенки сосуда-испарителя может быть особенно легко осуществлена: вся нижняя часть этого сосуда окружается металлическим колпаком, верхняя часть которого простирается за поверхность жидкого воздуха в криостате. В колпаке оставлены были открытыми две щели, чтобы сделать видимым испаряющий сосуд через непосеребранные полосы вакуум-сосудов. Обыкновенно щели остаются закрытыми двумя экранами, которые могут вращаться вокруг колпака. Их отодвигают только когда надо наблюдать положение уровня жидкости; для освещения употребляют лампочки с металлической нитью, помещенной позади раствора из квасцов. Для устранения переноса теплоты сверху путем лучеиспускания в сосуд-испаритель было устроено приспособление, исполненное главным стеклодувом нашего отделения, Кессельрингом (Kesselring), представляющее собою верх стеклодувного искусства. Над испаряющим сосудом *a* впаян в стекло колпачок с двойными стенками, коего промежуточное пространство присоединено к вакуум-трубе. Гелий, находящийся в криостате, втекает в это промежуточное пространство, верхняя часть которого зачернена, а нижняя посеребрена. Радиация сверху может проникать только путем отражения вдоль стенок этого колпачка. Далее, перенос тепла сверху был сведен до минимума сужением одностенной средней части настолько, насколько позволяла прочность аппарата и количества протекающего пара. Затем экраны *y*, охлаждаемые восходящим газом и другими способами, о которых речь будет дальше, были так помещены в выводящей трубе, чтобы они не мешали свободному выводу пара. Внутренние стенки выводной трубы были зачернены смесью сажи с раствором целлулоида, для уменьшения отражающей способности. Наконец той же цели служит и спираль *Sp*, которая была введена вверху трубки и через которую прогонялся жидкий водород; ею удалялась часть теплоты, которая иначе распространялась бы вниз по стенкам. Еще в другом отношении было использовано искусство нашего стеклодува при устройстве испарительного аппарата. Как мы видели, выводящая труба имеет также двойные стенки в верхней части, которая была посеребрена и эвакуирована, между двойными стенками. Натяжения, возникающие в стекле, благодаря большой разнице температур между внутренними и внешними стенками, устраняются металлической коробкой *n*, припаянной к стеклу и играющей роль пружины. Теплота, переносимая сверху стенками через сужение к нижней части пробки, принимается ванной криостата¹⁾, так так уровень жидкости в криостате, поддерживается всегда выше сужения *g*. Это приспособление имело целью достичь того, чтобы температура гелиевого газа над испаряющим сосудом не была заметно выше температуры ванны.

¹⁾ Теплота, таким способом отвлеченная к ванне, не имеет заметного влияния на скорость испарения, а, следовательно, и на время, в течение которого может продолжаться опыт.

Горло сосуда, в котором происходит испарение под очень низким давлением, было длинное и узкое, во-первых, для того, чтобы по возможности уменьшить приток тепла через стекло, при чем малый радиус позволял сделать внутреннюю стенку очень тонкой, а во-вторых, чтобы сделать скорость, с какой удаляется пар, достаточно большой, так, чтобы быстро уносить теплоту, которая иначе входила бы теплопроводностью по колонне газа гелия. Во всех этих приспособлениях всегда имелось в виду достигнуть предела, при котором неблагоприятные условия трения могли бы себя проявить.

Все сейчас описанные предосторожности принимались с целью по возможности защитить гелий в сосуде-испарителе от притока тепла; благодаря им испарение, измеренное при нормальных условиях, было доведено до 0,9 литра. Засасывающее давление, производимое насосами высокого вакуума в шлеме испаряющего аппарата по показанию Мак-Леода было около 0,0055 мм.

В надежде уменьшения количества стекла, какое, в конце концов должно было быть охлаждено испаряющимся гелием, на дне сосуда испарителя был помещен особый стеклянный вакуум стаканчик *e* с тонкими двойными стенками. При этом предполагалось, что при непрерывном откачивании жидкость в стаканчике будет продолжать испаряться и после того, как жидкость, окружающая его, уже испарилась, так, что условия для охлаждения гелия будут более благоприятны, так как меньше стекла должно охладиться и меньше теплоты будет переноситься по стенкам. Сейчас будет видно, что особенности в ходе испарения производили то, что уровень жидкости внутри и снаружи стаканчика опускался в одинаковой мере. Что касается дальнейшего прогресса в достижении более низких температур, то оказалось, что этот сосуд не оправдал наших надежд.

§ 8. УМЕНЬШЕНИЕ ДО МИНИМУМА СОПРОТИВЛЕНИЙ ТРЕНИЯ НА ПУТИ ОТ ИСПАРЯЮЩЕГОСЯ ГЕЛИЯ К НАСОСАМ. Теперь я перехожу к обсуждению вопроса об уменьшении до минимума сопротивлений трения испаряющемуся гелию на его пути от поверхности жидкости, в испарительном сосуде к насосам высокого вакуума, а, следовательно, к наилучшему использованию низкого засасывающего давления этих насосов. Ширина выводящей трубы могла быть увеличена лишь настолько, насколько это позволяли размеры верхней части шлема криостата *o* (рис. 5*b*). Отверстие в этой части не могло быть расширено без перестройки всего криостата.¹⁾

С наибольшей шириною выводящей трубы, в настоящее время для нас доступною, газ вследствие значительного притока тепла при его подъеме приобретает столь большую скорость, что слишком боль-

¹⁾ Усиленные работы по устройству нового криостата с более широким отверстием верхней части находятся в ходу.

ное трение должно было бы развиться в наших опытах, если бы не было принято особых мер предосторожности. Для этой цели в верхнем конце выводящей трубы была помещена прокладка, которая могла быть сильно охлаждена наружными средствами. Прокладка состояла из медной спирали Sp , через которую пропусклся жидкий водород. Спираль была соединена с Дьюаровым сосудом, наполненным жидким водородом, и жидкость протеснялась через нее под действием небольшого избыточного давления; при чем подача жидкости регулировалась при помощи измерителя скорости течения, показывающего количество испаряющегося водорода. Эта прокладка, будучи таким способом охлаждена, не только ослабляет значительно нагревание пара при его выходе через выводную трубу и способствует ослаблению лучеиспускания, охлаждая различные экраны, но она также берет на себя, как было сказано, часть теплоты, проникающей сверху вдоль стеклянных стенок испаряющего аппарата. При помощи небольшого термометра, устроенного на принципе электрического сопротивления и помещенного, под нижним витком спирали можно всегда убедиться, работает ли это приспособление надлежащим образом. В опытах наилучше удавшихся температура под спиралью спускалась до 200° С. Тогда потеря давления, обусловленная сопротивлением трения, как мы увидим, спускалась до 0,01 мм.

§ 9. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДАВЛЕНИЯ. При определении давления в пространстве непосредственно над уровнем испаряющегося гелия мы пользовались манометром основанным на принципе сопротивления. Давления подобные тем, какие имеют место над поверхностью испаряющегося гелия, слишком малы, чтобы их можно было измерять подходящим ртутным манометром; такому манометру нужно было бы придать очень сложное устройство, но тогда с ним было бы в данном случае очень трудно оперировать. Уже с этой точки зрения манометр с сопротивлением является более предпочтительным. При том трубка манометра может иметь очень малые размеры, и прибор может быть калиброван очень хорошо в пределах давления от 5 до 20 бар. Какой бы манометр ни употреблялся, если пространство манометра находится при обыкновенной температуре, и оно соединено с пространством более низкой температуры узкой трубкой, то давление в манометре не будет равно измеряемому. При низком давлении, при котором происходит испарение гелия, средний свободный путь газовых молекул, по всей вероятности, во много раз больше диаметра трубки, за исключением случая, когда наша трубка поддерживается при очень низкой температуре. Между пространством при низкой и пространством при высокой температурах должна существовать разность давлений, равная термическому молекулярному давлению. Надежда¹⁾, что это затруд-

¹⁾ Leiden Comm. Supl. № 34a.

нение, свойственное измерениям давления при низких температурах, могло быть устранено употреблением манометра с сопротивлением, (т.-е. здесь было возможно держать самую трубку манометра при низкой температуре), к счастью, подтвердилась опытом, произведенным ван-Гулик (van-Gulik). Таким образом давление в испарительном сосуде было определено манометром с сопротивлением, коего манометрическая трубка поддерживалась при температуре только немного выше температуры испаряющегося гелия, так как была погружена в гелиеву ванну вне испарительного сосуда. На рис. 5 *b* и *c* видно, как манометрическая трубка припаяна к нижней части испаряющего прибора; на рис. 6 видно приспособление *W* для измерения давления, изображенное схематически. На первый взгляд кажется сомнительным, может ли быть приложен к столь низким температурам принцип, на котором основан этот манометр, т.-е. изменение сопротивления его проволоки с температурой; ведь здесь не только сопротивление должно упасть до очень малой величины, но оно более и не изменяется с температурой, как это действительно имеет место с платиновой проволокой, охлажденной до температуры жидкого гелия. Но оказывается, что остающееся сопротивление при этой температуре все еще достаточно велико (если возможно малый ток течет через проволоку), чтобы нагреть проволоку до такого предела, когда температура поднимется настолько, что сопротивление начинает заметно возрастать; тогда влияние давления на потерю тепла из проволоки делается доступным для наблюдения по разности токов, потребных для поддержания одного и того же сопротивления. Хотя измерительный прибор, употребляемый таким способом, является скорее указателем, чем измерителем давления, однако, при помощи калибрования, при известных давлениях желаемая цель может быть достигнута. При этом калибровании аппарат был наполнен газообразным гелием в покое, и нижним концом опущен таким же способом, как и в опыте, в ванну с гелием. Верхняя часть, проходящая на верх криостата, оставалась при обыкновенной температуре. Трубка *b* еще недостаточно широка, чтобы сделать ненужной поправку на термическое молекулярное давление между верхней и нижней частями. Точность измеренных величин давления, которые сейчас будут даны, будет увеличена в новых опытах, когда будет устранена неточность, происходящая от того, что поправка была до сих пор только вычислена. Я не буду, однако, останавливаться теперь на этой поправке, которая едва достигает 0,003 мм. Мы будем пренебрегать также разницей, могущей еще существовать между давлением в манометрической трубке и на поверхности жидкого гелия.

§ 10. Приспособление для перемешивания жидкого гелия. Наконец, мы должны упомянуть о маленькой мешалке, *v*, вводимой в испаряющий сосуд *a*. В приборе для испарения показанном на рис. 4, она состоит из горизонтального стеклянного диска, прикре-

шленного к стеклянному стержню. Она может двигаться кверху и книзу посредством проволоки, прикрепленной к стержню, которая проходит сверху через стеклянную трубку, трубка закрывается посредством особой затычки. ¹⁾

§ 11. Окончательные опыты. Для успеха опытов с тем сложным устройством, какое сейчас было описано и общий вид которого дает рис. 6, необходимо, чтобы многочисленные операции были произведены каждая в свое время для нее предназначенное и в правильной последовательности, так что успех всякой операции зависел вполне от старательного ее приготовления. Незначительное осаждение паров на одной из стеклянных стенок, через которые должно производиться наблюдение испарения гелия, достаточно чтобы сделать это наблюдение невозможным; на стенках охлажденных жидким водородом, газ, содержащий хотя бы только следы воздуха, дает его конденсацию. Если сообразить, что необходимо для того, чтобы стеклянные стенки, через которые делалось наблюдение, держать целыми часами прозрачными после введения жидкого гелия в первый раз в криостат, то будет понятно что я весьма обязан Флиму (Flim), шефу технического отделения, за его преданность делу. Благодаря ему все шло в полном порядке согласно плану.

Рано утром началось приготовление 24 литров жидкого водорода, тогда как весь предыдущий день был употреблен, с одной стороны, на эвакуирование аппарата и приведение его в состояние, готовое для работы, а с другой стороны на приготовление достаточного количества жидкого воздуха (более 50 литров). Тем же временем выполнялись следующие приготовления: была приведена в порядок циркуляция гелия; был пущен в ход насос, чтобы уводить водород от ожиждителя гелия при пониженном давлении; затем пространство, предназначенное для жидкого воздуха, служащего для охлаждения водорода, было наполнено, и пространство для жидкого водорода также наполнено после того, как он был охлажден сухим холодным водородным газом. В полдень жидкий гелий мог быть перелит сифоном в криостат, после чего мы приступали к дальнейшему охлаждению этой ванны испарением и новым наполнением при помощи гелиевой циркуляции. В 1 час могла быть начата конденсация гелия в испарительном приборе, и нижняя часть стеклянного испарителя была наполнена несколько выше колпачка двойными стенками, о котором говорилось выше. В 3 часа этот гелий был испарен настолько, что занимал только нижнюю часть испарителя; при этом вначале испарение совершалось при действии вспомогательного комплекта насосов, а впоследствии при соединенном действии насосов высокого вакуума с этим вспомогательными насосами, кото-

¹⁾ В прежних опытах была поставлена пружинка между проволокой и стержнем; кусок алмаза был подвешен с проволоки вместо диска. Если бы гелий затвердел и алмаз встретил бы сопротивление, то пружинка растягивалась бы при движении вверх и вниз.

рые и производят удаление гелия из испарительного аппарата. Испарение наблюдалось поочередно то невооруженным глазом, то телескопом катетометра, при чем экраны вокруг прибора держались по возможности закрытыми. Ни посредством мешалки, ни наблюдением простым глазом или при помощи телескопа ничего не было наблюдаемо такого, что могло бы указать на затверждение гелия, а даже при самом низком давлении, какое было достигнуто, жидкость всегда сохраняла на всем своим протяжении полную подвижность.

§ 12. Испарение при различных уровнях. Было уже замечено, что, вопреки нашему ожиданию, жидкость вне малого стек-

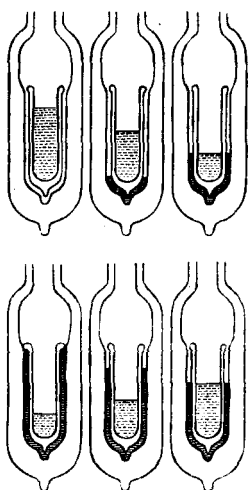


Рис. 7.

лянного стаканчика будет испаряться сначала, а затем уже жидкость внутри его, на самом деле оба уровня жидкости опускались с одинаковой скоростью; так что они все время оставались в этой же горизонтальной плоскости. Если (см. рис. 7) при помощи мешалки с (рис. 4) жидкость перелить изнутри наружу, то внешний уровень падал быстро тогда, когда внутренний подымался, пока они опять не выравнивались в одной плоскости. Если удалить экраны, позволить радиации от лампочки падать на испарительный сосуд, то внешний слой испаряется, что после нового закрытия экранов этот слой образуется снова насчет жидкости внутри стаканчика, и он увеличивается до тех пор, пока оба слоя не сравняются снова и затем они опять падают с одинаковой скоростью. Скорость выравнивания при этой дистилляции была уди-

вительна. Правильное суждение об этом явлении будет возможно только когда будут сделаны определения, которые мы имеем ввиду, касательно теплопроводности стекла, пара и жидкости гелия; желательно также чтобы были сделаны измерения скрытой теплоты испарения и удельной теплоты жидкого гелия и стекла, а также и вязкости газа гелия.

Свойство максимальной плотности, обнаруживаемое гелием в жидком состоянии, имело несомненно большое влияние на наблюдаемое явление. Наблюдения 1911 г. обнаружили впервые существование этого свойства, но тогда не было еще достаточно установлено, приближается ли плотность к определенной величине или она убывает при еще более низких температурах. Что первое явление имеет место установлено повторением опытов, предпринятых вместе с Боксом (Wosk) после окончания опытов, которыми мы сейчас занимаемся. Это утверждение будет лишь постольку верно, поскольку не обнаружится какой-либо особенности в расширении стекла. При охлаждении поверхности гелия

ниже $2,2^{\circ}\text{K}$ оказывается, что самые холодные слои жидкости остаются наверху. В то время как в других случаях, при работах с ванной под низкими давлениями жидкость подвергалась энергичному помешиванию, здесь это помешивание было опущено за недостатком свободного места наверху криостата. Присутствие мешалки во внешней ванне сделало бы по всей вероятности перенос тепла к испарителю еще более слабым, чем какой был в действительности. Можно было надеяться, что употребленные средства уменьшают перенос теплоты на половину, если предположить, что тут нет особого изменения в теплоте испарения гелия.

§ 13. Наименьший предел давления испарения. Как бы там ни было, но когда уровень жидкого гелия в испарителе опускался до дна суженной его части и до половины высоты в маленьком стаканчике, то оказалось что было достигнуто наименьшее давление пара какое может только быть получено в этом аппарате. Пренебрегая малыми поправками, о которых говорилось выше, давление, у поверхности было $0,012-0,014$ мм, в среднем $0,013$ мм. В верхней части давление было в среднем около $0,005$ мм., так что разница давления, обусловленная трением быстро уводимых паров малой плотности, достигала в среднем $0,008$ мм. Эта величина довольно хорошо согласуется с результатами специального определения фрикционного давления испытываемого гелием, движущимся в том же аппарате и с тою же скоростью. В этом контрольном опыте испаритель был заменен трубкою, через которую протекал гелий охлажденный до температуры жидкого водорода с тою же плотностью и с тою же скоростью как и прежде. Этот контрольный опыт дал для фрикционного давления величину $0,009$ мм. Такая же величина получалась на основании вычислений исходя из вероятного распределения температуры вдоль восходящей колонны газа гелия. В круглых числах и принимая во внимание существующие недочеты, мы можем сказать, что предел для давления испарений доведен ниже $1/50$ мм и что мы подвинулись вперед в 10 раз дальше чем в опытах 1910 г., на каковых наблюдениях мы основывали оценку температуры, считавшейся самою низшею, тогда достигнутою. Соответствующая разница в температурах, оцениваемая в градусах скалы Кельвина будет, как увидим в § 14, только весьма небольшого размера. Возвращаясь к вопросу об отвердении гелия, мы приходим к следующему заключению. Так как повидимому несомненно, что гелий обладает максимумом плотности (см. § 12) и так как он не был обращен в твердое состояние даже при температуре лежащей наполовину ниже температуры минимальной плотности, то мы не можем избежать вопроса, не будет ли гелий оставаться жидким может быть даже и при температуре абсолютного нуля.

§ 14. Определение температуры. Нам остается еще рассмотреть вопрос, какая температура соответствует найденному давлению

испарения. Для последнего давления мы получили определенную, как мы сейчас видели, точно установленную величину, если не обращать внимания на малые поправки, требующие дальнейшего изучения; но мы не можем сказать того же самого относительно температуры. При определении крайне низких температур, где даже гелиев газовой термометр

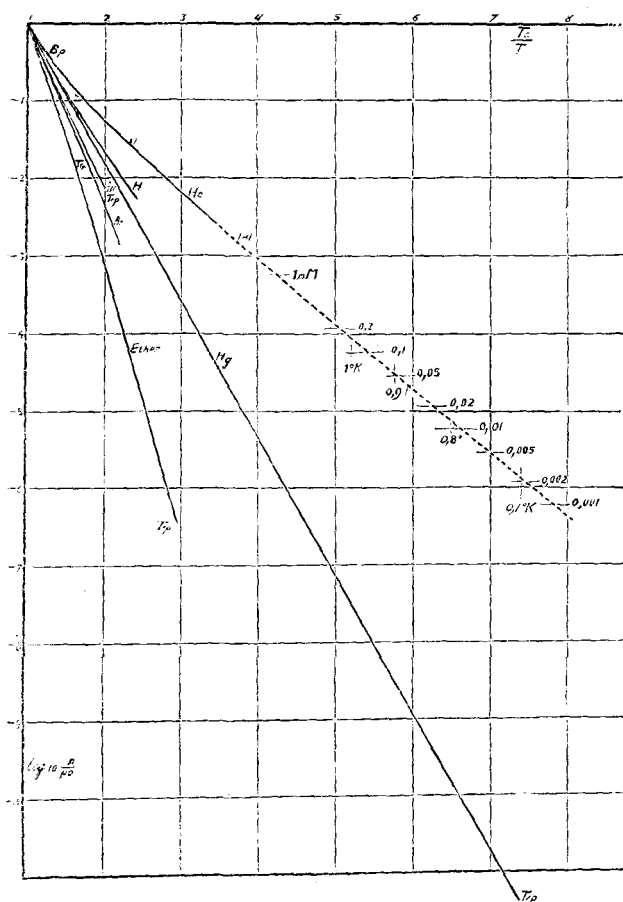


Рис. 8.

не может быть более употреблен, мы вступаем в область, изучение которой только что началось. Поэтому нам приходится обратиться опять к закону соответствующих температур Ван дер Ваальса чтобы руководясь им, экстраполировать закон, связывающий давление пара с температурой, и на более низкие температуры, чем те, для которых он был установлен экспериментально. Это было сделано для температур, до которых газовой термометр с гелием мог еще быть употреблен. В этом случае устройство термометра должно быть приспособлено к давлению, которое вводит

осложнение. В действительности давление должно быть очень мало. Если простые газовые законы должны здесь иметь приложение. Когда давление делается малым должна быть введена поправка на термическое молекулярное давление (т. - е. разность давлений между резервуаром термометра при низкой температуре и пространством манометра при обыкновенной температуре). Но несмотря на эти затруднения нам все же удалось измерить давление пара гелия вплоть до 1,5 K в 1911 г. и 1913 г. с термометром, снабженным ртутным микроманометром, и в 1917 г. с двумя термометрами, снабженными проволоочными манометрами. Результаты отмечены на прилагаемом чертеже (рис. 8)

в котором абсциссами служат величины обратные приведенным температурам, а ординатами логарифмы — приведенных давлений.

Весь вопрос в том, как экстраполировать линии, которые проходят через наблюдаемые точки. Для сей цели кривые давления пара эфира, аргона, неона и водорода начерчены на том же графике, оканчивающиеся каждая в тройной точке вещества. Кривая для ртути имеет даже еще более низкую приведенную температуру, чем достигнутая с гелием. Все кривые обладают тем общим свойством, что кривизна их очень мала; наибольшая кривизна у кривой гелия наблюдается при более высоких температурах. Они разнятся между собою тем, что наклон их для разных веществ различный. В приложении закона соответствующих состояний к нормальным веществам должны быть приняты во внимание такие систематические изменения параметров, выражающих законы для жидкостей: для вещества с низкой критической точкою наклон линии на графике уменьшается вместе с понижением критической температуры. В виду этого, как видно из фигуры, гелий удовлетворяет этому закону в его обобщенной форме; в частности наклон его кривой согласен с наклоном Ar , Ne и N , причем слабая кривизна при более высоких приведенных темп. также упадет на линию экстраполяции, которую можно считать наиболее вероятною, сводится к тому, чтобы считать касательную к кривой в той точке, где она кончается за продолжение кривой. Это и принято на фигуре. Отсюда получаем для достигнутого нами в 1910 г. предела давления величину $1,015\ K.$ и для теперешнего предела, дающего самую низкую достигнутую температуру величину $0,082\ K.$

Принимая во внимание ненадежность экстраполяции лучше будет сказать, что самая низкая, до сих пор полученная температура на несколько сотых градуса ниже $0,09\ K.$

§ 15. Заключение. Поставленный выше вопрос, — можем ли мы спуститься ниже температуры $1^\circ\ K.$, — получает таким образом положительный ответ. В круглых числах мы продвинулись на $\frac{1}{3}$ градуса и можно сказать, если бы мы могли продвинуться еще на $\frac{1}{6}^\circ$, то мы достигли бы предела, который можно получить с гелием обыкновенным путем. Более ясное представление о достигнутом прогрессе, чем при помощи этих малых чисел, может быть получено, если мы выразим понижение температуры отношением, в котором мы понизили абсолютную температуру. В то время как переход от обыкновенной температуры к температуре гелия, испаряющегося при $0,2^\circ\ мм$, означает понижение в отношении 250 к 1 и от точки плавления водорода к названной сейчас температуре гелия, понижение в отношении 13 к 1, теперешнее понижение есть только от 1,4 к 1, а дальнейшее понижение от 1,2 к 1 будет уже пределом, который только можно получить с жидким гелием. Если признать, что наше знание темной структуры делает невероятным, чтобы было найдено или получено каким

либо способом другое вещество более летучее, чем гелий, тогда указанный нами предел, от которого мы отстоим столь немного, должен оказаться абсолютным пределом, положенным нам в получении низких температур.

Однако мы не можем считать этот предел иначе как только временным. Уже теперь существуют определенные задачи, которые требуют своего разрешения вне области, кажущейся непроницаемым барьером. В качестве простого примера можно указать на вопрос, может ли такой металл, как золото, быть сделан сверхпроводящим, если охладить его еще более, чем мы могли это сделать до сих пор. Этот ряд задач отстает от задачи сжижения перманентных газов. Они противостоят усилиям великого экспериментатора, коего славное имя связано с нашим Обществом. ¹⁾ Пол века спустя сжижение водорода, наиболее упрямого газа с которым имел дело Фарадей, было блестящим завершением работ последнего из его преемников в Royal Institution сэра Джемса Дьюара.

Мы можем себя чувствовать уверенными, что затруднения, которые теперь возникли на нашем пути, будут тоже преодолены, и что самое главное в этом деле, — это долгое и терпеливое исследование свойств материи при самых низких температурах, каких мы можем достичь.

Перевел А. И. Соколов.

¹⁾ Доклад читан в Фардеевском Обществе.