1936 г. Т. XVI, вып. 2

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК

Фи 101

АДИАБАТИЧЕСКИЙ МЕТОД ОЖИЖЕНИЯ ГЕЛИЯ *

П. Л. Капица, Москва

ВВЕДЕНИЕ

Открытие Каммерлинг-Оннесом метода ожижения гелия повело за последние тридцать лет к целому ряду открытий, чрезвычайно существенных для изучения твердого состояния. Несмотря на это, в настоящее время еще очень немного лабораторий располагает аппаратурой, необходимой для получения жидкого гелия. Поэтому было бы чрезвычайно желательно упростить сложную технику получения жидкого гелия, что позволило бы его более широко использовать. В настоящей работе описан более эффективный метод ожижения, основанный на применении адиабатического процесса, который значительно упростит получение жидкого гелия для исследовательских целей.

Существуют два основных метода охлаждения и ожижения газов.

Первый метод основан на охлаждении газа при его адиабатическом расширении, причем это охлаждение достигается за счет совершения газом внешней работы. Впервые это явление наблюдалось еще в 1819 г. Клеманом и Дезормом [1], которые обнаружили охлаждение газа в сосуде, когда давление понижалось выпусканием через кран части газа. Можно показать, что при таком расширении остающийся в сосуде газ сообщает определенную кинетическую энергию уходящему газу и адиабатически охлаждается. В 1895 г. Ольшевский [2] применил этот метод для ожижения водорода; подвергая водород сжатию до 190 *ат* и охлаждая его при этом жидким кислородом, кипящим под уменьшенным давлением (—211° С), можно было наблюдать при последующем быстром уменьшении давления появление тумана, состоящего из капель жидкого водорода. При помощи таких экспериментов Ольшевскому удалось определить критические постоянные водорода. Этот метод был недавно использован Симоном [3] для ожижения гелия. Симон использовал то обстоятельство, что при очень низких температурах теплоемкость сосуда делается настолько малой, что практически не отнимает холода у ожижаемого гелия. Однако при помощи этого метода можно получать только небольшие количества жидкого гелия, и для непрерывного ожижения гелия он оказывается

* Proc. Roy Soc. A 147, 188—211, 1934.

неприменимым; кроме того, здесь неизбежна некоторая потеря холода вследствие ухода части газа из сосуда. Этот метод так же усложняется необходимостью применения высоких давлений и предварительного охлаждения при помощи жидкого водорода, кипящего при пониженном давлении.

Фундаментальные преимущества метода, при котором охлаждаемый газ непосредственно совершает работу в подходящей механической системе, давно уже являются общепризнанными, и эти методы теперь обычно и используются для ожижения большинства газов. К сожалению, однако, для случая гелия или водорода его применение осложняется, так как очень трудно построить расширительную машину, работающую при таких низких температурах; по этой причине адиабатический метод ожижения до сих пор не применялся для газов, температура ожижения которых ниже, чем у водорода.

Второй метод охлаждения использует внутреннюю работу, которую ожижаемый газ совершает при расширении. Это явление, известное под именем эффекта Джоуля-Томсона, впервые было использовано для ожижения гелия Каммерлинг-Оннесом[4] и до сих пор применяется для получения жидкого гелия в значительных количествах. Однако, так как гелий по своим свойствам очень близко подходит к идеальному газу, величина эффекта Джоуля-Томсона для него оказывается очень малой, и только после предварительного охлаждения гелия до температуры жидкого водорода, кипящего при пониженном давлении, величина эффекта делается достаточной для ожижения. Эффективность этого метода очень незначительна; так например, Мейсснер[5] считает, что она не превышает $1^0/_0$ эффективности, которую мог бы дать адиабатический метод. На практике, чтобы получить 1 *л* жидкого гелия, необходимо по расчетам Мейсснера затратить 6 *л* жидкого воздуха и 5 *л* жидкого водорода. Эти цифры дают некоторое представление о тех трудностях, которые встречаются при получении жидкого гелия указанным способом.

ВОЗМОЖНЫЕ ТИПЫ РАСШИРИТЕЛЬНЫХ МАШИН

Учитывая низкую эффективность применения эффекта Джоуля-Томсона и возможность ее повышения примерно в 100 раз в адиабатическом процессе, мы разработали расширительную машину, пригодную для длительной работы при низких температурах.

Для того чтобы адиабатически охлаждать сжатый газ до низкой температуры, возможен a priori ряд методов. Наиболее естественным казалось бы применение турбины, и на первый взгляд эта идея кажется чрезвычайно привлекательной, главным образом, потому, что здесь исключается необходимость применения смазки, которая при низких температурах и представляет одну из главных трудностей. Из теории действия турбин известно, что скорость движения лопастей должна приближаться к критической скорости газа. Последняя при нормальных условиях оказывается довольно

высокой, что значительно осложняет конструкцию машины. Однако при температурах, приближающихся к точке ожижения, критическая скорость гелия значительно понижается и, например, при 15° К равна всего лишь 153 *м/сек*; поэтому у гелиевой машины скорость движения лопастей не должна быть чрезмерно велика. Однако, как показывает более подробный расчет, здесь возникает иная трудность, связанная с размерами турбины. Так например, при 15° К и давлении в 30 *ат* турбина, пропускающая 30 $м^3$ гелия в час (что соответствует получению нескольких литров жидкого гелия в час), должна была бы иметь сечение сопла не более 0,1 $мм^2$; и другие габариты частей турбины получились бы также соответственно чрезвычайно малыми. Отсюда видно, что применение турбины могло бы иметь практический смысл только в тех случаях, когда ожижение гелия производится в очень большом масштабе. Описываемая ниже установка хотя и отлична от турбины, но имеет настолько высокий коэфициент полезного действия, что его вряд ли удалось бы еще повысить даже применением турбины.

Другая возможность, которая и используется нами, состоит в применении обыкновенной поршневой машины. Большая техническая трудность при конструировании подобной машины для случая очень низкой температуры состоит в том, что поршень должен ходить в цилиндре по возможности без трения, но в то же время не давать утечки расширяемому газу. В обычных машинах такого типа это достигается применением соответствующей смазки; но при температурах жидкого водорода и гелия подходящее смазочное вещество найти невозможно, так как все известные вещества становятся твердыми. Первая успешная попытка применения расширительной машины при низких температурах принадлежит Клоду [6].

Клод сначала пользовался в качестве смазки для поршня самим жидким воздухом; впоследствии, однако, он пришел к заключению, что жидкий воздух не является достаточно хорошей смазкой [7], и заменил его бензином или эфиром, что ограничило область применимости его расширительной машины до —140° С. Если жидкий воздух оказался неудовлетворительной смазкой, то очевидно, что жидкий гелий, обладающий ничтожным поверхностным натяжением, вовсе непригоден в качестве смазочного вещества, и, следовательно, решение вопроса, предложенное Клодом, неприменимо в случае ожижения гелия.

Стремясь преодолеть указанную трудность, мы занялись разработкой конструкции поршневой расширительной машины, основанной на совершенно ином принципе, которая вовсе не требует смазки для поршня и, следовательно, может работать при любой температуре [8]. Основная особенность этой машины заключалась в том, что поршень ходил в цилиндре свободно с некоторым зазором, так что при впуске газа в цилиндр под высоким давлением известное количество его могло уходить из цилиндра через зазор кругом поршня. Однако скорость движения поршня была так велика, что за ничтожную долю секунды, которую длилось расши-

*

рение, сквозь зазор успевало выходить очень незначительное количество газа, и эта потеря практически не отражалась на коэфициенте полезного действия машины. Такая расширительная машина имеет очень высокий коэфициент полезного действия (60%). При помощи описанной ниже установки, использующей этот принцип, оказалось возможным производить ожижение гелия, не пользуясь предварительным охлаждением жидким водородом.

ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ

При конструировании машины для ожижения гелия ставилась цель добиться не только высокого коэфициента полезного действия, но также и возможно короткого времени охлаждения при пуске. Описание всех расчетов, связанных с конструированием, выходит за рамки настоящей статьи, поскольку они носят обычный технический характер. Мы ограничимся поэтому разбором общего принципа действия машины.

Прежде всего необходимо было выбрать подходящее распределение ступеней охлаждения в ожижительном аппарате. Принципиально расширительная машина предложенного типа позволяет ожижать гелий без предварительного охлаждения жидким водородом или жидким воздухом; однако для этого потребовались бы очень большие габариты расширительной машины и компрессоров, и весь аппарат получился бы очень громоздким. Действительно, для того чтобы обратить в жидкость 1 *кг* гелия, начиная работу от комнатной температуры, необходимо отнять 380 *кал*. С другой стороны, для того чтобы обратить в жидкость то же количество гелия, начиная с температуры жидкости азота, кипящего под пониженным давлением (65° К), достаточно отнять только 84 *кал*. Поэтому установка, не использующая предварительного охлаждения жидким азотом, должна быть примерно в четыре раза больше, чем установка, работающая с помощью жидкого азота. Количество потребного при этом азота очень невелико; при идеальных теплообменниках на каждый литр полученного жидкого гелия нужно было бы затрачивать не более 0,5 *л* жидкого азота. Благодаря низкой стоимости жидкого азота применение его для начального охлаждения оказывается особенно в лабораторных условиях весьма выгодным. Предварительное охлаждение жидким водородом до 20° К позволило бы еще понизить количество отнимаемых калорий до 25; однако этот выигрыш был бы обесценен трудностями получения жидкого водорода и предосторожностями, необходимыми при работе с ним.

Принятая нами схема теплообменников показана на рис. 1. Сжатый гелий входит в трубку *1* и поступает в теплообменник *A*, потом, проходя вокруг кольцеобразного сосуда *N*, содержащего жидкий азот, кипящий под пониженным давлением, охлаждается до 65° К. Сжатый гелий проходит затем через теплообменник *B* и попадает в расширительную машину *E*. Выйдя из расширительной машины, он проходит через теплообменники *C*, *B* и *A*

и возвращается в компрессор через трубку 2. При помощи этих регенерирующих теплообменников температуру выходящего из расширителя газа можно было бы постепенно понижать до тех пор, пока часть гелия не вышла бы из машины в жидком состоянии. Отделяя затем жидкий гелий от газообразного, мы получим схему процесса, подобную примененной Клодом для ожижения воздуха. Такой процесс, однако, является недостаточно эффективным по вполне очевидным причинам. Предположим, что газ входит в расширительную машину под давлением p_1 и заполняет объем v_1 при темпертуре T_1, а затем расширяется до объема v_2 при давлении p_2, и температуре T_2. Процесс расширения может быть достаточно хорошо описан известным соотношением

$$pv^{\gamma} = \text{const}, \qquad (1)$$

где γ — отношение удельных теплоемкостей. Количество холода, полученное при одном расширении, будет

$$\Delta i = \eta j p_1 v_1 \frac{\gamma}{\gamma - 1}\left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}\right]. \qquad (2)$$

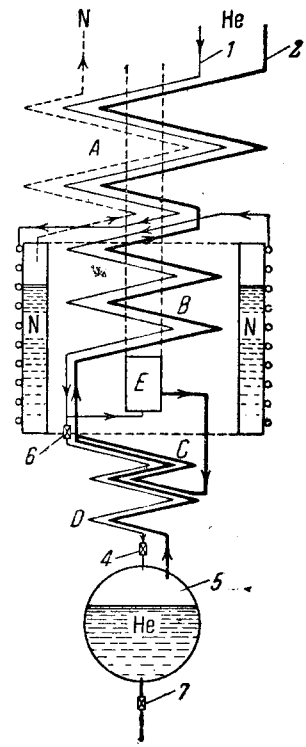

Рис. 1.

Здесь η — коэфициент полезного действия расширительной машины, который в идеальном случае был бы равен единице, j — механический эквивалент тепла. Соотношение (2) показывает, что для случая идеального газа количество холода, получаемого при расширении, не зависит от температуры, при которой происходит расширение. Но так как плотность гелия, наполняющего расширитель, обратно пропорциональна температуре T_1, то при понижении T_1 количество газа, подаваемого компрессором, будет увеличиваться, в то время как количество производимого холода будет оставаться неизменным. Мы приходим к этому заключению, предполагая, что гелий почти точно подчиняется уравнению состояния идеального газа ($\gamma = \text{const}$). Можно показать, что уклонения от свойств идеального газа только усугубляют сделанное заключение, так как количество производимого холода Δi будет уменьшаться с приближением температуры расширения к точке ожижения. Более подробный разбор явлений показывает, что выгодно держать температуру T_1, по возможности высокой и производить охлаждение газа в расширительной машине до температуры T_2, заметно превышающей точку его кипения; последние же стадии процесса,

вплоть до сжижения, нужно пытаться осуществить какими-либо иными способами.

При этом нам представляются три возможности. Первая соответствует методу, применявшемуся Клодом для ожижения воздуха, и состоит в том, чтобы температуру T_2 держать немного ниже критической (5,2 °К) и затем охлаждать сосуд, в котором гелий бы ожижался при давлении, превышающем критическое (2,26 *ат*). Однако этот способ оказывается для гелия непригодным, так как разница между критической температурой и температурой ожижения оказывается слишком малой (только 1°).

Второй метод мог бы состоять тоже в охлаждении сжатого гелия в сосуде охлажденным газом, попадающим в расширительную машину, и последующем ожижении гелия уменьшением давления, как это делал Симон. Такой процесс надо было бы, очевидно, повторять периодически, каждый раз опоражнивая сосуд, что, конечно, вызвало бы усложнения.

Третий метод, который и был нами использован, совпадает с методом ожижения воздуха, применявшимся Гейландом *, в котором последняя стадия процесса ведется при помощи эффекта Джоуля-Томсона. Применяемая схема и показана на рис. 1. Пройдя теплообменник *B*, часть гелия под высоким давлением пропускается через теплообменник *C*, где он охлаждается до температуры T_2 гелия, вышедшего из расширительной машины. Затем газ поступает через теплообменник *D* и дроссельный вентиль *4* в сосуд *5*, где и происходит сжижение. После того как часть гелия перешла в жидкость, остаток газа снова проходит через теплообменники *D* и *C* и присоединяется к газу, вышедшему из расщирительной машины.

Для того чтобы вычислить производительность расширителя, необходимо знать уравнение состояния гелия вблизи критической точки. Его аналитическое выражение, однако, достаточно точно неизвестно, и поэтому здесь удобнее пользоваться „энтропийными диаграммами“ или „диаграммами Моллье“. Мы пользовались в нашей работе такими диаграммами, данными для гелия Кеезомом и Гутгофом [9]. Из этих диаграмм можно было получить следующие величины: 1) полное теплосодержание i_n и i_n', соответствующее давлениям p_1 и p_2 при температуре T_n, при которой сжатый гелий выходит из сосуда, содержащего жидкий азот; 2) полное теплосодержание i_1 газа, входящего в расширительную машину при температуре T_1; 3) полное теплосодержание i_2' после того, как газ адиабатически расширился до давления p_2 и принял температуру T_2'. В действительности, вследствие различных потерь, неизбежных при расширении, газ приходит к состоянию p_2, T_2, i_2, отличающемуся от того состояния p_2, T_2' i_2', которое было бы в случае идеального процесса, причем соответствующие параметры обоих состояний связываются выра-

* См. Мейсснер[5], стр. 314.

жением для коэфициента полезного действия расширительной машины

$$\eta = \frac{i_1 - i_2}{i_1 - i_2'}. \qquad (3)$$

Если D *кг* гелия проходит через аппарат, причем часть его K попадает в расширительную машину, количество произведенного холода будет $DK\ \eta(i_1 - i_2')$; однако вследствие несовершенства теплообменника B не весь этот холод можно использовать для ожижения. Если φ — коэфициент полезного действия теплообменника B, количество холода, уносимого газом, будет $D(i'_n - i_1)(1 - \varphi)$. Кроме этого, неизбежна еще некоторая потеря холода, обусловленная различием в теплосодержании при температуре T_n в случаях реального и идеального процессов; однако эта потеря, равная $D(i_n' - i_n)$, будет мала по сравнению с другими величинами.

Часть газа $(1 - K)$ используется для Джоуль-Томсон-эффекта между давлениями p_3 и p_4. Соответствующие теплосодержания i_3 и i_4 при температуре T_2 могут быть найдены по энтропийной диаграмме, причем в жидком состоянии при давлении p_4 мы будем иметь некоторую величину i'_4. Так как для сжижения 1 *кг* гелия необходимо $i - i'_4$ калорий, количество сжиженного газа будет

$$L = D\left[\frac{K\eta(i_1 - i_2') - (1 - \varphi)(i_n' - i_1)(i_n' - i_n)}{i_n - i_4'}\right]. \qquad (4)$$

При этом количество гелия, ожиженного посредством Джоуль-Томсон-эффекта, будет (Кеезом[10])

$$L = D(1 - K)\frac{i_3 - i_4}{i_3 - i_4'}. \qquad (5)$$

Величины K и $\frac{L}{D}$ могут быть определены из уравнений (4) и (5), причем оказывается, что существует некоторая температура T_2, при которой $\frac{L}{D}$ имеет максимум. Приведенные рассуждения приобретают смысл только тогда, когда температура T_2 ниже 40° К и когда Джоуль-Томсон-эффект имеет положительный знак. При понижении температуры T_2 ниже 40°К разность $i_1 - i_2'$ будет уменьшаться, а K увеличиваться. При некоторой температуре их произведение достигнет максимума, и вся ожижительная установка будет иметь наибольший коэфициент полезного действия. Эксперимент показал, что это температура около 10° К; рассчитать ее по диаграммам состояния не оказалось возможным, так как имевшиеся данные достаточно точны только до 15° К и 20 *ат* давления; для более низких температур они ненадежны. Мы вернемся еще к этому обстоятельству в одной из следующих глав настоящей статьи, сейчас же мы упомянули о нем потому, что на опыте мы нашли инверсию Джоуль-Томсон-эффекта, которая не была указана на данной диаграмме, и это вызвало необходимость ввести второй дроссельный вентиль *б*, который понижал

давление гелия, входящего в регенерирующие спирали C и D, от 30 приблизительно до 17 *ат*.

Уравнение (4) показывает, что производительность установки и ее коэфициент полезного действия определяются не только коэфициентом полезного действия η расширителя, но в значительной мере и коэфициентом полезного действия φ теплообменника B.

На практике мы имеем $i_n - i_1 = 61$ *кал* и количество холода, получаемого в расширительной машине, $K(i_1' - i_2') = 9{,}7$ *кал*. Коэфициент полезного действия теплообменника нашего аппарата φ достигал $92^0/_0$; но, несмотря на это высокое значение, очевидно, около половины полученного в расширителе холода будет уноситься. Это показывает, что необходимо по возможности уменьшить потери в теплообменнике B, что заставило сделать его очень длинным и тяжелым (рис. 3).

Чтобы избежать применения столь громоздкого теплообменника и для повышения коэфициэнта полезного действия установки, можно было бы вместо одной применить целый ряд расширительных машин, так чтобы газ, выходящий из одной машины, производил охлаждение газа, вступающего в следующую. При наличии трех машин отработанный газ последнего расширителя достигал бы достаточно низкой температуры, чтобы охладить сжатый гелий для ожижения посредством эффекта Джоуля-Томсона. Установка, работающая по этой схеме, не нуждалась бы в теплообменнике B, и, вероятно, ее производительность по меньшей мере втрое превысила бы производительность нашей теперешней установки. Эта схема не была нами использована на практике только потому, что сооружение трех расширителей технически довольно сложно и не оправдалось в первоначальной стадии.

РАСШИРИТЕЛЬНАЯ МАШИНА

Теперь мы остановимся подробнее на описании общего принципа действия и деталей конструкции расширительной машины. Приступая к конструированию машины, мы должны были прежде всего выбрать ее рабочее давление p_1. Как видно из соотношения (2), количество получаемого холода $\frac{\Delta i}{v_1 p_1}$, отнесенного к единице массы газа, сравнительно мало изменяется с большим повышением рабочего давления p_1. С другой стороны, повышение давления входящего газа значительно усложняет конструкцию машины и делает ее более громоздкой. Наиболее удобное значение давления зависит от различных факторов, учесть точно которые очень трудно, так что его удобнее всего определять экспериментальным путем. Мы остановились на давлении 25—30 *ат*. Размеры расширительной машины зависят от количества газа, который мы должны через нее пропустить, и от числа ходов поршня в минуту. Объем входящего газа и величина расширения определяются удельными объемами гелия по диаграмме состояния.

Наша расширительная машина имеет от 100 до 120 ходов

поршня в минуту и пропускает в час около 30 $м^3$ гелия при комнатной температуре и нормальном давлении. Диаметр поршня — 30 *мм*, а длина хода варьировалась между 3,5 и 5 *см*. При выборе этого отношения диаметра поршня к длине хода нам приходилось учитывать целый ряд факторов: теплопроводность металла, утечку газа через зазор между поршнем и стенками цилиндра и т. д. После того как определены общие размеры машины, следует выбрать механизм, позволяющий осуществить быстрое движение поршня при расширении и медленное его возвращение. Очевидно, что обычное применение шатуна и коленчатого вала непригодно для нашей цели. Возможно, что необходимый характер движения удалось бы осуществить при помощи подходящего кулачного механизма, но технически наиболее простым нам показалось использование механизма, работающего по гидравлическим принципам. Устройство этого механизма показано схематически на рис. 2. Расширительная машина *E* соединяется с гидравлическим механизмом *H* посредством штока *3*. Входящий в расширитель газ приводит в движение поршень *13*, который в свою очередь толкает поршень *8*; пространство над поршнем *8* заполнено водой, которая выталкивается в виде струи через отверстие *9*. Таким способом работа, совершаемая газом при расширении, превращается в кинетическую энергию вытекающей струи воды. После того как расширительный такт закончен и выпускной клапан расширителя открыт, цилиндр гидравлической машины постепенно наполняется водой, и поршень расширителя медленно возвращается в исходное положение. Охлажденный, расширившийся гелий попадает из цилиндра в трубку *10* и через трубку *11* поступает в теплообменники; набивка сальника *12* препятствует утечке газа. Следует отметить, что диаметр соединительного штока *3* выбран равным диаметру поршня расширителя; благодаря этому при расширении объем газа в трубке *10* не меняется, и внезапного увеличения давления в трубке *10* не происходит. При обратном ходе газ в *10* медленно сжимается, и охлажденный гелий начинает циркулировать по теплообменнику с постоянной скоростью.

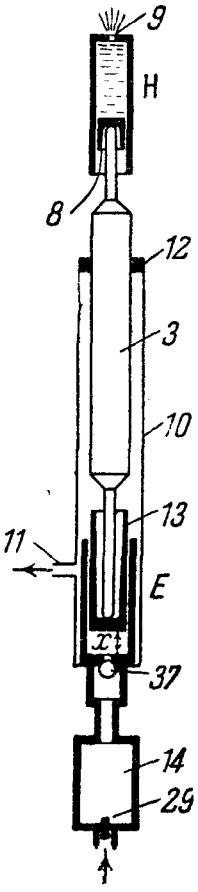

Рис. 2.

Как видно из рисунка, вся расширительная машина заключена в длинную тонкостенную трубку *10* (толщина стенок 0,5 *мм*), причем соединительный шток *3* представляет собой также тонкостенную трубку (толщина стенок 0,5 *мм*). Благодаря таким тонким трубкам получается хорошая температурная изоляция расширительной машины от окружающей среды.

Уравнение движения всей системы может быть написано в виде

$$M\ddot{x} + C\dot{x}^2 + F = P, \tag{6}$$

где x — смещение поршня расширителя, M — масса обоих поршней и соединительного штока, F — сила трения, обусловленная главным образом набивкой сальника *12*; P представляет результирующую силу, действующую на поршень, равную

$$P = (p - p_0)\pi R^2, \tag{7}$$

где R — радиус поршня расширителя *13*, а p_0 — атмосферное давление. Член $C\dot{x}^2$ дает силу сопротивления, вызываемую гидравлическим механизмом, причем C — константа, имеющая следующую величину:

$$C = \frac{\pi r^6 \sigma}{2\rho^2 a^4}. \tag{8}$$

Здесь r — радиус поршня *8*, a — радиус отверстия для выпуска струи *9*; σ — плотность воды, а ρ — сжатие струи, которое мы приняли равным 0,6. В процессе наполнения расширителя газом при постоянном давлении P постоянно, и мы получаем

$$\dot{x}^2 = \dot{x}_0^2\left(1 - e^{-\frac{2C\dot{x}}{M}}\right), \tag{9}$$

где

$$\dot{x}_0^2 = \frac{P - F}{C}. \tag{10}$$

Если фактор $\frac{2Cx}{M}$ велик, влияние инерции будет мало, и поршень сразу же получит скорость, даваемую выражением (10). Поэтому, если масса движущихся частей расширителя мала, а C велико, можно считать, что движение поршня будет все время описываться формулой (10), даже если P переменно. Изменение P после закрытия впускного клапана может быть найдено приближенно из выражения (1), и скорость поршня для любого его положения можно рассчитать из (10). Хотя можно было бы при помощи ряда получить и более точное решение уравнения (6), указанное приближенно для наших практических целей оказывается вполне достаточным.

Из выражения (10) видно, что применение гидравлического устройства выгодно в том отношении, что скорость поршня получается наибольшей в начале расширения, когда утечка гелия через зазор между поршнем и цилиндром наибольшая, и уменьшается с понижением давления в цилиндре. Другое преимущество состоит в том, что длина хода поршня не фиксирована и может устанавливаться с температурой и давлением входящего газа, так что конечное давление будет оставаться неизменным; этим также достигается повышение коэфициента полезного действия расширителя.

Скорость движения поршня может регулироваться изменением размера отверстия *9*. При этом теоретически казалось бы, что

единственное условие при выборе скорости поршня заключается в том, что она должна быть меньше критической скорости гелия и что поэтому она должна быть выбрана возможно большей, так как тем самым сокращается время расширения и уменьшается утечка газа через зазор. Однако на практике оказывается, что скорость движения поршня ограничивается затруднением наполнения через клапанные отверстия цилиндра газом за короткий промежуток времени. При выборе размеров клапана должны быть выполнены следующие условия: во избежание большой потери давления площадь отверстия должна быть достаточно велика, так чтобы скорость движения газа через клапан была незначительно меньше критической. С другой стороны, клапан не должен быть очень велик, так как в этом случае понадобилось бы больше силы для приведения его в действие. Учитывая эти условия, мы остановились на круглом клапане диаметром 1 *см*, а открытие выбрали в 1 *мм*. Такой размер клапана оказывается достаточным, если полное время хода поршня около 0,1 сек.; это осуществляется следующими размерами гидравлического механизма: диаметр цилиндра 8—25 *мм*, диаметр отверстия 9—2,7 *мм*.

Если известна скорость движения поршня, то нетрудно рассчитать, каким должен быть зазор между поршнем и стенкой цилиндра, чтобы утечка газа была не слишком велика. Максимальная величина утечки может быть легко рассчитана по классическим формулам, если предположить, что газ ведет себя, как вязкая жидкость. Величина вязкости гелия при низких температурах известна по измерениям Каммерлинг-Оннеса и Софуса Вебера[11]. Величина утечки пропорциональна кубу ширины зазора и оказывается максимальной, когда поршень стоит наиболее асимметрично, касаясь в каком-либо месте стенки цилиндра. В действительности, однако, поток газа будет не ламинарным, а турбулентным, и величина утечки получится меньшей, нежели вычисленная таким образом. Так как точные измерения величины зазора довольно трудны, мы также определяли величину утечки экспериментально, наблюдая скорость движения нагруженного поршня в цилиндре при закрытых клапанах. Зная вес поршня и величину нагрузки, можно было при помощи теории подобия проэкстраполировать величину утечки до низких температур и высоких давлений. Таким образом мы нашли, что при выбранной нами величине зазора в 0,04—0,05 *мм* величина утечки будет порядка нескольких процентов всего количества проработанного гелия.

Детали устройства расширительной машины показаны на рис. 3. Как во всех технических конструкциях, многие из примененных деталей могли бы быть заменены другими механизмами без существенного изменения в работе машины; однако среди них есть и такие, которые существенно необходимы для правильной работы аппарата. На описании этих последних мы остановимся несколько подробнее.

Поскольку в цилиндре расширительной машины не применяется смазка, очень важно устранить всякие боковые силы, действующие

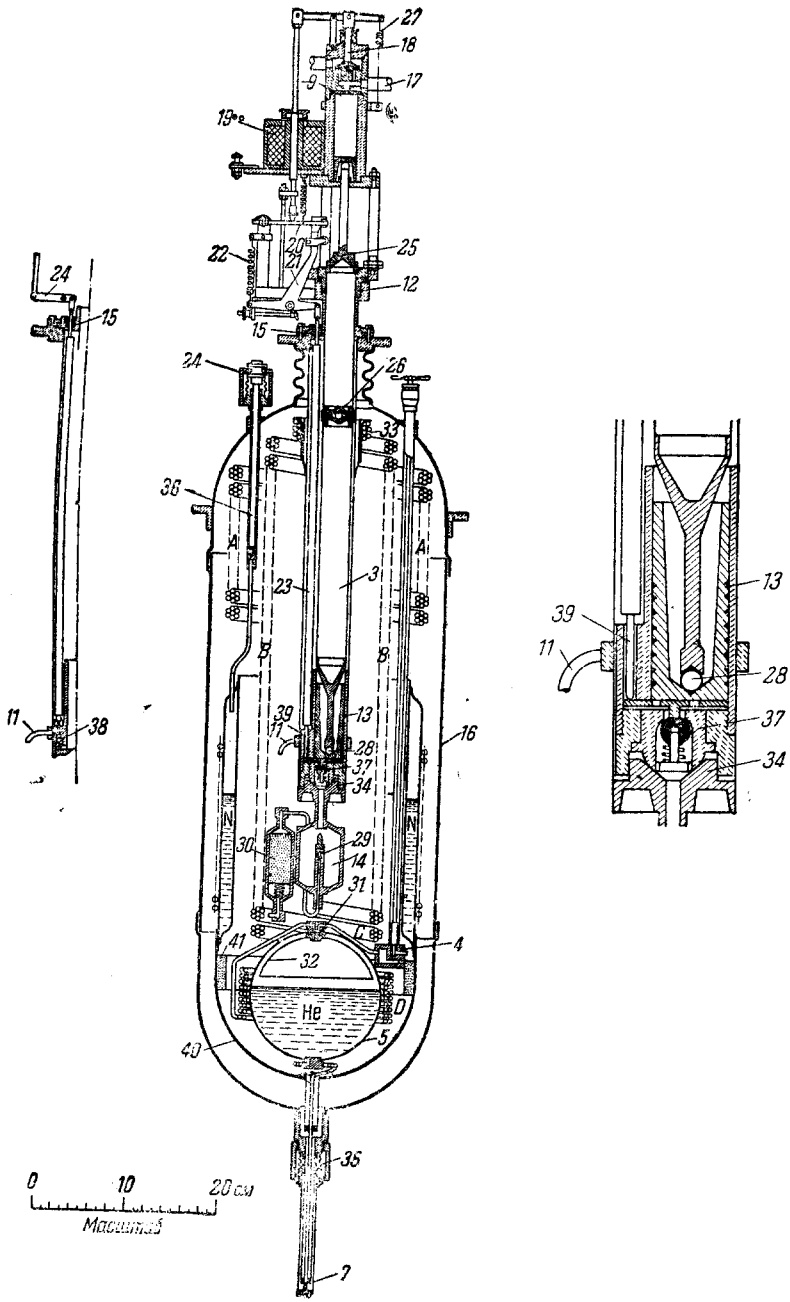
27
18
9
17
19
22
20
21
25
12
24
15
15
24
26
33
36
A
A
23
3
B
B
39
11
13
28
37
34
16
N
N
30
29
14
31
41
4
32
He
D
40
5
35
7
11
38
39
11
13
28
37
34
0
10
20 см
Масштаб

Рис. 3.

на поршень; для этого были использованы два универсальных сочленения *26* и *28*, так что практически цилиндр не испытывает никаких боковых давлений, кроме тех, которые могут возникнуть вследствие неточного совпадения осей цилиндра и соединительного штока.

Другим существенным обстоятельством является необходимость прорезывания узких желобков глубиной $\frac{1}{4}$ *мм* и шириной $\frac{1}{4}$ *мм* по окружности поршня приблизительно на расстоянии 5 *мм* друг от друга. Это мероприятие оказывается необходимым потому, что практически невозможно сделать поверхность цилиндра и поршня совершенно гладкой, и поэтому всегда будут иметься некоторые неправильности поверхности. Как уже упоминалось выше, аэродинамическое сопротивление зазора пропорционально кубу его ширины, и поэтому даже ничтожные изменения зазора будут оказывать значительное влияние на величину падения давления газа в зазоре и вызывать появление боковых сил. Назначение описанных желобков—уравнивать давление вокруг поршня. Опыт показал, что без такой предосторожности почти немедленно после начала действия машины развиваются настолько большие боковые силы, что поршень заедает в цилиндре.

Чтобы обеспечить бесперебойную работу поршня в цилиндре, важно чтобы в гелии не было никаких твердых частиц; поэтому нам пришлось тщательно фильтровать поступающий в машину газ. Точно так же различного рода примеси к гелию, например воздух, образующие при низких температурах твердые кристаллы на стенках цилиндра, царапают и снашивают поршень, что также может вызвать его заедание и понижать коэфициент полезного действия машины. Оказалось, что для очистки гелия его необходимо пропустить перед расширением через угольный поглотитель *30*.

Наконец, оказалось существенным ввести резервуар высокого давления *14*, содержащий гелий в количестве, примерно, в десять раз большем, чем необходимое для единичного расширения. Наличие этого резервуара устраняет колебания давления во время впуска газа в расширитель, которые, несомненно, вызвали бы понижение коэфициента полезного действия установки.

Расширительная машина укреплена в центре аппарата и окружена кожухом *16*. Для получения необходимой термической изоляции внутри кожуха создается очень высокий вакуум при помощи активированного угля.

На практике существенно, чтобы внутренние части расширительной машины были легко доступны для осмотра. В сконструированной машине цилиндр отвинчивается при помощи специального ключа от подставки *34*; впускной клапан *37* может также выниматься.

Впускной клапан *37* представляет собой стальной шарик диаметром в $\frac{1}{2}$ дюйма, плотно входящий в хорошо отполированное гнездо из фосфорной бронзы. Тщательность изготовления этого клапана чрезвычайно важна. При низких температурах, когда вязкость газа делается очень малой, получение необходимой герметич-

ности клапана является очень трудной задачей. Последнее достигается тем, что шарик работает все время только одной своей частью, причем возможное вращение шарика устраняется шпилькой, вставленной в отверстие внутри шарика. Выпускной клапан *38* сделан в стенке цилиндра; он изображен отдельно на рис. 3. Впускной клапан открывается посредством штока *39*, плотно входящего в цилиндрическое отверстие, сделанное в цилиндре. Утечка газа через зазор у штока *39*, так же как и через зазор цилиндра, мала вследствие быстроты расширения. В крышке расширительной машины находятся три сальника с набивками, из которых два (*15*) предназначены для штоков клапанов, а третий (*12*) — для соединительного штока. Размеры большинства частей расширительной машины можно легко рассчитать стандартными методами прикладной механики.

Расширительная машина действует следующим образом: цикл начинается так, что пускается в ход электромагнит *19*, который открывает водяной клапан *18*, тем самым снижает давление воды на поршень и спускает защелку *20*, удерживающую рычаг *21*. Освобожденный рычаг оттягивается пружиной *22* и при помощи соединительного штока *23* открывает впускной клапан. Одновременно при помощи рычага *24* закрывается выпускной клапан. Входящий в цилиндр сжатый гелий двигает поршень, и после того, как поршень пройдет около 0,7 *см*, наполнение расширительной машины газом заканчивается; кулак *25* нажимает на ролик рычага *21*, рычаг поднимается кверху, и впускной клапан закрывается. В остальном протяжении хода поршня газ расширяется адиабатически, и, очевидно, совершаемая работа поглощается энергией струи воды, вытекающей из отверстия *9*. Отработанная вода не пропадает впустую, а используется для охлаждения компрессора. Когда ход поршня закончен, ток в электромагните прерывается, его якорь оттягивается кверху пружиной *27*, что открывает выпускной клапан, возвращает на место защелку *20* и, наконец, закрывает водяной клапан *18*. Тогда по трубке *17* втекает вода, и поршень медленно возвращается обратно в начальное положение, выталкивая охлажденный гелий через выпускную трубку *11* в теплообменники. Цикл этим заканчивается.

Электромагнит *19* приводится в действие автоматически при помощи специального контактного устройства. Описанный клапанный механизм работает вполне удовлетворительно; однако нам кажется возможным значительно его упростить, что мы и надеемся сделать в следующей модели.

Кроме чисто конструктивных вопросов, большое значение при построении расширительной машины имеет выбор материалов. Как известно, большинство веществ, достаточно эластичных при обычных температурах, делается хрупким, как стекло при очень низких температурах. Это особенно относится к обычной мягкой стали. Хотя сопротивление на разрыв и возрастает при понижении температуры, утрата пластичности делает применение таких материалов невозможным. Поэтому мы должны были выбирать материалы,

сохраняющие свою пластичность при низких температурах. Во-вторых, трубки, соединяющие расширитель с гидравлическим механизмом, должны обладать малой теплопроводностью и значительной прочностью. Оказалось, что весьма подходящим материалом является сталь „стэйбрит“ (Staybrite) Фирса (Firth). Эта нержавеющая сталь обладает весьма малой теплопроводностью (0,033), сохраняет пластичность при низких температурах и может быть вытянута в очень тонкостенные трубки. В нашем аппарате мы применяли трубки, толщина стенок которых была 0,5—0,2 *мм*. Следует указать на одну трудность, которая может возникнуть при употреблении стали „стэйбрит“, связанную с тем, что эта сталь принадлежит к классу аустенических, в которых железо находится в немагнитной γ-модификации. При холодной обработке сталь приобретает магнитные свойства, что заставляет предполагать наличие неустойчивого равновесия между α- и γ-модификациями и при низких температурах вызывает опасение возможностей перехода в α-состояние; если бы такой переход имел место, он мог бы сильно отразиться на механических свойствах стали. Чтобы выяснить возможность этого перехода, мы выдерживали образцы различных марок „стэйбрит“ в течение 8 дней при температурах жидкого водорода. Д-р Хэйтфильд (исследовательская лаборатория фирмы Томас Фирс и Джон Броун) был настолько любезен, что подверг тщательному исследованию эти образцы после воздействия низкой температуры. Большая часть образцов не обнаружила никаких изменений физических свойств, и в конце концов мы остановились на марке „FST“. Другая особенность стали „стэйбрит“ заключается в том, что она обладает большим коэфициентом линейного термического расширения, чем обычная сталь, приближающимся к коэфициенту расширения меди. Это свойство делает указанную сталь очень подходящим материалом для изготовления из нее поршня расширительной машины. На первый взгляд кажется, что целесообразнее всего было бы делать и цилиндр и поршень из одного и того же материала; однако, когда мы в обоих случаях применяли фосфорную бронзу, оказалось, что поршень быстро заедает; при исследовании выяснилось, что причиной явилось попадание посторонних частиц в зазор, причем вследствие одинаковой твердости обеих поверхностей эти частицы не могли врезаться ни в одну из них и царапали обе поверхности. Если, однако, поршень сделан из указанной стали, а цилиндр из фосфорной бронзы, посторонние частицы вдавливаются в стенки цилиндра. Также очень важно, чтобы все материалы для частей в машине, которые должны подвергаться в машине действию низких температур, не имели больших внутренних напряжений, и потому должны быть отпущены.

ТЕПЛООБМЕННИКИ

Для повышения производительности установки большое значение имеет выбор рациональной конструкции теплообменников. Вообще говоря, чем больше размеры теплообменников, тем выше

их производительность. С другой стороны, в лабораторных условиях приходится учитывать не только производительность; большие размеры сопряжены с увеличением громоздкости аппаратуры, что является существенным недостатком, так как при этом увеличивается количество холода, затрачиваемого на предварительное охлаждение, что удлиняет время пуска. При конструировании нашей установки мы поэтому сознательно пошли на некоторое уменьшение производительности за счет большей быстроты пуска и экономии жидкого азота на предварительное охлаждение и старались сделать теплообменники по возможности малыми.

Общая теория теплообменников и данные для их расчета приведены в работах Нуссельта[12]. Мы воспользовались, однако, формулами Нуссельта только для ориентировочного определения размеров теплообменника, а затем применили формулы теории подобия. Из формул Нуссельта вытекает, что при заданном количестве газа теплопередача в теплообменнике, состоящем из параллельных трубок, пропорциональна $n^{0,21}$, $l^{0,95}$ и $d^{-0,79}$, где n — число трубок, d — их диаметр, а l — длина теплообменника. Поэтому для повышения теплопередачи можно либо удлинять трубки либо сокращать их диаметр; изменение же числа трубок не оказывает существенного влияния на величину теплообмена.

При выборе размеров трубок теплообменника чрезвычайно важно, чтобы падение давления в них было не слишком велико; в особенности это относится к обратным трубкам. Можно показать, что при постоянном количестве пропускаемого газа падение давления пропорционально $n^{-1,75}$, l и $d^{-4,75}$, откуда видно, что даже очень небольшие изменения диаметра ведут к значительным изменениям в падении давления. Таким образом оказывается, что наиболее удобным способом уменьшения падения давления без существенного изменения теплообмена является увеличение числа трубок.

В нашей установке теплообменники представляли собой одну трубку высокого давления, окруженную шестью трубками низкого давления для обратного тока газа. Трубки были сделаны из сплава меди с никелем (состав 80 : 20); они были спаяны вместе и изогнуты в змеевик. Теплообменник A (рис. 1 и 3) довольно сложен и мог бы быть значительно усовершенствован. Его верхняя часть имеет длину 4 *м* и состоит из семи трубок внутреннего диаметра 4 *мм*; нижняя часть имеет длину 3 *м* и состоит из семи трубок с внутренним диаметром 5 *мм*. Три трубки нижней части предназначены для возврата газов испарившегося жидкого азота в сосуде N.

Теплообменник, связанный с сосудом N, имеет длину 8 *м* и состоит из 5-миллиметровых трубок.

Теплообменник B является самым важным во всей системе; он имеет длину 16 *м* и разделен на три равные секции, сделанные из трубок диаметром 4, 3,5 и 2,3 *мм*.

Теплообменники C и D имеют длину 2 и 6 *м* и сделаны из трубок диаметром 2,3 *мм*.

Если не принять специальных мер предосторожности, то расширительная машина будет подавать газ толчками, что значительно ухудшит работу теплообменников, в особенности теплообменника *B*. Для получения более ровного тока входящего газа в сосуде *14* имелось сопло *29*, вводящее сопротивление в поток газа. Сопло имело диаметр 0,4 *мм* и длину 1 *см* и могло отвинчиваться при разборке цилиндра.

Отметим, что при спайке трубок и других частей установки требуется особая тщательность работы для получения необходимой герметичности для поддержания высокого вакуума.

Из других деталей установки следует упомянуть о центрофугальном сепараторе для отделения капелек жидкого гелия от охлажденного газа. После клапана *4* (рис. 3) гелий проходит через три сопла *31*, которые сообщают ему вращательное движение, и попадает в узкий зазор между стенками сосуда и полусферой *32*, где и происходит осаждение.

Сосуд *N* с жидким азотом соединяется с медным полушарием *40*, которое вследствие теплопроводности сохраняет низкую температуру и защищает находящиеся в нем гелиевый теплообменник и расширительную машину от потери холода. Внешняя трубка расширительной машины охлаждается до температуры жидкого азота в части *33* обратным током гелия, чем уменьшается утечка холода из расширительной машины во внешнее пространство вследствие теплопроводности.

Установка снабжена рядом манометров и двумя упрощенными гелиевыми термометрами, посредством которых измеряется температура газа до и после расширительной машины. Кроме того, имеются два указателя уровня: один для гелия, другой для жидкого азота. Жидкий гелий выводится через выпускной кран *7*, укрепленный на дне аппарата; последний состоит из двух тонкостенных трубок (0,2 *мм*), из которых внутренняя снабжена соплом, закрывающимся при надавливании на внешнюю трубку. Уплотнение всего устройства достигается при помощи гибкого меха *35*. Подобный же кран *36* употребляется для выпускания жидкого азота во внешний сосуд. Краны такого типа работают, как показал опыт, вполне удовлетворительно.

Для правильной работы аппарата совершенно необходимо, чтобы гелий был достаточно чист, и поэтому мы уделим особое внимание разработке системы хранения гелия, при которой исключена возможность попадания воздуха и других примесей. Гелий содержится в цилиндре при давлении до 10 *ат* и по мере надобности автоматически подается в газгольдер емкостью 0,5 $м^3$, наполненный тяжелым компрессорным маслом (оказалось, что только очень тяжелое масло пригодно для этой цели, так как в противном случае воздух диффундирует в гелий). Когда газгольдер наполнен гелием, он автоматически откачивается обратно в цилиндр при помощи специального, герметически закрытого насоса. Система рассчитана на хранение от 7 до 8 $м^3$ гелия. Общий вид установки показан на рис. 4 и 5.

Работа установки

Оказалось, что с термодинамической точки зрения наша расширительная машина является весьма производительным механизмом. При начальном давлении газа в 30 *ат* и конечном в 2,2 *ат* температура газа понижается от 19 до 10°К; диаграмма состояний позволяет заключить, что около 60% свободной энергии газа переводится при этом в механическую работу. Этот высокий коэфициент полезного действия у такой небольшой машины, очевидно, является следствием малых потерь на трение между поршнем и цилиндром. Повидимому, то небольшое количество газа, которое утекает через зазор, действует как „идеальная" смазка. Это подтверждается тем фактом, что даже после многих часов работы машины не наблюдается никакого изнашивания цилиндра и поршня, и те царапины и неправильности их трущейся поверхности, которые были замечены при сборке машины, остаются без изменений.

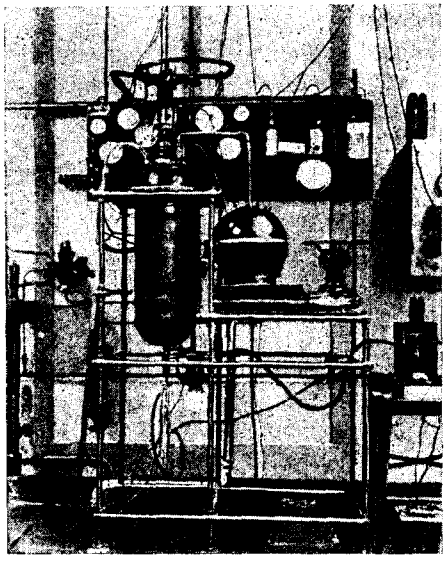

Рис. 4.

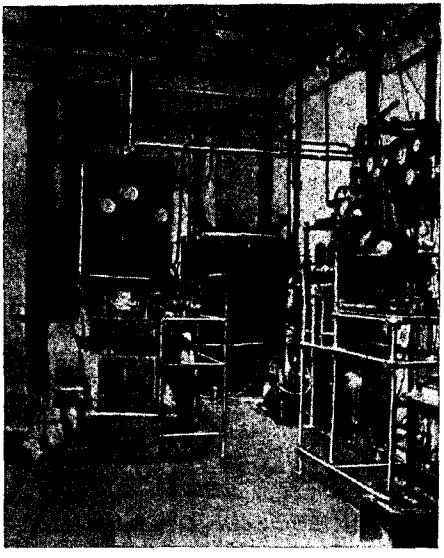

Рис. 5.

Из приведенных данных можно заключить, что, подавая компрессором 32 $м^3$ гелия в час и пропуская из них 28 $м^3$ гелия через расширительную машину, мы получаем 49 *кал*. Этого холода должно было бы хватить для сжижения 4,7 *л* гелия; однако на практике нам не удавалось получать более 1,9 — 2 *л*/час; разница должна быть отнесена за счет потерь в теплообменнике *В*, о котором говорилось выше.

Пуск установки производится следующим образом. Резервуар *D* (рис. 1) наполняется жидким азотом и одновременно приводится в действие расширительная машина. Для быстрого охлаждения теплообменников большое количество гелия пропускается через трубку *1*, резервуар *5*, кран *7* и возвращается в газгольдер, минуя обратную трубку *2*. За 45 мин. весь аппарат доводится до температуры жидкого азота, после чего расширительная машина приблизительно через 25—30 *м* понижает температуру до 10°К. Для того чтобы возможно скорее охладить до этой температуры резервуар *5*, более слабый постоянный ток гелия через кран *7* сохраняется. Затем кран *7* закрывают, и почти тотчас же на дне резервуара начинает осаждаться жидкий гелий. Для пуска установки необходимо *7 кг* жидкого азота.

Опыт показал, что количество ожиженного гелия сильно зависит от давления газа, выходящего через дроссель. Мы наблюдали, что при этом давлении равном 30 *ат* количество образующегося жидкого гелия после момента, с которого начинается ожижение, непрерывно уменьшается, причем температура газа, покидающего расширительную машину, тоже понижается, и в конце концов ожижение прекращается вовсе. Это явление сначала нас озадачило, и нам кажется, что единственное его объяснение заключается в том, что при этих температурах и давлениях имеет место инверсия эффекта Джоуля-Томсона. Когда количество газа, использованное в эффекте Джоуля-Томсона, не отнимает достаточного количества холода для ожижения, температура расширительной машины понижается и в соответствии с этим понижением температуры, благодаря инверсии величина эффекта Джоуля-Томсона продолжает уменьшаться, что влечет за собой сокращение в ожижении и дальнейшее охлаждение машины. При температуре выходящего из расширительной машины газа около 6°К количество полученного холода настолько мало, что его хватает только на компенсацию потерь в теплообменнике *B*, и ожижение останавливается. В настоящее время не имеется никаких данных о существовании такой точки инверсии при низких температурах. Мейсснер[5], дискутируя уже этот вопрос, не приходит ни к каким определенным результатам. Энтропийные диаграммы Кеезома и Гутгофа[9] также не указывают на существование инверсии вблизи 14°К и 20—25 *ат*, где она должна находиться согласно нашим данным. Между прочим, Каммерлинг-Оннес еще давно нашел, что оптимальное давление для ожижения гелия равно 20 *ат*, и предположил, что при более высоких давлениях сокращение выхода объясняется тем, что имеет место значительный унос капель жидкого гелия обратным током газа. Вначале мы предполагали, что это объяснение применимо в нашем случае; однако улучшая отделение капель при помощи центрифугального сепаратора *31* (рис. 3) мы не обнаружили улучшения действия установки. Понижая давление при помощи дросселя *4* (рис. 1) с 30 до 17 *ат*, но в то же время сохраняя поток газа через дроссель постоянным, так чтобы унос капель не изменялся, мы смогли повысить выход жидкого гелия с 0,6 до 2 *л*. Весьма вероятно, что оптимальные условия

ожижения, наблюденные Каммерлинг-Оннесом, в действительности также связаны с существованием точки инверсии. Наша установка непригодна для точного изучения уравнения состояния гелия при низких температурах; однако дать какое-либо иное удовлетворительное объяснение наблюденным явлениям, повидимому, трудно. При давлении 17—18 *ат* мы нашли производительность машины максимальной, равной окола 2 *л/час*, при расходе приблизительно 2 *кг* жидкого азота в час. Таким образом на 1 *л* жидкого гелия описанная установка требует меньше 1,5 *л* жидкого азота.

Ожижитель был построен в мастерской Мондовской лаборатории Королевского общества в Кэмбридже мастером Г. Пирсоном.

Дополнительные замечания

Описанный тип расширительной машины может найти применение не только при сжижении гелия, но и в других случаях, где температура аппарата должна быть 7—8°К. Мы пользовались этой машиной для ожижения водорода; однако нам кажется, что в этом случае она может иметь практическое значение только тогда, когда жидкий водород производится в больших количествах.

Наша установка работала в течение нескольких месяцев и после устранения ряда мелких дефектов оказалась вполне надежной. В дальнейшем мы собираемся ввести ряд усовершенствований, как, например, упрощение клапанного механизма и уменьшение всех холодильных частей установки. Предполагается также использовать несколько расширительных машин, работающих последовательно, о чем говорилось уже выше; при такой системе должен по крайней мере вдвое увеличиться выход жидкого гелия и приблизительно наполовину сократиться время пуска.

ЛИТЕРАТУРА

1. Clement et Desormes, J. phys. Chim. Hist. nat., **89**, 321, 428, 1819.
2. Olszewski, Wiedemann's Ann. d. Phys., **56**, 133, 1895; Phil. Mag., **39**, 188, 1895.
3. Simon, Z. Physik, **81**, 816, 1933.
4. Kammerlingh-Onnes, C. R., **147**, 321, 1908.
5. Meissner, Hdb. d. Phys., B II.
6. Claude, C. R. **134**, 1568, 1902.
7. Claude. Ibid., **141**, 762, 1905.
8. Kapitza, Nature, **133**, 208, 1934.
9. Keesom a. Houthoff, Comm. phys. Lab. Univ. Leiden, **17**. 1924—1928; supplement 65e, 1928.
10. Keesom, Comm. phys. Lab. Univ. Leiden, **17**, 1924—1928, supplement 65 f, 1928.
11. Kammerlingh-Onnes a. Sophus Weber, Comm. phys. Lab. Univ. Leiden, **13**, № 1346, 1913—14.
12. Gröber, Wärmeübertragung, Springer, s. 84, 1926.