

546,17+546,21

10 КОП.

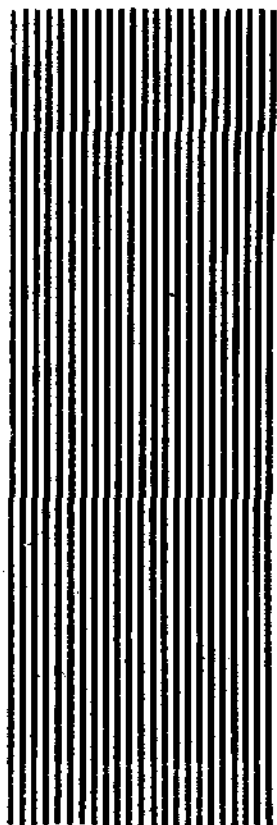
НХ 21

X17

С. В. Халезов

1972

получение азота и кислорода



Г Н Т И

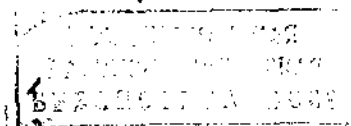
1932

С. В. ХАЛЕЗОВ.

54617+54618
X14

Получение азота и кислорода

Пр. 89, 96, 08



Дер.

Государственное
научно-техническое
издательство
Москва—Ленинград

1932

Редактор Ю. В. Хо да ков.

Технический редактор Г. М. Гинзбург

Сдано в производство 16/X—31 г. Подписано к печати 4/1—32 г. А₆ 148X210.
4,5 п. л. 180.000 зн.

Уполном. Главл. Б—13558. ОГИЗ 3(9). НХ—31 Зак. № 1.313. Тираж 10.000.

Москва. Типография Профиздата, Крутицкий Вал, 18.

СВОЙСТВА АЗОТА И КИСЛОРОДА И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ

Азот — это газ, не имеющий ни цвета, ни запаха, ни вкуса. Он находится в огромных количествах в атмосферном воздухе, окружающем земной шар, так как воздух представляет собой смесь азота и кислорода (с незначительной примесью некоторых других газов). Азот является газом инертным, т. е. довольно трудно, только при исключительных условиях, вступающим в прямое соединение с другими элементами. Он не поддерживает ни дыхания, ни горения, так что если бы воздух состоял из одного лишь азота, то жизнь людей и животных на земле была бы невозможной.

Отсюда и название „азот“ (в переводе с греческого „безжизненный“) по его неспособности к поддержанию жизни.

1 м³ азота весит 1,251 кг (при 0° и 1 ат). Если азот подвергнуть очень сильному охлаждению (до температуры — 147°) и сжатию (до 33 ат), то он будет превращаться в жидкость. Жидкий азот представляет собой подвижную бесцветную жидкость, кипящую под атмосферным давлением при — 195,8°. Удельный вес жидкого азота 0,808; температура замерзания — 208°, т. е. при этой температуре жидкий азот будет превращаться в твердое тело. Теплота испарения жидкого азота при температуре кипения — около 48 кал/кг. Теплоемкость жидкого азота (от — 196° до — 208°) равна 0,430.

Кислород — тоже газ без цвета, запаха и вкуса. В смеси с азотом он образует окружающий нас воздух. В отличие от азота, кислород очень активен и соединяется почти со всеми элементами (кроме благородных газов, благородных металлов и фтора). Соединение кислорода с др. веществами происходит зачастую очень энергично и почти всегда сопровождается выделением больших количеств тепла. Горение, окисление, гниение, дыхание — все это процессы, заключающиеся в соединении кислорода с другими веществами. Если бы атмосфера состояла из одного чистого лишь кислорода, то все эти процессы проходили бы на земле чрезвычайно интенсивно и в такой атмосфере легко бы горели железо и другие металлы, а температура пламени различных видов топлива была бы значительно выше той, которая наблюдается при горении в воздухе.

При 0° и 1 ат 1 м³ кислорода весит 1,429 кг. Кислород начинает переходить в жидкое состояние при температуре — 118° и давлении в 50 ат. Жидкий кислород — это прозрачная голубая жидкость, кипящая под атмосферным давлением при — 183° и замерзающая при температуре около — 218°. Удельный вес жидкого кислорода 1,14. Теплота испарения при температуре кипения — около 51 кал/кг.

Теплоемкость жидкого кислорода (в пределах от -183° до -200°) 0,347.

Воздух, как уже говорилось выше, представляет собой по своей химической природе смесь азота и кислорода с незначительной примесью других газов. Состав воздуха около земной поверхности таков:

N_2 (азот)	78,03%
O_2 (кислород)	20,99%
Ar (аргон)	0,94%
CO_2 (углекислота)	0,03%

Ничтожные количества редких газов (гелий, неон, криптон, ксенон).
Водяные пары (в переменных количествах).

В верхних слоях атмосферы количество кислорода и азота будет уменьшаться, но зато там окажутся большие количества гелия и водорода. Свойства воздуха — средние между азотом и кислородом. 1 м³ воздуха при 0° и 1 ат весит 1,293 кг. Температура кипения жидкого воздуха $-194,2^{\circ}$. Жидкий воздух — голубоватая жидкость, причем окраска здесь обусловлена кислородом.

Атмосферный воздух является неиссякаемым источником для получения азота и кислорода. Если бы температура на земле была ниже -194° , то весь этот воздух, превратившись в жидкость, покрыл бы земной шар океаном глубиной до 10 м.

На долю каждого человека, живущего на земле, приходится по несколько миллиардов м³ воздуха. Естественно, что главным источником для получения кислорода в чистом виде является атмосферный воздух, а для получения азота этот источник — единственный. Следует еще добавить, что из всех тел воздух имеет на земле самое большое распространение: он есть везде, и им можно пользоваться в любых количествах без всяких расходов, в то время как даже такие распространенные вещества, как вода, имеются далеко не повсюду и часто требуют при их использовании затрат.

Кислород можно получать не только из воздуха: получают его еще при помощи электролиза воды, т. е. разлагают воду электрическим током на ее составные части (водород и кислород), — способ, требующий затрат больших количеств энергии, дорогой, и потому кислород таким образом получается лишь в качестве побочного продукта при производстве водорода. Но и для водорода этот способ является дорогим, так как применяется целый ряд других методов.

Существуют различные установки для добывания кислорода из воздуха; азот, который всегда получается при этом, часто не используется. С другой стороны, не мало и установок для добывания азота; при этом также всегда получается кислород, для которого приходится зачастую искать более или менее рационального применения. Способ получения кислорода и азота из воздуха широко практиковался для производства кислорода, но теперь основным фабрикатом этого способа является азот. Для чего же

нам нужно получать кислород, свободный от азота, и азот, свободный от кислорода?

ПРИМЕНЕНИЕ КИСЛОРОДА

I. Наиболее массовое применение кислород имеет в области автогенных работ (автогенная сварка и резка металлов). Большая часть вырабатываемого кислорода применяется, и большая часть кислородных установок работает именно с этой целью. Автогенная сварка представляет собой соединение двух кусков металла за счет сплавления их при помощи концентрированного пламени. Температура этого пламени должна быть значительно выше температуры плавления металла. Чтобы получить пламя с высокой температурой, необходимо сжигать какой-либо горючий газ в струе кислорода. Температуры, которые при этом получаются, и горючие газы, применяемые при этом, приведены на табл. 1.

Т а б л и ц а 1

Наименование горючего газа	Температура пламени	Толщина сварив. листов
Ацетилен	Выше 3 600°	До 40 мм
Бензол. Бензин	До 2 700°	" 12 "
Блаугаз	" 2 300°	" 10 "
Водород	" 2 000°	" 8 "
Светильный газ. Водяной газ	" 1 800°	" 5 "

Сварке поддается большинство употребляемых в технике металлов и многие сплавы. Температуры плавления некоторых из этих металлов таковы:

алюминий	933°
медь	1 083°
никель	1 452°
чугун, сталь, железо	от 1 050 до 1 600°

Из приведенных таблиц видно, что высокие температуры, применяемые при автогенной сварке, приводят к быстрому и полному расплавлению металла в свариваемом месте, что позволяет соединить оба куска без применения механических усилий. Прочность швов при автогенной сварке очень велика, и, например, для ацетиленокислородной сварки колеблется от 76 до 100% к прочности цельного металла.

Автогенная резка представляет собой сгорание металла в струе кислорода. Для этого место, где хотят разрезать металл, подогревают до температуры воспламенения его в кислородном пламени. Резать можно только такой металл, температура плавления которого выше точки горения. К таким металлам относится сталь и ковкое железо. Чугун, медь и ее сплавы, алюминий и пр. при помощи автогенной резки не могут быть разрезаны. Процесс резания металла состоит из двух частей: 1) подогрева металла сварочным плазмем до температуры воспламенения его и 2) горения металла в струе кислорода. Для резки служат те же газы, что и для сварки. Нормальные резаки позволяют резать железо и сталь толщиной от 2 до 300 мм. Самая же большая доступная резанию толщина доходит до 1 м; при этом пользуются уже специальными резаками.

За границей автогенные работы получили широкое распространение. У нас они тоже применяются в значительных размерах. Наиболее выгодной и высококачественной признана ацетиленокислородная сварка. Автогенный метод часто применяется как при ремонтах, так и при изготовлении новых изделий.

II. В настоящее время кислород в жидком виде стал применяться в больших количествах для производства взрывов вместо динамита. У нас на Днепрострое установлены три кислородных аппарата для получения жидкого кислорода, с помощью которого ведутся подрывные работы во время постройки.

Ж. Клод в своей книге „Жидкий воздух“ указывает, что все лотарингские железные рудники применяют вместо пороха жидкий кислород и что это дает экономию от 12 до 60% на 1 т добываемой руды. Для подрывных работ кислород применяется в виде оксиданта, представляющего собой пропитанные жидким кислородом уголь, сажу, хлопок или другие материалы в смеси с нафталином и пр. Патроны воспламеняются посредством электрических запалов с гремучей ртутью или при помощи пороха и бикфордова шнура.

Удобство применения жидкого кислорода для взрывов заключается помимо дешевизны еще и в том, что по отдельности жидкий кислород, с одной стороны, и уголь, сажа и пр., с другой, взрывчатыми веществами не являются и следовательно совершенно безопасны при перевозках. Патрон пропитывается жидким кислородом путем погружения в него на 10—15 мин. лишь непосредственно перед взрывом, причем если взрыв не последовал, то через короткий промежуток времени патрон снова является совершенно безопасным.

Д' Арсонваль и Ж. Клод изготовляли по заданию французского правительства аэропланнне бомбы с жидким кислородом, но во время империалистической войны французская армия их не применяла (были проведены лишь испытания, которые, по словам Ж. Клода, оказались убедительными); немецкой же армии, повидимому, жидкий кислород оказал значительные услуги.

Благодаря экономии при применении жидкого кислорода по сравнению с динамитом дорогая установка для получения жидкого кислорода в случае массовых подрывных работ быстро окупается.

III. Жидкий и газообразный кислород применяются также для целей дыхания: в медицинских аппаратах, в спасательных приборах для рудников, для пожарных, для водолазов, для авиаторов при полетах на большую высоту и т. п. В медицине при этом применяют так называемые кислородные подушки, т. е. мешки из резины или прорезиненной материи, наполненные газообразным кислородом. Для работы же в отравленной атмосфере, под водой или при полетах на большой высоте пользуются особыми дыхательно-кислородными аппаратами (изолирующие противогазы), снабженными или баллоном с газообразным сжатым кислородом, или сосудом с жидким кислородом. Чистый кислород, если он подведен для дыхания с давлением не выше атмосферного, не действует вредно на организм, и люди, применяющие кислородные аппараты в течение нескольких часов работы с ними, сохраняют полную работоспособность и бодрость.

IV. В химической промышленности кислород применяется:

1. Для получения уксусной кислоты из ацетальдегида путем окисления его в особых аппаратах с помощью чистого кислорода. Сам ацетальдегид ($\text{CH}_3 \cdot \text{CHO}$) получается из ацетилена (C_2H_2) действием на последний воды и солей ртути. Уксусная же кислота необходима в огромных количествах для синтеза индиго и других продуктов, а также при крашении и ситцепечатании тканей (при печатании главным образом — в виде солей уксусной кислоты). В Германии для получения уксусной кислоты по указанному способу работает большая кислородная установка огромной производительности.

2. Для получения суррогатов резины путем замены части серы кислородом, что делает суррогат (получаемый варкой масла с серой) более легким.

3. Для производства искусственных драгоценных камней: рубинов, сапфиров и др., имеющих большое применение в часовой, ювелирной и др. отраслях промышленности. Некоторые кислородные установки в Германии, Франции и Швейцарии работают исключительно с этой целью. Способ изготовления искусственных драгоценных камней заключается в следующем: вещество, из которого состоит камень (глинозем Al_2O_3), вместе с примесью, от которой зависит окраска, вводят в водороднокислородное пламя в виде мельчайшей пыли. Вещество плавится и каплями стекает на раскаленное острие вращающегося конуса из глинозема, где капли соединяясь одна с другой, дают прекрасные кристаллы значительно более крупные и совершенные, чем естественные. Примесями для придания окраски являются: окись хрома в количестве 2—2,5% для рубина и магнитная окись железа (1,5%) с двуокисью титана (0,5%) — для сапфира.

4. Для улучшения производства азотной кислоты как по дуговому методу, так и по способу окисления аммиака. Для этого воздух в первом случае и воздушно-аммиачную смесь во втором — обогащают кислородом.

V. Если вместо дутья воздухом применять дутье кислородом при получении генераторного газа, то газ будет обладать значительно большей теплотворной способностью и развивать при сгорании более высокие температуры. Он будет состоять почти из чистой окиси углерода (до 98%). Такой газ является исходным продуктом для многих производств, например муравьиной кислоты. Из окиси же углерода получают фосген (COCl_2), являющийся душиливым газом, употреблявшимся в прошлой мировой войне. Кроме того фосген служит исходным материалом для синтеза некоторых красителей, а также для изготовления еще более ядовитых газов, чем он сам. Можно применять кислородное дутье и при производстве водяного газа, причем процесс получения водяного газа делается непрерывным. В 1924/25 г. была построена с этой целью специальная установка для производства кислорода в Верчестере (Англия). Способ на такое производство водяного газа запатентован также итальянской фирмой Казале.

VI. Наконец, в ближайшем будущем надо ожидать широкого применения кислорода для обогащения им дутья при доменных и металлургических процессах. При доменном процессе обогащение дутья кислородом ведет: к увеличению выплавки чугуна; дает возможность лучше регулировать весь доменный процесс, изменяя количество кислорода во вдуваемом воздухе; дает возможность обрабатывать бедные руды и уменьшать содержание серы в выплавленном железе; наконец, колошниковые газы, получаемые при доменном процессе, будут содержать меньшие количества азота, а вместе с тем будет уноситься из домны меньшее количество тепла, и следовательно расход кокса (или угля) на единицу выплавляемой продукции понизится. Колошниковые же газы могут быть легче использованы для различных целей (хотя бы для синтеза аммиака). За границей в этой области уже многое сделано. На одном сталелитейном заводе в Бельгии (Угрэ) такое обогащенное дутье применялось еще в 1913 г. В Германии и САСШ над этим вопросом также давно уже работают. У нас в СССР к работам лишь приступают. Президиум ВСНХ в мае 1931 г. постановил в самом срочном порядке приступить к проверке в опытном и заводском масштабах предложений директора азотного института Чекина и инж. Семенова о переводе доменных печей на дутье обогащенное кислородом. Опыты должны проводиться, с одной стороны, на Чернореченском химическом комбинате, с другой, — Востокостали поручено выделить с этой целью одну домну.

Применение кислорода возможно также и для мартеновских печей, вагранок и пр. Вопрос с обогащением дутья упирается в стоимость кислорода. Но там, где производятся большие количества азота (например на некоторых установках по синтезу

аммиака), кислород является побочным продуктом и может использоваться вышеуказанным образом. С другой стороны, можно думать, что обогащенное дутье генераторов и домен настолько улучшит процесс, что даже производство кислорода лишь с этой целью будет экономически выгодно.

ПРИМЕНЕНИЕ АЗОТА

Азот в воздухе находится в свободном виде. Такой азот ничего не стоит и даже после того, как будет отделен от кислорода, непосредственных применений почти не имеет, за исключением разве использования в качестве инертного газа для предотвращения пожаров, заполнения электрических лампочек или для едущания с лечебной целью в пораженные туберкулезом участки легких. Да и почти во всех этих случаях азот с большим успехом заменяется другими газами (в качестве противопожарного мероприятия — углекислотой, для электроламп — аргонem). Зато связанный азот, т. е. соединенный с другими элементами, имеет огромное значение. Свободный азот с трудом соединяется с другими элементами, и такое связывание свободного атмосферного азота в природе очень незначительно. Поэтому природа обладает лишь определенным количеством связанного азота, который совершает постоянный круговорот. Растения поглощают связанный азот в виде различных солей из земли и изготовляют из него белки; из растений белки переходят к животным и человеку, а от них (в виде экскрементов, мочи и после гибели всего животного организма) снова возвращаются в землю. Белки являются составной частью каждой живой клетки. Без белка нет живой клетки, нет жизни.

При этом круговороте часть связанного азота теряется, превращаясь в свободный. В конце концов такой процесс привел бы к гибели всей органической жизни на земле, так как растения, не получая азота из земли, не могли бы расти; а без растений не могли бы существовать ни животные, ни человек.

Однако эта убыль пополняется процессами, состоящими, с одной стороны, в деятельности некоторых бактерий, способных поглощать азот прямо из воздуха, а с другой — в образовании окислов азота (т. е. соединений азота с кислородом) при атмосферных электрических разрядах, причем эти окислы вместе с атмосферными осадками попадают в землю. Все это однако не смогло бы пополнить убыли связанного азота, так как человечество этот связанный азот расточает в больших размерах, чем он накапливается в природе (при сжигании топлива, при применении взрывчатых веществ и пр. азот снова превращается в свободное состояние).

Во время мировой войны вопрос о „связанном азоте“ сделался для Германии вопросом жизни и смерти, так как запас „связанного азота“ в стране был недостаточен не только для усиленного производства взрывчатых веществ, но даже для сельскохозяйственных целей, а импорт связанного азота благодаря блокаде, был пре-

крашен. Но германской науке удалось своевременно выполнить „социальный заказ“ отечественной буржуазии на создание промышленности связанного азота, достаточно мощной, чтобы обеспечить армию взрывчатыми веществами, а сельское хозяйство — азотистыми удобрениями. Разработанные при этом установки для связывания азота сохраняют свое значение до настоящего времени, когда производство азотистых удобрений из воздуха принимает широкие размеры.

Азотная кислота, без которой невозможно изготовление большинства взрывчатых веществ и многих красящих, фармацевтических и других, добывается теперь в значительном количестве также из воздуха. Раньше же единственным источником для получения ее и единственным азотистым минеральным удобрением была чилийская селитра, естественные залежи которой находятся в Чили (Ю. Америка). Хотя запасов этой селитры и хватит еще на 150—200 л., однако все страны стремятся к тому, чтобы наладить свою азотную промышленность и не быть зависимыми от других стран или лиц. Это тем более понятно, что без азотной кислоты невозможно, как только что говорилось выше, производство большинства взрывчатых веществ (дымный и бездымный порох, нитроглицерин, пироксилин, динамит, мелинит, тротил, аммонал и многих, многих других).

Главнейшими соединениями азота в промышленности являются азотная кислота, аммиак и их соли. Наиболее распространены три метода связывания азота воздуха. Первый метод — это сжигание азота воздуха в кислороде же воздуха. Так как азот очень инертен, то такое соединение азота с кислородом удастся осуществить лишь в пламени вольтовой дуги при больших напряжениях и с затратой больших количеств энергии. Процесс идет лучше тогда, когда воздух обогащается кислородом (об этом мы уже упоминали ранее). Таким образом здесь предварительно выделять азот воздуха не нужно. В результате мы получаем окислы азота, которые, поглощаясь водой, дают азотную и азотистую кислоты. Однако этот метод очень невыгоден и применяется лишь там, где имеется очень дешевая электроэнергия.

Второй метод — это присоединение азота к карбиду кальция (CaC_2). Здесь уже необходим чистый азот, который надо предварительно получить из воздуха, отделив его от кислорода. Карбид кальция получается в электрических печах тоже с затратой значительных количеств электроэнергии, но куда меньших, чем в первом случае. В результате соединения карбида кальция с азотом мы получим цианамид кальция (CaCN_2), который сам по себе является хорошим азотсодержащим удобрением. С другой стороны, при разложении цианамида водяным паром он дает аммиак, а из аммиака уже можно получить и азотную кислоту и целый ряд удобрений (из цианамида же получают и цианистые соединения). Метод однако тоже дорогой.

Наибольшим распространением пользуется третий метод — получение аммиака (NH_3) прямым соединением азота и водорода. Большая часть азота связывается именно по этому способу. Здесь необходимо получить сначала чистый водород и чистый азот. Почти весь азот, который получают из воздуха, расходуется главным образом для синтеза аммиака и для получения цианамидов кальция. Остальные применения азота незначительны. Из полученного таким образом аммиака мы можем приготовить и азотные удобрения, и азотную кислоту, а из последней — взрывчатые вещества, краски и целый ряд других необходимых продуктов.

Из всего сказанного видно, что как кислород, так и азот имеют огромное промышленное значение, которое в будущем еще больше возрастет. В СССР по пятилетнему плану намечено строительство целого ряда химических комбинатов для производства аммиака и азотных удобрений. На многих из комбинатов будут установки для получения из воздуха азота, необходимого при синтезе аммиака. Общее производство азотных удобрений в СССР должно вырасти к концу пятилетки до 1,4 млн. *т* в год.

ГЛАВА ВТОРАЯ

ПРИНЦИП ПОЛУЧЕНИЯ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУР

Все знают, каким образом разделяются спирт и вода. Спирт кипит при температуре 78° , вода — при 100° . Если мы станем нагревать такую смесь, то спирт, как более легко-кипящий, начнет испаряться в первую очередь, и пары, поднимающиеся от жидкости, в начале перегонки будут содержать большие количества спирта, чем жидкость; пары же под конец перегонки окажутся более богатыми водой, чем начальная смесь.

Таким образом основываясь на разности температур кипения двух смешанных жидкостей, можно их разделить. То же самое и в том случае, если мы возьмем жидкий воздух, состоящий из смеси жидкого кислорода и жидкого азота. Температуры кипения их будут: для кислорода — 183° , для азота — $195,8^{\circ}$. Разность почти в 13° является вполне достаточной для их разделения. В первых порциях паров, поднимающихся над такой жидкостью, будет больше азота, чем его было в воздухе, остающаяся же жидкость (жидкий воздух) обогатится кислородом. В дальнейшем мы подробнее поговорим о том, как идет такое разделение. Сейчас же посмотрим, как можно получить жидкий воздух, т. е. каким образом сжигать тот окружающий нас воздух, который мы привыкли видеть и представлять себе лишь как газообразное вещество.

ПОНЯТИЯ О КРИТИЧЕСКОЙ ТЕМПЕРАТУРЕ

Если мы будем сжимать такой газ, как углекислота, аммиак или сернистый ангидрид, при нормальной температуре, то (при тех или иных давлениях) эти газы начнут переходить в жидкое состояние. Однако если мы возьмем другие газы (как кислород, азот или окись углерода) и будем сжимать их при нормальных же температурах, то как бы давления высоко ни подымались, газ так и останется газом: мы не получим ни одной капли жидкости. Оказывается, что для сжижения этих газов недостаточно лишь повышать давление — надо еще понизить и температуру их. Действительно, если кислород охладить до -118° , то при давлении в 50 ат он начнет уже сжиматься. При более низких температурах давление может быть значительно меньшим, а если мы охладим кислород до -183° , то он будет сжиматься при нормальном давлении. С другой стороны, если углекислоту нагреть до температуры выше $+31^{\circ}$, то никаким давлением ее сжигать не удастся. То же произойдет с аммиаком при температурах выше $+132^{\circ}$ и с сернистым ангидридом выше $+157^{\circ}$.

Для каждого газа существует такая критическая температура, выше которой он никаким давлением сжижен быть не может (или,

иначе говоря, жидкость не может существовать при температурах более высоких, чем ее критическая температура). Чтобы сжижить газ, надо его охладить до температуры ниже его критической точки. Углекислота, аммиак и сернистый ангидрид сжижались при нормальных температурах лишь потому, что их критические температуры выше, чем обыкновенная нормальная. Если их нагреть, то, как говорилось уже, они сжижаться тоже не будут. Давление, под которым газ начинает сжижаться при критической температуре, называется критическим давлением. Приводим таблицу критических температур и давлений различных газов и паров:

Таблица 2

Наименование	Критич. температ.	Критич. давление
Воздух	— 140,7°	37,2 ат
Азот N ₂	— 147°	33 "
Кислород O ₂	— 118°	50 "
Оксид углерода CO	— 141°	35 "
Углекислота CO ₂	+ 31°	73 "
Аммиак NH ₃	+ 132°	111,5 "
Сернистый ангидрид SO ₂	+ 157°	77,7 "
Водяной пар H ₂ O	+ 374°	224 "

Из таблицы видно, что воздух может быть превращен в жидкость лишь при температурах ниже чем —140,7°, причем давление должно быть не менее 37,2 ат. Чем ниже температура, до которой воздух охлажден, тем меньшее давление можно применять для сжижения его. При температуре —194,2° воздух начнет сжижаться уже под атмосферным давлением. Эта точка называется точкой кипения воздуха.

Впервые воздух был сжижен в 1877 г. французом Кальете и швейцарским ученым Пикте, но метод получения жидкого воздуха в больших промышленных масштабах дал немецкий профессор Линде. Он построил первую машину для сжижения воздуха и первый сконструировал аппарат для промышленного разделения этого жидкого воздуха на азот и кислород. Французский инженер Клод разработал и ввел в практику другой метод получения низких температур и жидкого воздуха, принципиально отличный от метода Линде. Оба метода основаны на свойстве газов охлаждаться при расширении.

Сжатый газ может расширяться двояко: или просто выходя через вентиль, при этом давление его понижается до давления окружающей среды, или газ расширяется, производя какую-либо

внешнюю работу, например в цилиндре машины, приводя в движение поршень этой машины, которая будет, таким образом, играть роль двигателя. В обоих случаях происходит охлаждение газа.

Рассмотрим, почему расширение производит холод. Когда какой-либо газ сжимают, то на это затрачивают механическую работу. Газ при сжатии нагревается: это один вид энергии (работа) превратился в другой вид (тепло). Мы знаем, что энергия никогда не исчезает, она лишь переходит из одной своей формы в другую.

Теперь, такой сжатый газ охладим до нормальной температуры, а затем дадим ему расшириться. Температура газа понизится по сравнению с окружающей средой; это означает, что у газа отнята часть тепла: она превратилась в работу, так как расширяющийся газ такую работу производит. Тут все ясно, когда дело идет о расширении газа в цилиндре машины. Чем больше работа, которую газ при этом совершит, тем в большей степени он охладится.

Но какую же работу совершает газ, расширяясь при выходе через вентиль? Если газ непрерывно подается к этому вентилю компрессором, то работа, затрачиваемая на преодоление внешнего сопротивления (сопровождающая всегда увеличение объема), будет совершаться не газом, а компрессором, и никакого охлаждения газа от совершения этой работы не произойдет. Если бы мы имели дело лишь с идеальными газами, которые подчинены точно всем газовым законам (и в первую очередь закону Бойля-Мариотта), то при расширении простым истечением через вентиль никогда бы не смогли получить никакого охлаждения, так как газ не затрачивал бы своего тепла, ибо не совершал бы никакой работы. Однако в природе нет идеальных газов. Все газы, в том числе и воздух, от газовых законов отступают. Мы знаем, что если идеальный газ сжимать, то по закону Бойля-Мариотта он уменьшит свой объем во

столько раз, во сколько увеличится его давление, т. е. $\frac{V_1}{V_2} = \frac{P_2}{P_1}$ или $V_1 P_1 = V_2 P_2$ (где V_1 и V_2 — объемы, а P_1 и P_2 — давления одной и той же массы газа при постоянной температуре). Для действительных газов произведение $V_1 P_1$ не точно равно произведению $V_2 P_2$.

Пусть мы имеем объем воздуха V_1 , находящийся под давлением P_1 . Теперь увеличим давление до P_2 , тогда объем будет V_2 , но $V_2 P_2$ окажется несколько меньшим, чем $V_1 P_1$. Следовательно объем уменьшился тут не только под влиянием внешнего сжатия, но и внутренних сил. Тепло, выделенное при этом, окажется несколько большим, чем затраченная внешняя работа, так как произойдет еще некоторая внутренняя работа, тоже сопровождающаяся выделением тепла. Это тепло аналогично теплу, которое выделяется при конденсации газа или пара в жидкость, так как и там происходит определенная внутренняя работа. Теперь, если воздух (после охлаждения его до первоначальной температуры) будет расширяться, то он должен произвести и эту внутреннюю работу, затраченную

при его сжатии. Такая работа потребует тепла, которое будет отнято у воздуха, и последний охладится (подобно тому, как происходит охлаждение при испарении жидкости). Этот эффект — охлаждение газа за счет внутренней работы — называется эффектом Джоуля-Томсона, которые опытным путем изучили его и дали следующую формулу для подсчета понижения температуры газа:

$$d = \alpha (P_1 - P_2) \left(\frac{273}{T} \right)^2;$$

α для различных газов имеет различные значения. Для воздуха $\alpha = 0,276$, для углекислоты — около 0,35 и т. д. d — это понижение температуры, $P_1 - P_2$ — начальное и конечное давление газа, и T — температура по абсолютной шкале (равна температуре по Цельсию плюс 273). Из формулы видно, что чем ниже температура, тем более сильное охлаждение испытывает газ при расширении. Действительно, чем холоднее газ, тем больше отличается он от идеального газа.

Профессор Линде разработал метод получения низких температур и жидкого воздуха, основанный именно на этом свойстве воздуха — охлаждаться при расширении без отдачи внешней работы, лишь за счет эффекта Джоуля-Томсона. Инж. Клод дал метод получения жидкого воздуха с помощью расширения сжатого воздуха в цилиндре особой машины, т. е. за счет совершения им внешней работы. Во втором случае охлаждение будет значительно большим и теоретически определяется формулой для адиабатического расширения:

$$T_2 = T_1 \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{0,29},$$

где T_1 — температура газа до расширения, T_2 — после расширения, а P_1 и P_2 — соответствующие давления.

Оба метода широко распространены в промышленности.

Чтобы получить очень низкие температуры, необходимо газ к месту расширения подводить уже охлажденным. Это достигается следующим образом: первоначально сжатый воздух, который при сжатии компрессором нагрелся, охлаждается в водяном холодильнике до нормальных температур, а затем направляется по трубкам A в теплообменник B (рис. 1), где получает холод уже от холодного расширенного воздуха, идущего навстречу ему между трубками A и подходит к вентилю C . Выйдя через вентиль и охладив-

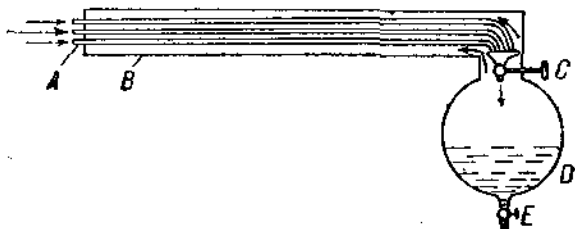
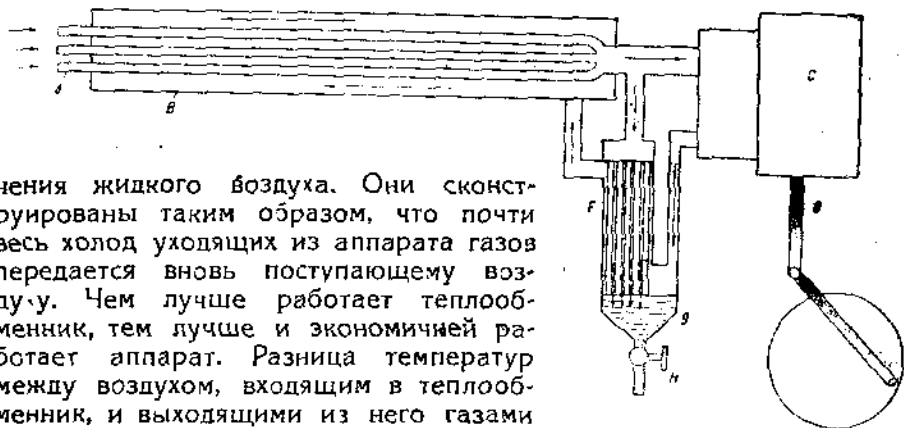


Рис. 1. Схема расширения воздуха без отдачи внешней работы

шись, возвращается в теплообменник, идет между трубками *A* и отдает свой холод вновь вступающему воздуху. Новый воздух подходит в вентилью *C* более холодным, чем прежде, а расширившись охладится еще сильнее, охлаждая, таким образом, вновь поступающий воздух в еще большей степени и т. д. Следовательно воздух к месту расширения доходит все более и более холодным и наконец его температуры окажутся настолько низки, что при новом расширении воздуха часть его будет сжиматься и собираться в приемнике *D*, откуда по мере накопления жидкий воздух можно выпускать через кран *E*. Другая же часть воздуха с очень низкой температурой выходит из аппарата через теплообменник, продолжая охлаждать поступающий из компрессора сжатый воздух.

Приведенная схема дает понятие о значении теплообменника, так как без него получение очень низких температур, которые необходимы для сжижения воздуха, было бы невозможным. Аппарат на схеме производит холод по методу Линде: воздух расширяется через вентиль без отдачи внешней работы. Если бы теплообменника не существовало, то весь холод уходящего воздуха уносился бы из аппарата. Сжатый воздух всегда проходил бы к вентилью *C* при нормальных температурах и расширяясь не давал бы $-194,2^\circ$, при которых начинается сжижение под атмосферным давлением. А ведь нам тут нужны температуры именно такие, даже более низкие, так как $-194,2^\circ$ является точкой кипения жидкого воздуха. Кроме того часть холода, когда начинается сжижение, будет затрачиваться на уничтожение тепла, всегда выделяющегося при конденсации любой жидкости (скрытая теплота конденсации).

Теплообменники имеются у аппаратов всех систем для полу-



чения жидкого воздуха. Они сконструированы таким образом, что почти весь холод уходящих из аппарата газов передается вновь поступающему воздуху. Чем лучше работает теплообменник, тем лучше и экономичнее работает аппарат. Разница температур между воздухом, входящим в теплообменник, и выходящими из него газами обычно равна всего $3-4^\circ$.

Рис. 2 представляет собой схему получения холода и сжижения воздуха по методу Клода. Сжатый воздух также по

Рис. 2. Схема получения низких температур по методу Клода (с отдачей внешней работы).

трубкам *A* поступает в теплообменник *B* и затем разветвляется. Часть воздуха идет в цилиндр расширительной машины (детандер) *C*, где расширяется с отдачей внешней работы (причем эта работа может быть и использована, например для сжатия же воздуха или для приведения в движение динамомашин) и охлажденным по трубе *D* выходит в теплообменник, проходя сначала между трубками, проходящими вдоль конденсатора *F*. В теплообменнике холод отдается вновь поступающему воздуху. Другая часть воздуха из теплообменника попадает непосредственно в трубки конденсатора *F*. Так как температура кипения (или сжижения) жидкости повышается с увеличением давления, то в трубках конденсатора воздух, сжатый до 30—40 ат, будет конденсироваться за счет холода газообразного воздуха, вышедшего из детандера *C* после расширения и идущего в конденсаторе между трубками *E*. Жидкий воздух собирается в приемнике *g*, откуда и может выводиться через кран *H*. Хотя расширение с внешней работой может дать больший охлаждающий эффект, но при такой схеме, где воздух сжимается под давлением около 40 ат, достаточно иметь температуру около -141° .

В дальнейшем нам еще придется встречаться с кипением и конденсацией воздуха под давлением, а потому ниже приводится таблица (3) температур кипения (или сжижения) воздуха при различных давлениях, дающая представление о том, при каких температурах начинается сжижение воздуха (или при каких температурах воздух кипит) под тем или иным давлением. Температура $-140,7^{\circ}$ является критической температурой. При более высоких температурах воздух не может быть сжат никаким давлением.

Таблица 3

Давление в ат	Температура конденсации (сжижения) воздуха	
	По Цельсию	Абсолютная температура
1 ат	$-194,2^{\circ}$	78,8°
4 "	около $-177,0^{\circ}$	около 96,0°
8 "	" $-168,0^{\circ}$	105,0°
12 "	" $-162,0^{\circ}$	111,0°
20 "	" $-153,5^{\circ}$	119,5°
32 "	" $-145,0^{\circ}$	128,0°
37,2 ат	" $-140,7^{\circ}$	132,3°

Абсолютная температура получается, как уже упоминалось, прибавлением к температуре по Цельсию 273° , так как на абсолютной шкале нуль стоит там, где у Цельсия -273° . Температура -273° по Цельсию является точкой абсолютного нуля. Это—самая низкая температура; ниже ее температур не может быть.

СВОЙСТВА ЖИДКОГО ВОЗДУХА И ПРИНЦИП РЕКТИФИКАЦИИ ВОЗДУХА

Рисунки 1 и 2 дают лишь общее представление о получении жидкого воздуха, так как аппараты, в которых он обычно получается, являются более сложными и вместе с тем служат для разделения воздуха на составные части.

Аппараты эти будут описаны ниже. Сейчас, же познакомимся со свойствами жидкого воздуха и закономерностями, наблюдаемыми при испарении его. Если мы нальем жидкий воздух, полученный в машине, в какой-либо резервуар, то увидим, что он будет в нем бурно кипеть. Температура воздуха в это время будет около -194° . Тепло, которое необходимо для испарения, поступает из окружающей среды, так как последняя имеет очень высокую температуру по сравнению с точкой кипения жидкого воздуха. Стенки резервуара быстро начинают обмерзать снаружи: это конденсируются и замерзают на них находящиеся в воздухе водяные пары. Брать голой рукой такой резервуар нельзя, так как тотчас же пальцы окажутся обмороженными. Если мы опустим в жидкий воздух резиновую трубку, то через несколько секунд она затвердеет, и ее можно разбить, как стекло, ударяя о стол или молотком. Через 2—3 мин. вынутая из жидкого воздуха трубка под влиянием тепла окружающей среды снова примет свой прежний вид.

То же будет происходить со многими другими предметами. Особенно красива бывает замороженная погружением в жидкий воздух ветка сирени, которая становится точно фарфоровой или стеклянной и легко бьется при самом легком ударе. После того, как она оттает, а это происходит всего в течение нескольких минут, сирень уж не принимает своего прежнего вида, а чернеет и гибнет. Если мы выльем жидкий воздух на стол или на пол, то эффект, который при этом получится, будет представлять собой то же, что мы наблюдаем, когда плеснем воду на раскаленную плиту: воздух в виде все уменьшающихся шариков будет бегать по столу, пока не испарится полностью, а это произойдет очень быстро. Несмотря на все это, можно быстро погрузить палец в жидкий воздух и тотчас же вынуть его, причем ничего не произойдет. Однако если промедлить несколько секунд, то палец будет сильно обморожен, а еще через несколько секунд обратился бы в твердое тело и тогда, вероятно, его можно было бы сломать, как мы ломаем различные хрупкие предметы.

Любопытно, что на большинство бактерий температура жидкого воздуха не действует, и бактерии, после того как пробыли в течение нескольких дней в нем (т. е. при температуре ниже -190°), снова при возвращении к обычной температуре остались такими

же, как и до опыта. Хотя сопротивление металлов на разрыв при температурах жидкого воздуха возрастает, но они делаются более хрупкими и ломкими.

Жидкий воздух имеет слегка голубоватый цвет и прозрачен, если он получен из хорошо очищенного от углекислоты и водяных паров воздуха. В противном же случае он имеет мутно-опалесцирующий вид, что происходит от присутствия в нем твердых кристаллов воды и углекислоты. Последние легко можно отфильтровать при помощи обыкновенной фильтровальной бумаги.

Жидкий воздух должен храниться обязательно в открытых сосудах. Он не может существовать в жидком виде при температурах более высоких чем $-140,7^{\circ}$, поэтому, будучи налит в какой-нибудь резервуар, начнет испаряться в нем, пока весь не превратится в газ. Если этот резервуар был закрыт, то давление, создаваемое газообразным воздухом, в сосуде будет все время возрастать до тех пор, пока сосуд не разорвется.

Удельный вес жидкого воздуха 0,86. Это значит, что 1 л жидкого воздуха весит 0,86 кг или 860 г, а так как 1 л газообразного воздуха весит 1,293 г, то легко сосчитать, что из 1 л жидкого воздуха можно получить $860:1,293 \cong 665$ л газа. Таким образом, в закрытом сосуде, наполненном жидким воздухом, может создаться давление около 665 ат. Хранясь же в открытом сосуде, жидкий воздух не будет создавать никакого давления.

Испарение всякой жидкости требует тепла. Чтобы жидкий воздух кипел и испарялся, необходим приток тепла к нему от окружающей среды. Если мы изолируем сосуд, в котором хранится жидкий воздух, то приток тепла уменьшится и время, в течение которого он будет испаряться, значительно удлинится. На этом основаны хранение и перевозка жидкого воздуха и кислорода. По работе об этом будет сказано в последней главе книги, а сейчас отметим, что обычно жидкий воздух хранят в стеклянных или металлических резервуарах с двойными стенками, между которыми путем удаления оттуда воздуха создана пустота. Теплопроводностью пустота не обладает, а для уменьшения попадания тепла в виде тепловых лучей английский ученый Дьюар предложил серебрить внутреннюю поверхность у таких стеклянных резервуаров. Таким образом подвод тепла к жидкому воздуху становится минимальным, и жидкий воздух в хороших больших стеклянных сосудах хранится до 8 и больше дней (постепенно конечно испаряясь). Сосуды эти называются сосуда́ми Дьюара.

Уже говорилось, что кислород кипит при температуре -183° , а азот при $-195,8^{\circ}$. Кислород, таким образом, кипит при более высоких температурах и следовательно испаряется труднее, чем азот. Однако явление это не происходит так, что сперва испаряется весь азот, а затем уж только начинает испаряться кислород. С самого же начала пары над жидким воздухом будут содержать кроме азота и некоторое количество кислорода, но азота в них значи-

тельно больше, а кислорода меньше, чем в жидком воздухе. Так, если в воздухе было 21% жидкого кислорода, то пары, получающиеся при кипении этой жидкости, будут содержать всего около 7% кислорода, а остальные 93% будет составлять азот. По мере того как все большее и большее количество азота улетает из жидкости, состав ее меняется: она становится все богаче и богаче кислородом. Пары над такой азотнокислородной жидкой смесью так же делаются более богатыми кислородом, причем процентное содержание в них кислорода возрастает, и только пары, полученные из последней капли жидкости, будут представлять собой чистый кислород. Таким образом, просто испаряя жидкий воздух, мы не получим ни чистого азота, ни чистого кислорода.

Можно сказать, что состав паров над азотнокислородной жидкой смесью зависит от состава этой жидкой смеси, причем определенному составу жидкой смеси будет соответствовать определенный состав паров. Зависимость эта видна из табл. 4 и кривой 1 (рис. 3), полученных опытным путем Бэли. Надо добавить только, что с изменением состава жидкости будет меняться и температура кипения ее.

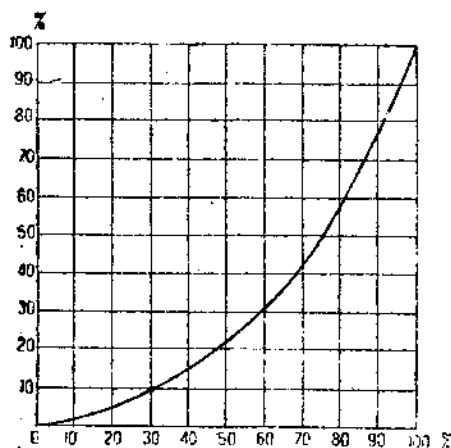


Рис. 3. Зависимость состава газовой фазы от состава жидкой смеси азота и кислорода.

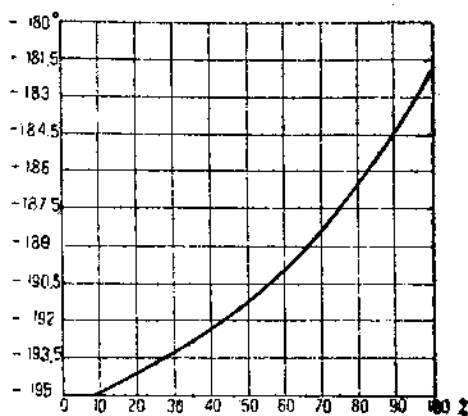


Рис. 4. Зависимость температур кипения жидкой смеси азота и кислорода от ее состава.

Так как азот кипит при -195.8° , а кислород при -183° , то температура кипения по мере удаления азота из жидкости и обогащения ее кислородом будет повышаться и к самому концу испарения поднимется до -183° . Кривая 2 на рис. 4 дает зависимость между составом жидкости и ее температурой кипения.

Результаты, приведенные в табл. 4, для воздуха приближительны, так как не учтено влияние аргона, который содержится

Таблица 4¹

Содержание кислорода в жидкости	Содержание кислорода в газе	Соответствующая температура кипения жидк.	Содержание кислорода в жидкости	Содержание кислорода в газе	Соответств. температура кип. жидк.
0,00	0,00	— 195,46	69,31	40,45	— 188,5
8,10	2,18	— 185	72,27	44,25	— 188
15,25	4,38	— 194,5	75,10	48,17	— 187,5
21,60	6,80	— 194	77,80	52,19	— 187
27,67	9,33	— 183,5	80,44	56,30	— 186,5
33,35	12,60	— 193	82,95	60,53	— 186
38,35	14,78	— 192,5	85,31	64,85	— 185,5
47,38	17,66	— 192	87,60	69,58	— 185
47,92	21,22	— 191,5	89,82	74,37	— 181,5
52,17	23,60	— 191	91,98	79,45	— 184
55,94	26,73	— 180,5	94,09	84,55	— 183,5
59,55	29,94	— 190	96,15	89,80	— 183
62,82	33,35	— 189,5	98,16	95,10	— 182,5
66,20	36,86	— 189	100,00	100,00	— 182

в воздухе в количестве 0,94%. Содержание кислорода дано в весовых процентах. Кривые 1 и 2 построены на основании этой таблицы. По горизонтальной оси (ось абсцисс) отложены составы жидкой смеси в весовых процентах кислорода, по вертикальной оси (ось ординат): у первой кривой — состав пара в весовых процентах кислорода, а у второй кривой — температуры кипения жидкости.

Из всего сказанного становится ясным, что разделение жидкого воздуха не так-то просто.

После долгих опытов Линде первому удалось в 1902 г. подвергнуть воздух ректификации и экономично разделить его. Принцип ректификации заключается в том, что пары, полученные в результате испарения воздуха и богатые кислородом, приводятся в соприкосновение с жидкостью, в которой кислорода значительно меньше, чем в парах. Пары будут подогревать эту жидкость и испарять ее, а сами конденсироваться. Полученные из этой жидкости пары содержат кислорода еще меньше, чем было в жидкости. Эти пары будут соприкасаться с жидкостью еще более бедной кислородом и т. д. до тех пор, пока в них не останется один чистый азот. Осуществляется весь этот процесс в высоких колоннах с целым рядом тарелок. Часть полученного чистого азота конденсируется и стекает вниз для конденсации поднимающихся паров кислорода, другая же часть выводится из аппарата. Нагляднее все это видно на схеме, изображенной на рис. 5.

¹ Таблица взята из книги Ж. Клода „Жидкий воздух“.

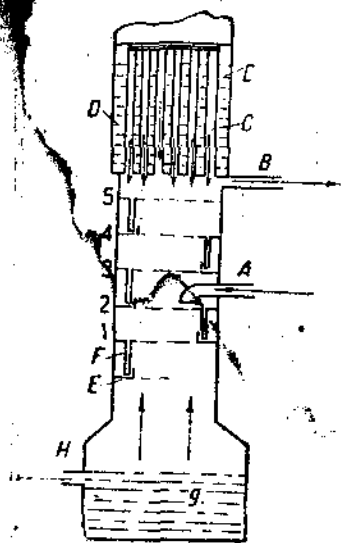


Рис. 5. Схема ректификационной колонны для жидкого воздуха.

Жидкий воздух по трубке *A* поступает в колонный аппарат и попадает на тарелку 2. Здесь он испаряется за счет подогреваемого парами азота и кислорода, идущими снизу. Если мы воспользуемся приведенной выше таблицей Бэли (или кривой на рис. 3), то увидим, что над жидкостью состава воздуха (воздух по весу содержит 23% кислорода) должны быть пары с 7% кислорода и 93% азота. Эти пары, поднимаясь кверху на тарелку 3, будут конденсироваться там за счет стекающего вниз из трубок *C* жидкого азота. Таким образом жидкость на третьей тарелке будет состоять из 7% кислорода и 93% азота, а пары над этой тарелкой будут (по той же таблице Бэли) иметь всего 2% кислорода и 98% азота.

Тарелки представляют собой сплошные горизонтальные перегородки с целым рядом мелких отверстий. Пары снизу проходят через эти отверстия и конденсируются в жидкость, а жидкость, находящаяся на тарелках, испаряется за счет тепла этих паров. Если жидкости на тарелке скапливается много, то избыток ее может стекать по трубкам *F*. Чтобы предотвратить проход паров по трубкам *F*, минуя самую тарелку, трубки *F* снабжены внизу гидравлическим затвором *E*.

Пары с третьей тарелки поднимаются на четвертую, конденсируются там, но испаряют жидкость такого же состава, как они сами, и следовательно в парах над этой тарелкой будет всего (по таблице Бэли) 0,7% кислорода и 99,3% азота. Над пятой тарелкой мы будем иметь уже почти чистый азот. Часть этого газообразного азота выводится по трубе *B* как готовый продукт, а другая часть, попадая в трубки *C*, конденсируется в них за счет отдачи своего тепла находящейся между трубками кипящей жидкости *D* (например жидкому кислороду с меньшим давлением). Жидкий азот, полученный в трубках *C*, стекает вниз для конденсации кислорода в поднимающихся кверху парах.

Избыток жидкого воздуха со второй тарелки перетекает на первую и частично испаряется там за счет паров кипящей в резервуаре *g* жидкости. Избыток жидкости с первой тарелки стекает в резервуар *g*. Здесь будет уже не просто воздух, а очень богатая кислородом жидкость, которую можно по трубке *H* выводить отсюда для дальнейшего разделения и получения более чистого кислорода.

На практике конечно пяти тарелок для получения чистого азота из воздуха недостаточно, и их в аппаратах значительно больше,

но мы рассматриваем здесь только схему устройства ректификационных колонок, чтобы было понятно, в чем заключается принцип ректификации. Вместо тарелок ректификационные колонки можно наполнять какими-нибудь подходящим материалом, например фарфоровыми шариками. От формы и устройства тарелок, величины и количества отверстий в них, от расстояния между тарелками и количества тарелок зависит, насколько хорошо будет работать ректификационная колонка.

Постройка аппаратов для сжижения и ректификации воздуха требует большого опыта. Первый аппарат был построен обществом холодильных машин Линде в 1902 г. в Германии. Это общество владело патентом на ректификацию воздуха, и потому другие лица и фирмы в Германии не имели права на постройку и эксплуатацию таких аппаратов. Только в 1917 г. две другие немецкие фирмы: общество Гейландт в Берлин-Мариендорфе и компания Мессер во Франкфурте на Майне, начали изготавливать азотнокислородные аппараты своей системы. Постройка аппаратов ведется главным образом в Германии и Франции. В последней для эксплуатации изобретения Клода существует общество „Жидкий воздух“.

Аппараты системы Клода строятся также и в Германии, но строит их по особому соглашению общество Линде.

Наиболее распространенными системами азотнокислородных установок в настоящее время являются: 1. Система Линде. 2. Система Клода. 3. Система Мессера. 4. Система Гейландта.

КОМПРЕССОРЫ ДЛЯ СЖАТИЯ ВОЗДУХА

Мы видели, что для получения жидкого воздуха необходимо иметь сначала сжатый газообразный воздух. Это сжатие производится воздушными компрессорами. В настоящее время почти всюду употребляются четырехступенчатые компрессора (на установках Клода — трехступенчатые), в которых воздух сжимается в четыре приема последовательно в четырех разных цилиндрах.

Такие компрессора могут сжимать воздух до 200 ат. В первой ступени сжатие происходит примерно до 3—3½ ат., во второй — до 14—16 ат., в третьей — до 50 и наконец в четвертой ступени — до 200 ат. Если работу ведут при более низких давлениях, то четвертая ступень компрессора будет иметь соответственно более низкое давление, а это отразится на предыдущих ступенях: давление в третьей ступени станет тоже значительно более низким.

Сжать воздух сразу в одном цилиндре от 1 ат до 200 или даже до 50—60 ат нельзя. Мы знаем, что воздух при сжатии нагревается; чем больше сжатие, тем значительнее выделение тепла и тем более высокие температуры воздух будет принимать. При сжатии сразу до высоких давлений эти температуры будут слишком высоки. С другой стороны, вредное пространство в цилиндре будет оказывать огромное влияние на работу такой одноцилиндровой машины. Все это заставляет прибегать к многократному постепенному сжатию воздуха; при этом коэффициент полезного действия компрессора повышается.

Каждый цилиндр снабжен всасывающими и нагнетательными клапанами и водяным холодильником, куда направляется для охлаждения сжатый газ. Таким образом в следующую ступень воздух будет поступать снова при температуре нормальной или близкой к ней. Кроме того каждый цилиндр имеет рубашку для охлаждения водой стенок цилиндра.

Компрессора для воздуха бывают самой разнообразной производительности в зависимости от производительности азотнокислородного аппарата, для которого они подают сжатый воздух. Цилиндры компрессора обыкновенно располагаются по одной оси, а холодильники часто помещаются в одну ванну. Холодильники третьей и четвертой ступеней представляют собой змеевики, сделанные из стальных труб. Холодильники первой и второй ступеней бывают и трубчатыми, и змеевик. выми, и другой формы. На рис. 6 схематично в плане изображен компрессор фирмы Зюльцер производительностью около 700—750 м³ воздуха в час.

Воздух поступает по трубопроводу А в первый цилиндр компрессора В, откуда направляется в холодильник С, расположенный

в одной ванне с остальными холодильниками. Отсюда воздух попадает во вторую ступень компрессора *G* и затем по трубопроводу *E* в холодильник *F*. У большинства установок после второй ступени, т. е. при давлении 14—15 ат, происходит очистка воздуха от углекислоты. На данной схеме воздух из холодильника второй ступени,

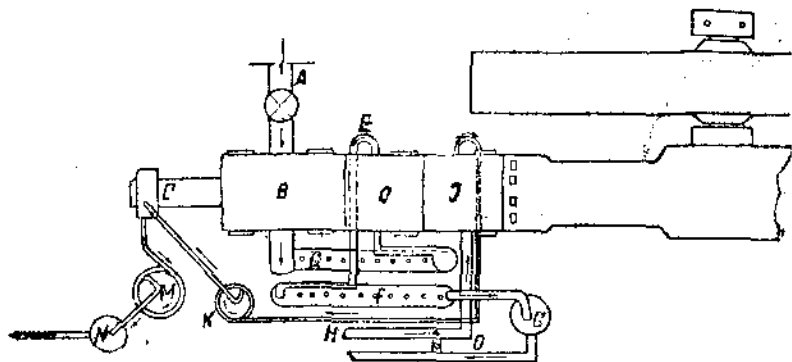


Рис. 6. Схема воздушного компрессора.

пройдя маслоотделитель *G*, направляется в декарбонизаторы (аппараты для удаления углекислоты) и возвращается из них по трубопроводу *H* в цилиндр третьей ступени *J*, откуда идет в холодильник *K* и цилиндр четвертой ступени *C*. Отсюда воздух окончательно

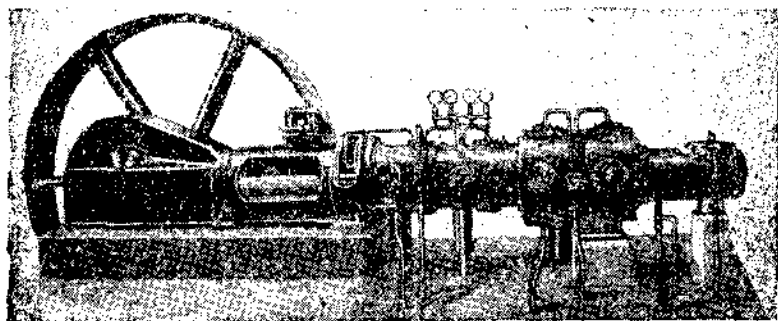


Рис. 7. Внешний вид воздушного компрессора.

сжатый и охлажденный в холодильнике *M* (после очистки в маслоотделителе *N* от масла, которое было им увлечено из компрессора), направляется на осушку.

Цилиндр первой ступени — двойного действия и имеет два всасывающих и два нагнетательных клапана. Остальные цилиндры —

ординарного действия и имеют по одному всасывающему и одному нагнетательному клапану. У четвертой ступени клапан комбинированный, т. е. в одном корпусе помещаются оба клапана.

Необходимо указать еще на наличие „обводной“ линии, соединяющей трубопровод, идущий в декарбонизатор, с трубопроводом Н, идущим из декарбонизатора. Если открыть имеющийся на этой „обводной“ линии вентиль О, то воздух будет попадать в третью ступень компрессора, минуя очистители от углекислоты. Вентиль О открыт при пуске компрессора и закрывается тогда, когда давление во второй и третьей ступенях поднимется до нормального.

Такой компрессор приводится в действие мотором в 190 kW и делает 120—130 об./мин.

На рис. 7 виден общий внешний вид аналогичного компрессора, причем все холодильники и маслоотделители помещены под полом.

Движение от мотора передается при помощи ременной передачи, обычно с натяжным роликом, на большой шкив, который вместе с тем является и маховиком.

Уход за такими компрессорами довольно прост, и обслуживание их несложно. На одном из заводов СССР три таких компрессора обслуживаются машинистом и одним масленщиком (обычно студент-практикант).

Для смазки употребляются два сорта масел. Движущиеся наружные части (подшипники, крейцкопф, ползуны) смазываются обыкновенными машинными маслами (машинное № 2, машинное Т и др.), причем осуществлена циркуляция масла, т. е. масло с движущихся частей стекает в сборник, установленный под полом, и, пройдя через фильтр, снова насосом подается на смазку. Цилиндры смазываются другим маслом, и так как температура в цилиндрах достигает $+170^{\circ}$, то масла эти должны обладать высокой температурой вспышки, быть достаточно вязкими, а также не содержать осмалливающих примесей, которые создают отложения на стенках цилиндра и на клапанах и могут самовозгораться.

Хорошие результаты дает применение масел vapor A, авиационного ААС и некоторых других. Подробные данные об этих маслах имеются в прейс-куранте Нефтесиндиката.

Масло подается в цилиндры компрессора под давлением, создаваемым специальным насосом, который приводится в движение от вала компрессора. Маслоотделители компрессоров предназначены задерживать брызги масла, захваченные током газа из цилиндра. Устройство их видно из схемы (рис. 8); это — стальные цилиндры способные выдержать соответствующее давление и снабженные внизу вентилями для периодического уда-

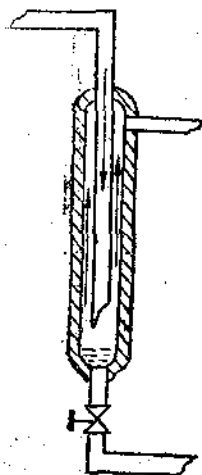


Рис. 8. Схема маслоотделителя.

ления собравшейся там жидкости (масло и сконденсировавшаяся вода).

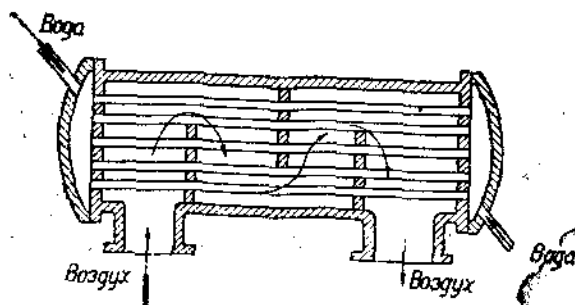


Рис. 9.

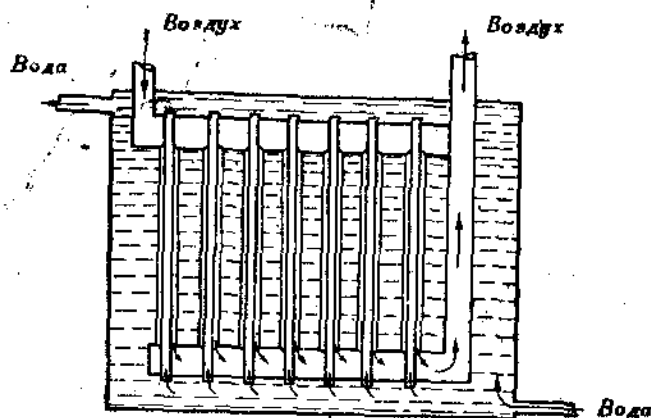


Рис. 10.

Рис. 9 и 10. Схемы воздушных холодильников низких ступеней компрессора.

Рисунки 9 и 10 показывают устройство холодильников для низких ступеней компрессора (1-й и 2-й ступеней). Холодная вода циркулирует по трубкам и охлаждает воздух через стенки трубок.

ОЧИСТКА ВОЗДУХА ОТ ПЫЛИ, УГЛЕКИСЛОТЫ И ВЛАГИ

Воздух, который должен подвергнуться сжижению, прежде всего надо очистить от примесей, мешающих нормальному течению процесса.

Такими постоянными примесями в воздухе являются: пыль, углекислота и пары воды.

Пыль попадает в цилиндры компрессора, осаждается на масляных стенках цилиндра и содействует преждевременному изнашиванию компрессора и уменьшению его производительности.

Углекислота и водяные пары воздуха при низких температурах (которые имеются в теплообменнике и аппарате для сжижения и разделения воздуха) затвердевают, забивают трубки теплообменника и нарушают правильную работу аппарата.

Вот некоторые данные об углекислоте. Углекислота замерзает при -56° . В жидкое состояние она переходит при:

$+30^{\circ}$ по Цельсию и	73 ат
0° " "	35,4 "
-30° " "	14,6 "

Количество пыли и водяных паров в воздухе различно и колеблется в больших пределах.

Количество углекислоты более или менее постоянно и равно 0,03%, или 0,59 г в 1 м³ воздуха.

Очистка от пыли производится при помощи фильтров, которые помещаются перед компрессором.

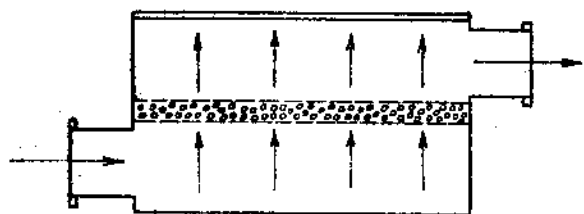


Рис. 11. Схема воздушного фильтра.

Наиболее часто употребляемые фильтры представляют собой железные ящики (рис. 11) с двумя сетчатыми перегородками по середине, между которыми находится слой в 5—6 см мелких медных колец типа Рашига ($d=H=10$ мм).

Кольца пропитываются маслом для лучшего удержания пыли, причем лучше всего употреблять масло Фригус, которое имеет очень низкую температуру застывания, что важно зимой, когда воздух поступает на фильтр очень холодным.

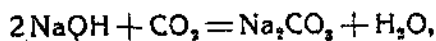
Для очистки фильтра слой колец вместе с сетками делается выдвижным, т. е. представляет собой как бы выдвижной ящик. Иногда употребляют и полотняные фильтры.

Если очистка от углекислоты производится под атмосферным давлением, т. е. еще до поступления воздуха в компр-ссор, то фильтр вовсе не употребляется, так как вместе с углекислотой будет удержана и пыль. Однако в целях компактности аппаратуры, более лучшего использования щелочи, при помощи которой ведется очистка, и большей степени самой очистки, почти всюду теперь применяют очистку от углекислоты под увеличенным давлением.

Делается это в установках системы Линде и системы Гейландта после второй ступени компрессора под давлением в 14 ат. Воздух после этого возвращается в третью ступень—для дальнейшего сжатия.

На установках системы Клода воздух очищают от углекислоты после третьей ступени компрессора, т. е. окончательно сжатым (установки Клода в зависимости от производительности агрегатов имеют рабочее давление от 12 до 50 ат.). Здесь очистка ведется при помощи одного или двух (последовательно включенных) скрубберов, заполненных кольцами Рашига и орошаемых раствором едкого натра в 16°. Боме, который при помощи насоса под давлением поступает на верх скрубберов. Воздух движется снизу вверх, а стекая вниз жидкость собирается в особый резервуар и снова подается на верх скруббера. Раствор может быть сменен во время работы.

Реакция протекающая между углекислотой воздуха и едким натром, такова:



т. е. в результате реакции мы будем получать соду.

Рис. 12 изображает схему декарбонизатора установок Гейландта.

Это — два горизонтально расположенных один над другим котла, соединенные между собой двумя трубами А и В. Труба В большего диаметра загружена кольцами Рашига, которые поддерживаются сеткой С. Нижний котел и часть труб залиты раствором едкого натра. Уровень раствора доходит до крана Д. В нижнем котле имеется вертикальная перегородка Е, не достигающая до дна его.

Воздух под давлением около 14 ат. поступает по воздухопроводу F и пробулькивает через щелочь. Благодаря кольцам Рашига он хорошо перемешивается с жидкостью и увлекает часть щелочи в верхний котел; последняя оттуда сливается обратно по трубе А. Этим достигается циркуляция щелочи.

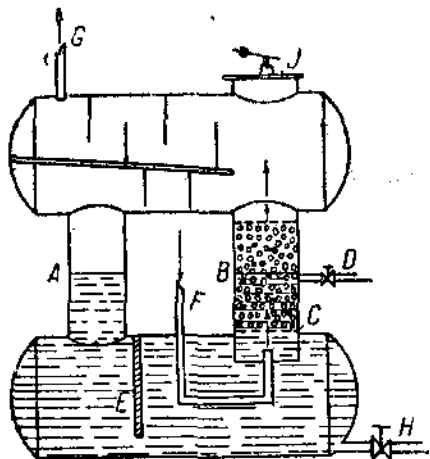


Рис. 12. Схема декарбонизатора Гейландта.

В верхнем котле имеется целый ряд перегородок для удерживания брызг увлеченной щелочи. Воздух выходит по воздухопроводу *G* и после этого направляется во второй декарбонизатор такого же устройства. Оттуда он попадает в брызгоуловитель, сделанный по типу маслоотделителей компрессоров (рис. 8), и возвращается обратно к компрессору (в цилиндр третьей ступени) для дальнейшего сжатия.

Смена щелочи происходит во время остановки всего агрегата через кран *H*. Через этот кран как сливают отработанную щелочь, так и закачивают затем свежую при помощи маленького центробежного насоса.

Люк *J* на верхнем котле служит для осмотра декарбонизатора, смены колец Рашига и пр.; на нем же установлен предохранительный клапан.

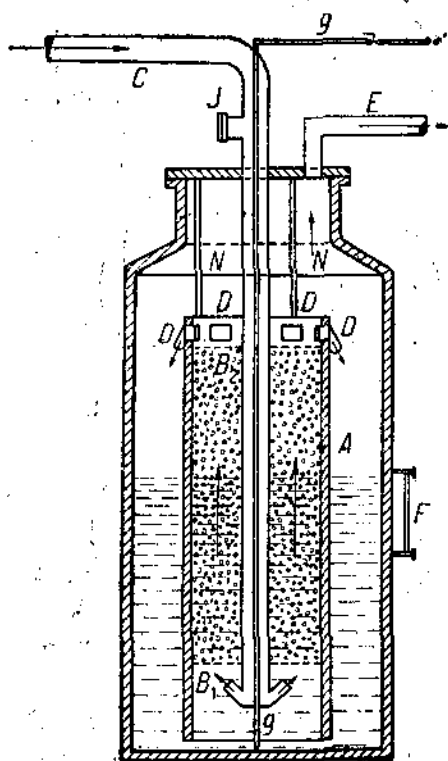


Рис. 13. Схема декарбонизатора Линде.

с жидкостью. Увлеченный раствор стекает обратно через отверстия *D*, снабженные козырьками, в стенках внутреннего цилиндра. Воздух выходит через трубу *E* и попадает в брызгоуловитель. Об уровне щелочи судят по стеклу *F*. Через краники стекла набирается проба

Щелочь употребляется от 14° до 16° по Боме. Использование щелочи—80—100%. Смену щелочи обычно производят так: первый по ходу воздуха декарбонизатор освобождают от отработавшей щелочи совершенно и сообщают его со вторым декарбонизатором при помощи трубы, не указанной на схеме. Тогда половина щелочи второго декарбонизатора (где она отработала лишь частично) перельется в первый. После этого оба аппарата доливают до крана *D* новым раствором едкого натра.

Рис. 13 показывает устройство декарбонизатора установки Линде.

В резервуар цилиндрической формы, имеющий сверху горловину, вставлен цилиндр *A*, снабженный сетками *B*₁ и *B*₂, между которыми засыпаны кольца Рашига. Этот цилиндр подвешен на трех тягах *N*.

Воздух поступает по трубе *C*, пробулькивает через раствор каустика и, благодаря кольцам Рашига, хорошо перемешивается

щелочи для анализа. Использование щелочи — 75—80%. Использовать щелочь в большей мере невыгодно, так как значительно ухудшается очистка воздуха и в теплообменнике аппарата для снижения и разделения воздуха быстро набирается столько твердой углекислоты, что его приходится преждевременно останавливать для „размораживания“. Смена раствора производится во время остановки аппарата, или после перехода в работе на другой декарбонизатор, если таковой имеется (обычно это бывает, если установка состоит из нескольких агрегатов).

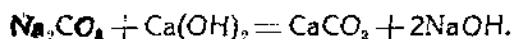
Отработавшую щелочь выдавливают через трубку G за счет давления в резервуаре; при этом предварительно закрывают вентили на входной трубе C—перед декарбонизатором—и на выходной трубе E—за декарбонизатором (на чертеже не показаны).

Наполнение свежей щелочью (14—16° Боме) производят при помощи ручного или центробежного насоса через воронку, прикрепляемую болтами к патрубку J. Патрубок этот во время работы или выдавливания щелочи закрыт заглушкой, привинченной болтами.

Размеры декарбонизатора различны в зависимости от производительности агрегата: так, для агрегата с производительностью 750—800 м³ азота в час декарбонизатор имеет высоту около 4 м и диаметр около 1,6 м.

Воздух очищается здесь от CO₂ под давлением в 12—15 ат и по очистке возвращается в компрессор (в 3-ю ступень). Отработавшая щелочь (NaOH) может (и на многих установках это делается) подвергаться регенерации известью, — тогда расход каустика будет совсем невелик.

Реакция, происходящая при регенерации соды в щелочь, такова:



Выделившийся углекислый кальций легко отделить фильтрованием или даже отстаиванием.

Ниже дано содержание NaOH в растворах различной крепости по Боме, обычно употребляемых для улавливания углекислоты на азотнокислородных установках.

В практике обычно на 1000 м³ полученного чистого азота расходуется не более 3 кг едкого натра (без регенерации его).

О степени отработанности щелочи и о своевременности замены раствора судят по анализу, который производится титрованием нормальной серной кислотой.

Производство анализа настолько просто, что обычно его выполняют рабочие, обслуживающие установку. При этом знание титра употребляемой кислоты не обязательно, так как важно определить не количество NaOH в единице объема, а лишь степень превращения щелочи в соду. Анализ производят так: 5 см³ раствора, взятые пипеткой, разбавляют водой, добавляют одну каплю фенолфталеина и титруют кислотой из бюретки. При этом титруется

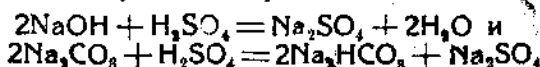
Таблица 5

Раствор едкого натра при 15° Ц.

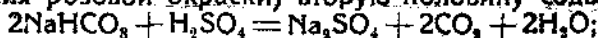
° Боше	Удельный вес	% содерж. NaOH	Колич. NaOH в кг на 1 м³
12	1,091	8,08	88
13	1,100	8,78	96,6
14	1,108	9,50	105,3
15	1,116	10,30	114,9
16	1,125	11,06	124,4
17	1,134	11,90	134,9
18	1,142	12,63	145
19	1,152	13,50	155,5
20	1,162	14,35	166,7

свободный NaOH и половина соды (Na_2CO_3). Титруют до обесцвечивания раствора.

При титровании происходят реакции:



После этого прибавляют метилоранжа и продолжают титровать (до появления розовой окраски) вторую половину соды:



углекислота при этом улетает.

Расчет результатов прост и производится так. Если A — количество кислоты (в см³), пошедшее на титрование с фенолфталеином, а B — общее количество кислоты, пошедшее на оба титрования (общая щелочность), то $B - A$ будет количество кислоты, затраченное на титрование половины соды. Тогда

$$C = \frac{2(B - A) \cdot 100}{B}$$

даст процент использования нашего раствора. Вычитая C из 100, получаем количество в % неиспользованной щелочи.

Растворение каустика производится в особых железных баках, снабженных мешалками; при этом рабочий, выполняющий эту работу, должен быть снабжен очками, резиновыми калошами и резиновыми перчатками, иначе, при вскрытии железных барабанов с каустиком, рабочий может обжечь себе руки и глаза или испортить кожаную обувь.

Декарбонизаторы перед каждым наполнением свежим раствором щелочи рекомендуется промывать водой.

Очистка от водяных паров обычно производится при помощи гигроскопических веществ (твердый каустик, хлористый кальций),

или же путем вымораживания водяных паров предварительным, до поступления в разделительный аппарат, охлаждением воздуха до -25° или -30° Ц.

Происходит эта операция всегда после окончательного сжатия воздуха непосредственно перед входом в теплообменник аппарата. Воздух выгодно осушать сжатым потому, что часть имеющихся в нем паров уже будет сконденсирована в холодильниках компрессора и задержится в маслоотделителях его.

Количество водяных паров в одном м^3 воздуха будет зависеть лишь от температуры и почти не зависеть от давления, т. е. количество влаги будет почти одинаково в 1 м^3 воздуха под атмосферным давлением и в 1 м^3 воздуха под давлением 15, 30 или 100 ат. В первом случае 1 м^3 воздуха весит 1,293 кг, во втором случае — соответственно в 15, 30 и 100 раз больше (если не учитывать отступления от закона Бойль Мариотта).

Ниже дана таблица содержания влаги в граммах в 1 м^3 воздуха в зависимости от температур:

Таблица 6

Температура	Количество влаги в г/м ³	Температура	Количество влаги в г/м ³
— 60	0,011	— 10	2,14
— 50	0,038	0	4,89
— 40	0,117	+ 15	12,82
— 30	0,333	+ 20	17,72
— 20	0,88	+ 30	30,21

Теперь рассмотрим пример, из которого будет ясно видна выгода осушки воздуха под давлением.

Пусть наша установка использует 1000 м^3 воздуха в час, и пусть температура воздуха 15° Ц. Если бы воздух был насыщен водяными парами, то в этом случае в 1 м^3 воздуха содержалось бы (см. таблицу) 12,82 г влаги. Обычно воздух бывает не насыщен, и его относительная влажность колеблется от 10 до 90%. В нашем примере пусть эта относительная влажность равна 50%, т. е. в одном м^3 воздуха содержится не 12,82 г, а всего 6,41 г влаги.

Таким образом в 1000 м^3 воздуха будет 6410 г воды. Мы сжимаем этот воздух в компрессоре до давления 60 ат и затем охлаждаем снова до его нормальной температуры (15° Ц); тогда, по закону Бойля-Мариотта, он будет занимать объем всего $1000:60 = 16,6 \text{ м}^3$, и в нем, по приведенной выше таблице, будет всего $16,6 \times 12,82 = 213$ г водяных паров. Остальная же влага $6410 - 213 = 6197$ г сконденсируется при сжатии и охлаждении в холодильниках компрессора и останется в маслоотделителях.

Таким образом нам остается удержать из воздуха под давлением в 60 ат не 6,41 кг воды, а всего 0,2 кг на 1000 м³ перерабатываемого воздуха.

Аппараты, в которых производится осушка воздуха хлористым кальцием или твердым едким натром (каустиком) устроены следующим образом (рис. 14): в наружный стальной цилиндр вставлен второй цилиндр А, который загружается кусками каустика или хлористого кальция. Загруженное вещество поддерживается сеткой В. Цилиндр А может выниматься для перегрузки, промывки и просушки.

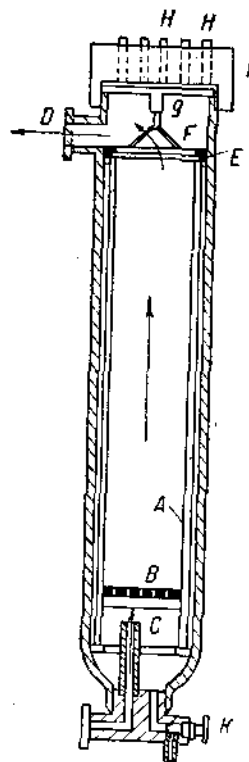


Рис. 14. Схема осушительного резервуара.

Воздух поступает через трубку С, проходит через сетку и слой гигроскопического вещества, сушится тут и выходит из осушительного резервуара через трубопровод Д. Чтобы не было прохода воздуха между стенками цилиндров, сверху цилиндра А кладется резиновое кольцо Е, которое прижато металлическим кольцом F и диском G при помощи прижимных болтов Н в крышке цилиндра. Сама крышка наворачивается на цилиндр с помощью имеющейся на ней и на цилиндре нарезки. Гигроскопическое вещество под действием влаги расплывается, и стекающий вниз раствор удаляется время от времени выдуванием через вентиль К.

Воздух проходит последовательно целый ряд таких цилиндров: 5—10 штук и больше, в зависимости от производительности установки.

Такие резервуары устанавливаются обыкновенно батареями по несколько штук; в каждой во время смены гигроскопического вещества батарея выключается, а после перегрузки включается последней по ходу воздуха.

Выдувание собирающейся в нижней части резервуаров жидкости должно производиться систематически и по возможности чаще, так как в случае скапливания больших количеств влаги она может увлечься в аппарат для разделения воздуха и там замерзнуть, закупорив теплообменник аппарата. Когда продувочный вентиль оказывается засоренным кусочками гигроскопического вещества — произвести удаление влаги не удается. Тогда часто может оказать помощь прогревание засоренного места паром, если в помещении имеется паропровод.

Расход на осушку хлористого кальция по данным практики равен приблизительно 1,7—2 кг на 1 кг удаляемой влаги, т. е. в вышеприведенном примере для удаления из 1000 м³ воздуха 0,2 кг водяных паров потребуется около 400 г хлористого

кальция. Это составит на 1 м³ воздуха 0,4 г, если воздух сушится под давлением 60 ат. Если воздух сушится под более низкими давлениями, то соответственно будет несколько больше и расход хлористого кальция.

Обычные размеры употребляемых для осушки воздуха цилиндров следующие: диаметр от 200 до 250 мм, высота от 1800 до 2000 мм. Для агрегата с производительностью 500—800 м³ азота в час необходимо иметь минимум десять таких цилиндров, соединенных в две батареи по 5 штук.

Хлористый кальций лучше брать не плавленный, а прокаленный. Часть его легко регенерировать, прокаливая после употребления в прогивнях на голом огне.

Если осушка ведется при помощи едкого натра, то едкий натр после осушительных резервуаров и раствор его, выдуваемый при продувках, можно употреблять для аппаратов, освобождающих воздух от углекислоты.

На больших азотных установках для осушки воздуха часто пользуются вымораживанием водяных паров. Для этого воздух охлаждают до -25° , еще лучше до -30° Ц, и при такой температуре водяные пары конденсируются и замерзают.

В одном м³ воздуха при температуре -33° Ц (как видно из табл. 6) содержится всего 0,333 г водяных паров. Принимая во внимание, что воздух и здесь сушится под давлением и следовательно 1 м³ воздуха представляет собой несколько десятков м³, приведенных к атмосферному давлению, — становится ясным, что это количество влаги совсем незначительно. Такая осушка во многих отношениях даже лучше химической осушки с гигроскопическими веществами. Охлаждение воздуха производится в особых аппаратах с помощью холодильных аммиачных машин. Нужный холод получается за счет испарения жидкого аммиака, который, испаряясь, поглощает теплоту у воздуха и тем охлаждает его. Охлаждение воздуха и вымораживание влаги требуют затраты определенного количества энергии. Эти затраты приблизительно равны 10—12 kWh на 1000 м³ воздуха.

Подсчет легко произвести, зная теплоемкости воздуха при различных температурах и давлениях и зная количество тепла, которое необходимо для конденсации и замораживания водяных паров, а также приняв во внимание, что аммиачные машины затрачивают 1 kWh для производства 1300—2000 фреон-и (фреония—это отрицательная калория, т. е. единица холода, соответствующая одной калории).

На установках, где азот вырабатывается для производства синтетического аммиака и где имеются цехи для получения азотной кислоты из этого аммиака, жидкий аммиак должен быть испарен для азотнокислотной установки, пользующейся обычно газообразным аммиаком. Здесь уже не нужно иметь целую аммиачную холодильную установку, и достаточно лишь установить один аппарат для испарения аммиака и охлаждения воздуха. Такие аппараты назы-

ваются форкюллерами. Газообразный аммиак из форкюллера может поступить или в газгольдер (откуда будет расходоваться для производства азотной кислоты), или засасываться аммиачным компрессором, сжижаться и снова направляться на испарение в форкюллер.

Устройство форкюллера видно из схемы (рис. 15). Воздух, уже освобожденный от углекислоты и окончательно сжатый, поступает в аппарат по трубопроводу *A* и проходит по змеевику *I*, идя между трубками *B*, расположенными в змеевике. Навстречу воздуху по трубкам *B* движется аммиак, который подходит по трубопроводу (показанному на схеме одной сплошной линией).

Аммиак перед входом в форкюллер дросселируется вентилем от давления 8 — 12 ат (под которым он подается) до 4 ат, а потом за счет испарения части аммиака температура его понижается до — что вызывает охлаждение воздуха. Охлаждение ведут так, чтобы воздух, выходящий из змеевика *I* по трубопроводу *E*, имел температуру $+2^{\circ}$ или $+3^{\circ}$, иначе при температурах ниже 0° влага, вылившаяся из воздуха, стала бы замерзать в змеевике и забила бы проход. Воздух направляется далее в водоотводчик *F*, откуда поступает для дальнейшего охлаждения (через распределительный блок *G*₁) в змеевик *II* или *III*. Значительная часть влаги воздуха идет уже сконденсирована при первом охлаждении. Она будет задерживаться в водоотводчике, и поэтому последний надо регулярно „продувать“ для удаления оттуда воды.

„Продувка“ делается каждые полчаса открытием вентиля *H*.

Аммиак, вышедший под давлением в 4 ат из первого змеевика, направляется по трубопроводу *J* тоже в змеевик *II* или *III* навстречу идущему там воздуху. Из змеевиков *II* и *III* в работе всегда находится только один, так как они работают по очереди.

По пути аммиак дросселируется в вентиле *K* почти до атмосферного давления и входит через краны *J*₁ или *J*₂ в тот змеевик, который в настоящий момент в работе. Там аммиак идет по трубкам *B*₁, окончательно испаряется, охлаждается сам до -30° или -34° и охлаждает воздух, двигающийся между трубками. Воздух охлаждается до -25° или -30° ; при этом влага из него не только конденсируется, но и замерзает, забивая проход между аммиачными трубками.

Когда один из змеевиков окажется „замороженным“, работу переводят на другой, а первый „размораживают“.

Воздух выходит через *L*₁ или *L*₂ почти совершенно сухим и через распределительный блок *G*₂ направляется в аппарат для сжатия и разделения его на составные части.

Испарившийся газообразный аммиак через вентиль *M*₁ или поступает в трубопровод *M* и дальше в газгольдер (газохранилище) или аммиачный компрессор.

При наличии аммиачного компрессора воздух возможно охлаждать и до более низких температур, так как последний может создавать в трубках, где происходит испарение аммиака, давление

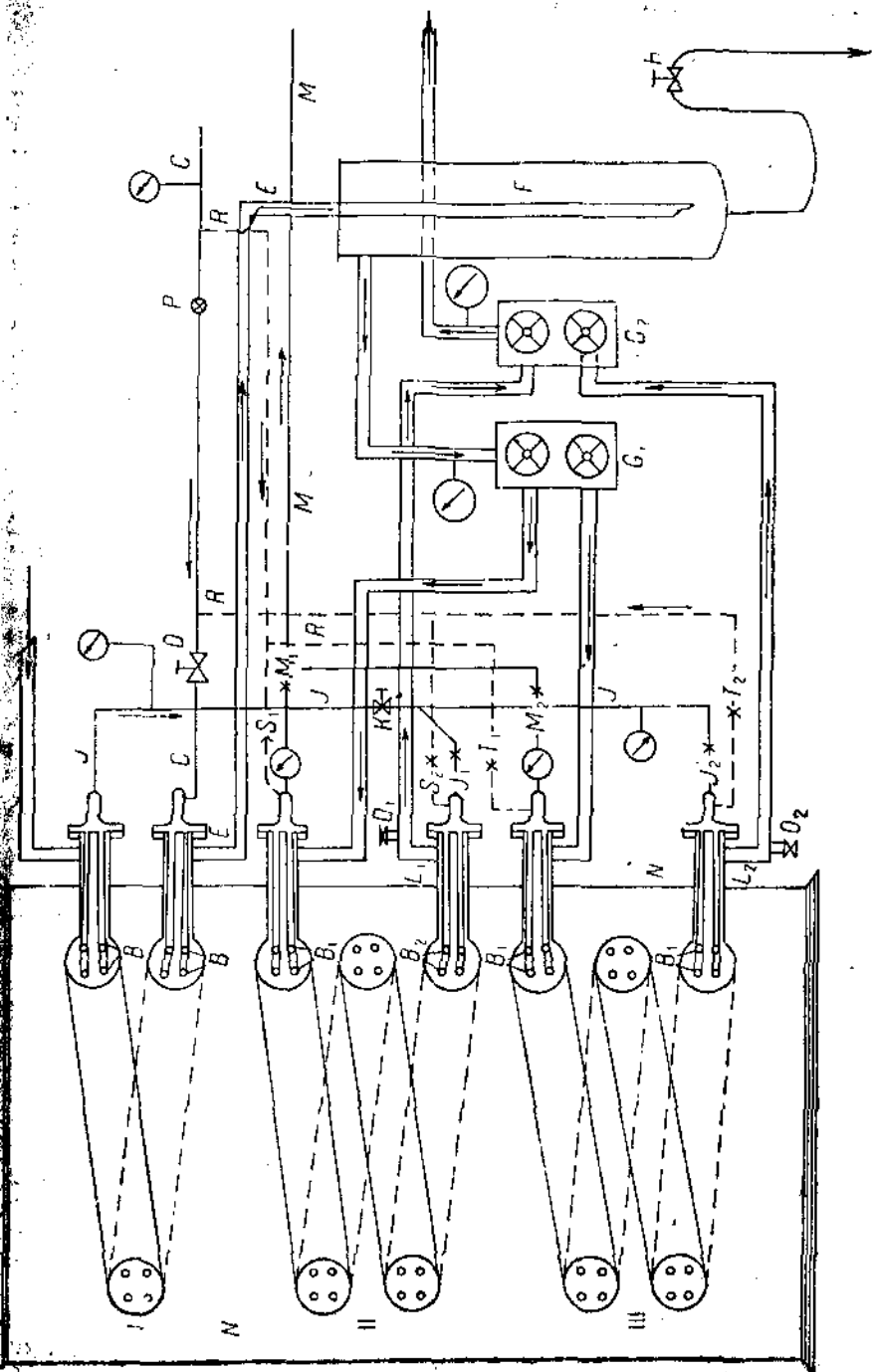


Рис. 15. Схема форкюллера.

ниже атмосферного. Качество осушки при этом значительно улучшится.

Все три змеевика форкюллера расположены в общем деревянном кожухе N и хорошо изолированы от притока тепла извне шлаковой ватой или асбестом, которые заполняют весь внутренний объем кожуха и пространство между змеевиками и отдельными витками змеевиков.

"Размораживание" производится за счет тепла жидкого аммиака, который пускается по аммиачным трубкам в жидком виде помимо дроссельного вентиля под полным своим давлением. Для этого закрывают на аммиачном трубопроводе C кран P , и жидкий аммиак по линии R (показанной пунктиром) направится в обход этого крана P , пройдя при этом через "размораживаемый" змеевик, для чего открывают краны S_1 и S_2 , или T_1 и T_2 . Жидкий аммиак обладает очень большой теплоемкостью (больше, чем у воды), а температура его при 8—12 ат будет от 18° до 30° Ц.

Таким образом он принесет достаточное количество тепла для оттаивания льда намерзшего на наружных стенках аммиачных трубок в змеевиках. Возвратившись в линию C по другую сторону крана P , жидкий аммиак дросселируется вентилями D и производит свою обычную работу.

Влага, полученная в результате оттаивания, выдувается из междутрубного пространства змеевиков через продувочные вентили O_1 или O_2 .

Во время работы змеевика II на распределительных блоках G_1 и G_2 открыты верхние воздушные вентили, нижние же закрыты. При работе змеевика III , наоборот, закрыты верхние вентили, и открыты нижние. Соответствующим образом в первом случае открыты аммиачные краны J_1 и M_1 , во втором же случае — J_2 и M_2 .

Переход во время работы со змеевика II на змеевик III и наоборот должен осуществляться не тогда, когда один из них окончательно забьется льдом, а через определенный промежуток времени (например через сутки или, еще лучше, через 12 час.), так как по мере намерзания влаги на трубках B_1 теплообмен ухудшается. Переход этот осуществляется так: предположим, что в работе находится змеевик III , змеевик же II "оттаивается", т. е. через него проходит жидкий аммиак по линии R , указанной на схеме пунктиром. Тогда необходимо прежде всего, открыв предварительно кран P , закрыть аммиачные краны T_1 и T_2 . Далее, открываем продувочный вентиль O_2 и немного нижний воздушный вентиль на блоке G_1 , чтобы выдуть всю влагу, собравшуюся в змеевике III во время его отогревания. Нижний вентиль на блоке G открывают немного, или это делается периодически, с таким однако расчетом, чтобы давление воздуха, поступающего в аппарат, не снижалось. После этого открывается вентиль M_2 и кран J_2 , и тогда аммиак, дросселируемый вентилем K , будет поступать не только в змеевик II но и в змеевик III . При этом следует смотреть, чтобы давления на амми-

ных манометрах оставались нормальными, и в случае необходимости дроссельный вентиль D открывается в большой степени.

Когда температура воздуха, выходящего через вентиль O_2 , понижается в достаточной степени (а об этом можно судить по термометру, стоящему на воздуховоде между змеевиком и вентилем O_2), вентиль O_2 закрывают. Как только давление воздуха в змеевике III сравняется с рабочим нормальным давлением, открывают полностью оба нижние воздушные вентиля на блоках G_1 и G_2 и закрывают верхние.

В работе теперь уже змеевик III .

Аммиачные вентили J_1 и M_1 у змеевика II закрывают, и после того как убедятся, что работа агрегата попрежнему продолжается нормально, пускают змеевик II на оттаивание. Для этого открывают краны S_1 и S_2 на аммиачной линии R и закрывают кран P . Преимущество осушки воздуха путем его охлаждения в форкюллерах состоит в следующем:

1. Воздух поступает в аппарат для разделения более холодным, и давление воздуха поэтому может быть ниже, чем при осушке без форкюллера, что несколько снижает расход энергии на сжатие воздуха.

2. Обслуживание форкюллера очень просто, и это делает тот же рабочий, который наблюдает и за разделительным аппаратом, в то время как перегрузка резервуаров с твердым кустиком или хлористым кальцием (правда, не особенно частая) должна производиться при помощи другой рабочей силы (не менее 2 человек).

3. Сама осушка лучше и уступает сушке химической лишь при недостаточно низких температурах в форкюллере или большом количестве осушительных резервуаров.

4. Не тратятся гигроскопические вещества.

В случае же работы установки для производства жидкого синтетического аммиака, который дальше тут же идет на производство азотной кислоты, форкюллеры не требуют затраты энергии на сжижение аммиака и следовательно все перечисленные выгоды достигаются бесплатно.

Форкюллеры применяются главным образом на установках Линде. Установки Клода имеют вынесенные из аппарата теплообменники, где (после осушки химической) из воздуха, охлажденного примерно до -100° , вымерзают остатки воды и углекислоты. Об этих теплообменниках будет сказано дальше, в главе об установках Клода.

АППАРАТ ЛИНДЕ ДЛЯ РАЗДЕЛЕНИЯ ВОЗДУХА И СХЕМА УСТАНОВКИ ЛИНДЕ

Воздух, очищенный от углекислоты и водяных паров и сжатый до давления 30–200 ат¹, направляется в аппарат для его разделения на азот и кислород. Схема аппарата системы Линде изображена на рис. 16. Аппарат состоит: из теплообменника I, ис-

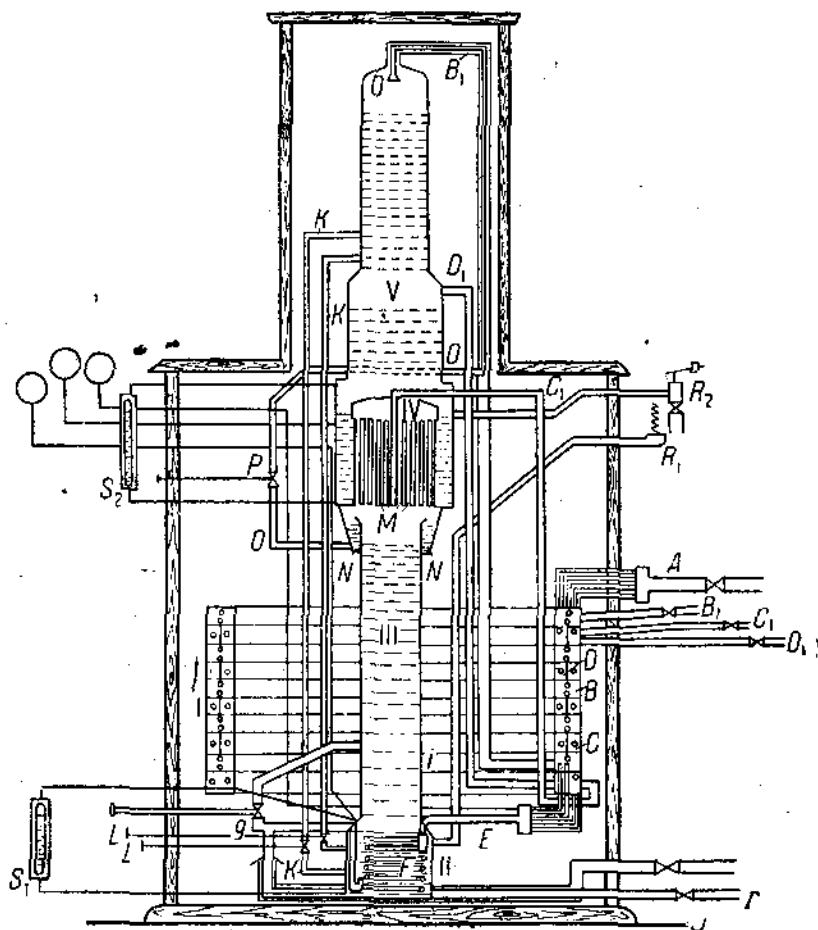


Рис. 16. Аппарат Линде.

¹ Давление зависит от стадии работы аппарата и его величины.

парителя II, нижней разделительной колонны III, дефлегматора IV и верхней разделительной колонны V. Он может давать совершенно чистый азот и чистый кислород (с 99,6% O_2).

Воздух по трубопроводу A подходит к теплообменнику, разветвляется и по целой серии тонких трубок из красной меди (обычный размер их 8×10 мм) входит в теплообменник. Теплообменник вьется в виде змеевика, вокруг нижней разделительной колонны. Он состоит из трех отделений—B, C и D, по которым из аппарата выводятся чистый азот, чистый кислород и грязный кислород (с содержанием O_2 до 60%). Все эти продукты выходят из аппарата почти под атмосферным давлением при очень низких температурах, близких к температуре кипения их. Через стенки воздушных медных трубок, которые идут пучками во всех трех отделениях теплообменников, эти выходящие продукты отдают свой холод воздуху и покидают теплообменник с температурой всего на $3-5^\circ$ ниже температуры выходящего воздуха. Воздух, выйдя из теплообменника с температурой около -120° , собирается снова в один общий трубопровод E и входит в змеевик F, расположенный в испарителе. Разница в температурах входящих в теплообменник газов и выходящего оттуда воздуха, таким образом, довольно велика, что обуславливает хороший теплообмен между ними. Разница эта объясняется большими различиями в теплоемкостях сжатых и обычных газов. В конце книги приведены теплоемкости воздуха при различных давлениях и температурах.

Змеевик в испарителе окружен жидким кипящим воздухом, обогащенным кислородом. Так как в нижней колонне давление равно 4-5 атм, то воздух этот кипит при температуре около -170° , забирая при этом через стенки змеевика тепло от газообразного воздуха, идущего внутри змеевика.

Сам змеевик для увеличения поверхности теплопередачи состоит из нескольких медных трубок. Температура кипения (сжижения) сжатого от 30 до 200 атм воздуха значительно выше -170° и равна или приближается к критической, т. е. -141° . Поэтому если воздух, окружающий змеевик, кипит, то значительная часть воздуха, находящегося в змеевике, будет конденсироваться и направляться к дроссельному вентилю G и дальше в нижнюю колонну, на 6-7-ю тарелку ее, считая снизу. При проходе через вентиль G давление воздуха падает до 4-5 атм, что дает еще некоторое понижение температуры за счет расширения без отдачи внешней работы, но вместе с тем начинается и испарение воздуха, так как при меньшем давлении он кипит при более низких температурах; кроме того он подогревается идущими снизу парами. Пары жидкого воздуха и несконденсировавшаяся часть воздуха, как мы уже знаем из гл. III, будут содержать значительно меньше кислорода, чем сам воздух. Они будут подниматься вверх колонны, а жидкость—стекать вниз.

Колонна имеет целый ряд тарелок i, устройство которых описано в гл. III; добавим только, что размер отверстий 0.75 мм, количество отверстий на $см^2$ —около 32 штук, а расстояние между тарелками приблизительно 60 мм. Трубки для стока флегмы (жидкости)

имеют диаметр в 25 мм, и на каждой тарелке их расположено по 3 или 4 штуки.

Стекающая вниз жидкость встречает на своем пути пары, поднимающиеся из испарителя. Пары эти подогревают жидкость и заставляют ее частично испаряться; причем в значительной мере, как мы уже знаем, испаряется азот. В свою очередь большая часть паров будет конденсироваться, причем конденсируется в большей степени кислород. Таким образом, когда эта жидкость подойдет к испарителю, она уже будет в значительной мере отличаться от жидкого воздуха по соотношению в ней азота и кислорода, именно: она будет обогащена кислородом (не менее 38—40% O_2 по весу).

В испарителе часть жидкости испаряется за счет тепла воздуха, идущего по змеевику, другая же часть по трубкам *K* перетекает на середину верхней колонны так, что уровень ее в испарителе остается постоянным. Переток происходит под влиянием разности давлений в нижней и верхней колоннах (внизу 4—5 *атм*, вверху 0,4—0,6 тоже *атм*) и регулируется вентилями *L* на трубопроводах *K*.

Пары, образующиеся из жидкого воздуха на 7-й тарелке, и та часть воздуха, которая не сконденсировалась в змеевике испарителя и при расширении через дроссельный клапан, поднимаются вверх и встречают на своем пути жидкость стекающую вниз из трубок *M* дефлегматора *IV*. Жидкость эта представляет собой чистый жидкий азот. Между этой жидкостью и парами также происходит теплообмен (об этом говорилось уже в гл. III). Часть паров за счет отдачи ими своего тепла жидкости будет конденсироваться, причем больше конденсируется кислород, азот же испаряется. Пары по мере продвижения их вверх становятся все беднее и беднее кислородом. Над верхней тарелкой это уже будет чистый азот, который поднимается в трубки *M* дефлегматора (закрытые сверху) и заставляет кипеть чистый жидкий кислород, находящийся между трубками в дне верхней колонны. Откуда появляется там жидкий кислород—будет сказано ниже.

Так как в верхней колонне давление близко к атмосферному, то температура кипения жидкого кислорода будет около 180°—181°, а азот, находящийся под давлением 4—5 *атм* нижней колонны, конденсируется уже при 176°—188°¹. Разница в 3—4° вполне достаточна для теплообмена, тем более что и площадь теплообмена велика, так как дефлегматор состоит более чем из 1000 трубок (у аппаратов с производительностью 500 m^3 азота в час их около 1300 штук, у аппаратов с производительностью 750—850 m^3 азота—более 2200 штук с $d=6 \times 7$ мм). Азот будет поэтому сжиматься и стекать вниз, частично орошая нижнюю колонну, частично собираясь в карман *N*, оттуда, опять-таки за счет разности давле-

¹ Температуры кипения азота и кислорода при различных давлениях можно видеть из кривой (диаграмма III), помещенной в конце книги.

ний, он по трубе O отправляется на верх верхней колонны. Регулировать поток жидкого азота по трубе O можно вентилем P .

В верхней колонне происходит дальнейшее разделение жидкости, переходящей туда из испарителя II . Устройство тарелок там точно такое же. Как только жидкий воздух, обогащенный кислородом, попадает на средние тарелки колонны, он начинает испаряться там за счет уменьшения давления (так как при этом понижается температура его кипения) и за счет подогрева парами, поднимающимися с ниже расположенных тарелок. Пары, получающиеся при этом, будут содержать больше азота, чем его было в жидкости. Жидкость же, стекая вниз, будет все более и более обогащаться кислородом. Она встречает на своем пути пары кислорода, кипящего между трубками дефлегматора, и потому становится все беднее азотом. Таким образом в низ колонны попадает уже чистый жидкий кислород, так как по пути весь азот успевает испариться за счет конденсации поднимающихся снизу паров кислорода. Часть паров жидкого кислорода, образующихся вокруг дефлегматора, поднимается кверху для испарения азота в стекающей вниз жидкости, другая же часть по трубе C_1 выводится из аппарата (за счет этого уровень жидкости вокруг дефлегматора остается постоянным).

Пары, образовавшиеся на средних тарелках, идут вверх и встречают ток жидкого азота, сливающийся сверху из трубы O . Таким образом они освобождаются от кислорода и над верхней тарелкой будут представлять собой чистый азот, который и выводится из колонны по трубопроводу B_1 , сначала в теплообменник I , а затем в газгольдер.

Кроме чистого азота и кислорода из аппарата выводится с середины колонны по трубе D_1 часть паров, представляющих смесь азота и кислорода с содержанием 61% кислорода. Это необходимо делать для того, чтобы чистота обоих полученных продуктов была по возможности выше; тут же выводится почти весь аргон, имеющийся в воздухе в количестве 0,94%.

Если нас интересует лишь качество одного из продуктов, то за счет загрязнения другого, можно избежать выпуска части газов из середины колонны V и тогда трубопровод D_1 будет лишним.

Все выходящие из аппарата газы, как говорилось, проходят через теплообменник, чтобы отдать свой холод вновь вступающему воздуху.

Как нижняя, так и верхняя колонны снабжены предохранительными клапанами R_1 и R_2 , а для указания уровней жидкого воздуха в испарителе и жидкого кислорода на дне верхней колонны имеются особые указатели S_1 и S_2 .

Устройство указателей видно из рис. 17.

Пусть в резервуаре с жидким газом имеется давление P . Тогда на дне резервуара будет давление $P + hd$, где h — уровень жидкости в резервуаре и d — ее удельный вес. Если мы наш резервуар соединим трубками B_1 и B_2 с нижней и верхней камерами указателя

уровня A так, как видно это на схеме, то давление в камере C будет равным P , а в камере D — равным $P + hd$. Жидкость, попавшая в трубку B_1 , испарится там и создаст давление $P + hd$, которое будет мешать затеканию в нее новой жидкости. Таким образом

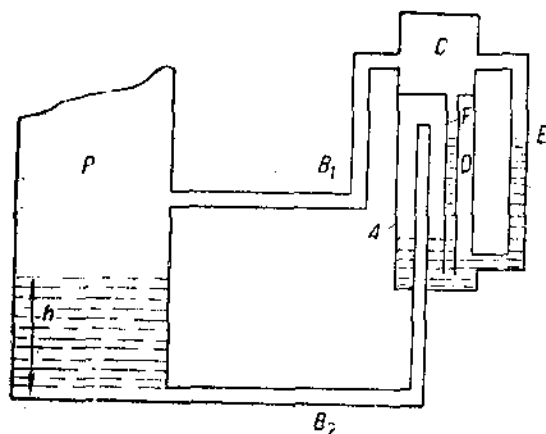


Рис. 17. Схема прибора для указания уровней жидких газов.

масло или вода, налитые в нижней части указателя, будут выдавливаться оттуда через стекло E и трубку F , пока в них не создастся столб жидкости h_1 , уравнивающий избыточное давление hd . Если удельный вес жидкости в указателе d_1 , то $hd = h_1 d_1$. По стеклу E судят об уровне жидкого газа в резервуаре, а трубка F служит для обратного стекания масла или воды, попавшей из нижней части указателя уровня в верхнюю, что иногда имеет место. Жидкость для уровня подби-

рается так, чтобы ее удельный вес был близок к удельному весу жидкого газа.

Мы описали процесс, происходящий в аппарате во время нормальной работы, когда уже и в нижней и в верхней колоннах имеются достаточные количества жидкого воздуха и жидкого кислорода. При пуске же аппарата этого нет, и потому первый период работы протекает несколько иначе. Здесь нам нужно охладить аппарат и скопить в нем достаточное количество жидких газов. Поэтому в начале работа ведется на максимальных давлениях: до 200 ат у маленьких аппаратов и до 125 ат у более крупных. Воздух при прохождении через дроссельный клапан G расширяется до $3-4 \text{ ат}$, охлаждается при этом сам и охлаждает аппарат. Выходя через теплообменник, он будет отдавать свой холод вновь вступающему воздуху, и тот подойдет к дроссельному вентилю G уже более холодным, чем в начале процесса. При расширении воздух примет еще более низкую температуру и т. д. до тех пор, пока температура его не станет настолько низка, что при дальнейшем охлаждении от расширения он будет частично сжижаться. Жидкость станет скапливаться внизу и, когда ее уровень поднимется и покроет весь змеевик, начнет по трубкам K переливаться в верхнюю колонну; после этого жидкость начнет скапливаться и на дне верхней колонны. По мере повышения ее уровня вокруг трубок дефлегматора работа аппарата будет все более и более приближаться к нормальной, и, когда примерно $3/4$ высоты дефлегматора окажутся

под жидкостью, весь процесс пойдет уже так, как описывалось выше.

Давление поступающего воздуха по мере повышения уровня жидкости в верхней колонне понижают, открывая дроссельный вентиль *G* в большей степени. Аппараты, перерабатывающие до 700 м³ воздуха в час, при установившемся нормальном режиме работают с давлением всего около 60 ат, а в случае работы с форкьюллером (т. е. с предварительным охлаждением воздуха) это давление—около 35 ат. Более крупные агрегаты работают с еще более низкими давлениями.

Аппараты Линде изготавливаются почти целиком из красной меди и паяются сплавом олова (50%) со свинцом. Все трубопроводы также медные. Лишь те немногие части аппарата, где соединения осуществлены не при помощи пайки—фланцы, места с нарезкой (например у крышки дефлегматора),—сделаны из дельта-металла. Весь аппарат вместе с теплообменником заключен в деревянный кожух и хорошо изолирован шлаковой ватой. Основание, на котором висит теплообменник, сделано также из дерева.

Аппарат не может долгое время работать без перерывов. Как бы хороша ни была очистка воздуха от углекислоты и водяных паров, часть их будет оставаться в воздухе. А так как через теплообменник проходят огромные количества воздуха, который охлаждается там до—120°, то вымораживающаяся там твердая углекислота и лед быстро образуют на внутренних стенках медных воздушных трубок твердую пленку. Пленка эта будет ухудшать теплообмен и по мере утолщения ее нормальное рабочее давление воздуха приходится повышать, чтобы компенсировать недополучение холода воздухом в теплообменнике за счет расширения в дроссельном вентиле. Наконец пленка настолько ухудшит теплообмен, что режим аппарата нарушается и его приходится останавливать. Возможно даже образование пробок, закупоривающих проход воздуха по трубкам. Обычно аппарат работает дней 10—15. При очень тщательной очистке воздуха этот срок можно немного удлинить. Если требуется непрерывность в производстве, то приходится иметь резервный аппарат, который пускается в работу заранее, чтобы можно было успеть охладить его и наладить в нем нормальный режим до остановки работающего аппарата. Охлаждение нового аппарата занимает 6—8 час.

Оттаивание „замерзшего“ аппарата производится теплым воздухом, подогретым до+50° в особом приборе, в установках Линде—обычно паром. Такой теплый воздух пускается в теплообменник между воздушными трубками (чаще всего только по одному азотному отделению теплообменника) и через стенки трубок расплавляет намерзшие в них воду и углекислоту. Дальше воздух попадает в верхнюю колонну аппарата, из нее переходит по трубам *O* и *K* в нижнюю и оттуда выпускается через трубки для отбора проб газа и предохранительный клапан (последний на время отогревания аппарата открывается).

Образовавшаяся в воздушных трубках жидкость и газ выдвигаются через змеевик и трубу *T*, ответвляющуюся от воздушной линии перед дроссельным клапаном *G*. Во время оттаивания дроссельный клапан закрыт, вентиль же *U* на трубопроводе *T* открыт. Чтобы жидкость не замерзала в трубе *T*, вокруг нее имеется воздушная рубашка, по которой также пускается теплый воздух. Последний выходит прямо под деревянным кожухом аппарата в шлаковую вату и прогревает ее и аппарат снаружи. Оттаивание длится несколько часов (6—8 час., иногда больше).

На рис. 18 изображена схема аппарата для подогрева воздуха паром.

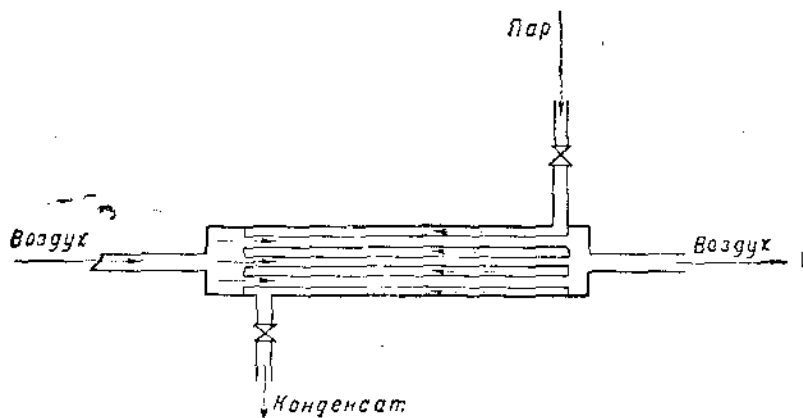


Рис. 18. Схема прибора для подогрева воздуха.

Теперь после описания всей аппаратуры, входящей в агрегат для получения азота и кислорода, ясна уже схема всего процесса. Схема установки Линде изображена на рис. 19.

Воздух проходит через фильтр *A* и попадает в компрессор *B*. Цилиндры компрессора помечены цифрами *I*, *II*, *III* и *IV*. После каждой ступени воздух направляется в холодильники. Холодильники всех ступеней помещены в ванне *C*. Между второй и третьей ступенью (при 14 ат) воздух очищается от углекислоты едким натром в декарбонизаторе *D* и после окончательного сжатия идет на осушку или в осушительных батареях *E* (за счет твердого каустика или хлористого кальция), или в фортюллере *F* (за счет охлаждения его до -30° испаряющимся жидким аммиаком).

Осушенный воздух попадает в аппарат *G* и разделяется там на азот и кислород. Полученный кислород (и азот, если он используется) собираются в газгольдеры.

H—прибор для подогрева воздуха во время „оттаивания“ аппарата.

Если требуется непрерывность в производстве, то описанных агрегатов должно быть несколько.

ПУСК В ХОД УСТАНОВКИ ЛИНДЕ, РЕГУЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА, НЕПОЛАДКИ И АВАРИИ

Пуск в ход агрегата Линде производится следующим образом:

1. Сначала необходимо приготовить к пуску компрессор и все прочие аппараты, входящие в агрегат, т. е. декарбонизатор, форкюллер (или же осушительные резервуары) и разделительную колонну. Для этого:

1. У компрессора проверить, открыт ли вентиль *O* (рис. 6) на „обводной“ линии, имеется ли масло, в порядке ли мотор (щетки должны быть опущены), введен ли пусковой реостат и открыты ли продувочные вентили у холодильников и маслоотделителей компрессора; дать воду в холодильники и водяные рубашки цилиндров и открыть вентиль на линии *A* (рис. 6), подводящий воздух к цилиндру первой ступени.

2. У декарбонизатора открыть вход и выход воздуха, проверить степень использования залитого в него раствора щелочи и убедиться, открыты ли вентили для „продувки“ у воздушных линий и брызгоуловителя, если такой имеется.

3. В случае работы с форкюллером открыть у него „продувочные“ вентили брызгоуловителя и змеевика *II* или *III* (в зависимости от того, какой из них будет работать) (рис. 15) и вентиль на воздушной линии к форкюллеру. Вентили при входе в осушительную батарею и при выходе из нее должны быть закрыты (рис. 19). В случае работы осушительных батарей надо открыть вход и выход воздуха к ним и проверить, закрыта ли воздушная линия к форкюллеру (если последний на установке имеется), а также убедиться, открыты ли продувочные вентили *K* (рис. 14) на всех резервуарных батареях.

4. У разделительной колонны (рис. 16) вентиль на входной линии *A* должен быть закрыт, и продувочный вентиль *U* открыт. Открыть также полностью оба вентили *L* на трубопроводах, подводящих жидкий воздух из нижней колонны, в верхнюю. Закрыть дроссельный вентиль *G*. Проверить: открыт ли выход в атмосферу азота и грязного кислорода, закрыть предохранительные клапаны и убедиться, закрыта ли воздушная линия, употребляемая при „оттаивании“ аппарата. Выход чистого кислорода закрыть, вентиль для перелива жидкого азота из карманов *N* оставить открытым на $\frac{1}{2}$ — $\frac{2}{3}$ оборота.

II. Пустить компрессор и постепенно закрывать все „продувочные“ вентили у компрессора, декарбонизатора и осушительных резервуаров, если работа идет с ними. Если же работа идет с форкюллером, то дать аммиак в форкюллер и поступать, как (было

описано выше) при переходе в работе с одного змеевика на другой.

Когда давление достигнет нескольких десятков атмосфер, закрывают „обводный“ вентиль у компрессора, чтобы весь воздух проходил через декарбонизатор. После этого, открытием на короткое время вентиля на линии *A* (перед входом в теплообменник аппарата) продувают теплообменник, закрывают вентиль и постепенно открывают полностью вход в теплообменник. Давление в теплообменнике будет повышаться, и когда достигнет величины несколько меньшей, чем максимальное давление для данной установки (т. е. около 125 или около 200 *атм*), открывают дроссельный клапан и впускают воздух в нижнюю колонну аппарата.

III. Процесс охлаждения ведут таким образом, чтобы перед дроссельным клапаном было максимально допустимое давление воздуха. Периодически, как во время охлаждения, так и потом, во время нормальной работы, делают „продувки“ во всех местах, где возможно скопление влаги (брызгоуловитель, холодильники, осушительные резервуары, трубопроводы и т. д.), а также трубочек для отбора проб из аппарата и трубочек *k* указателям уровней.

Регулирование процесса во время охлаждения и первоначальное налаживание режима заключаются в том, чтобы быстрее скопить достаточное количество жидкого воздуха на дне нижней колонны и достаточное количество кислорода в верхней колонне разделительного аппарата. После того как уровень жидкого воздуха в нижней колонне достигнет нормы и начнет переливаться наверх, вверху вскоре появится тоже жидкость, уровень которой обычно будет повышаться. Тогда начинают постепенно закрывать вентили *K* (один—совершенно, другой—частично), отчего давление в нижней колонне возрастет и будет приближаться к нормальным 4—5 *атм*. Накопление жидкости в верхней колонне от этого замедлится. Однако через некоторое время ее уровень все же приблизится к норме, после чего можно постепенно снижать давление перед дроссельным клапаном, открывая его в большей мере. К этому же времени азот в верхней части нижней колонны должен быть уже чист, а если этого нет, то надо прикрыть несколько вентиль *P*. Когда анализы покажут, что подаваемый по трубе азот совершенно свободен от кислорода, то количество отправленного наверх жидкого азота надо увеличить. Вообще, чем больше жидкого азота мы будем переводить из нижней колонны в верхнюю, тем больше и скорее получим от аппарата чистый газообразный азот. Однако не нужно забывать, что для орошения нижней колонны также необходим жидкий азот в достаточном количестве поэтому если вентиль открыт чрезмерно, то можно расстроить режим нижней колонны аппарата. Здесь все должно основываться на анализах газов, которые необходимо производить в это время как можно чаще беря пробы газов (особенно азота) и из верхней и из нижней колонн.

Когда азот будет чист и в верхней колонне, прекращают его выпуск в атмосферу и направляют в газгольдер.

Теперь нужно стремиться к тому, чтобы разделение газов производилось полней, т. е., контролируя процесс все время анализами, стараться уменьшить выход так называемого грязного кислорода. Во время установившегося режима управление и контроль за аппаратом весьма несложны, заключаются в регулярном производстве анализов газов, выходящих из аппарата, периодических продувках трубок к указателям уровней, в продувках осушительных резервуаров и трубопроводов (а если работа ведется с форкюллером — в наблюдении за ним), а также в наблюдении за манометрами аппарата и уровнями жидкостей. Если уровень жидкого кислорода падает, то необходимо несколько повысить давление перед дроссельным клапаном, немного прикрыв последний. В случае повышения уровня поступают наоборот.

По мере накопления твердых веществ (H_2O и CO_2) в теплообменнике, рабочее давление приходится повышать, и, таким образом, чем дольше работает аппарат, тем больше его рабочее давление.

В случае остановки аппарата, прежде всего следует закрыть подачу газов в газгольдеры, переключив их выход в атмосферу. То же нужно сделать в случае расстройства режима аппарата. Обычно, если наблюдение за установкой достаточно, она работает хорошо и без перебоев. Однако если очистка воздуха ведется неудовлетворительно, то возможно быстрое накопление твердой углекислоты и влаги в теплообменнике и тогда расстройство режима и преждевременная остановка аппарата для „оттаивания“ неизбежны. Поэтому нужно тщательно наблюдать за качеством щелочи в декарбонизаторе и работой осушительных резервуаров. Если же работа ведется с форкюллером, то надо постоянно следить за степенью охлаждения воздуха (он должен вступать в аппарат с температурой не ниже -25°). Последнее достигается бесперебойным питанием форкюллера жидким аммиаком в достаточном количестве.

Большую опасность представляет присутствие в воздухе аммиака и окислов азота, всегда имеющее место при наличии вблизи аммиачной установки и установки для получения азотной кислоты. Это бывает часто, так как одним из крупнейших потребителей азота являются именно аммиачные установки.

Аммиак и окислы азота, попадая в аппарат, разрушают его медные части, и в первую очередь будут страдать змеевик (расположенный в испарителе), теплообменник и трубки дефлегматора. С течением времени стенки трубок делаются все тоньше и тоньше, и наконец та или иная часть аппарата не выдерживает и разрывается. Опасности это не представляет, но аппарат надолго выбывает из строя для ремонта.

Рис. 20 представляет собой фотографию лопнувшего змеевика испарителя; налево — испаритель, а перед змеевиком на листе бумаги — кусок разорвавшейся трубки.

Воздух очень трудно очистить от аммиака и особенно от окислов азота. Это потребовало бы постройки дополнительных очистительных аппаратов. Поэтому в подобных случаях лучше всего пользоваться воздухом, взятым из такого места, где этих примесей в нем не имеется, т. е. построить длинный воздухопровод для подачи

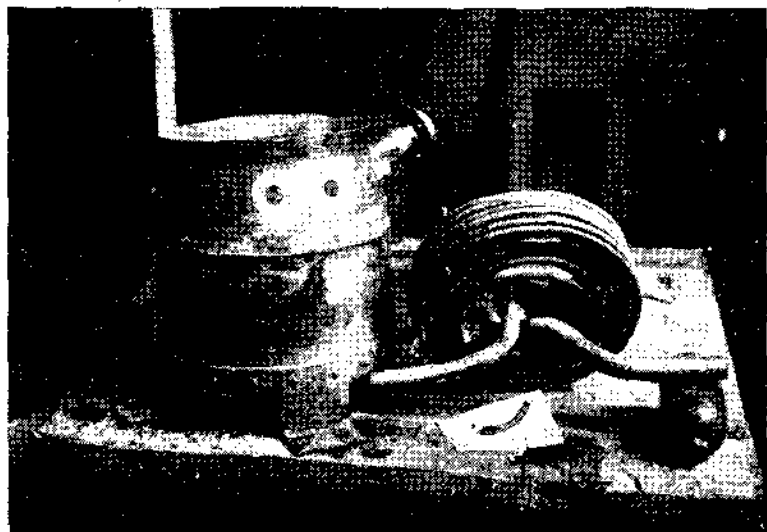


Рис. 20. Фотография лопнувшего змеевика испарителя.

чистого воздуха к компрессорам азотно-кислородной установки. Постройка воздухопровода является единственной мерой также и в случае наличия в воздухе ацетилена (это бывает тогда, когда азотно-кислородная установка находится вблизи карбидной установки¹, или если вблизи производятся значительные сварочные работы). Ацетилен будет скапливаться в аппарате вместе с жидким кислородом и в результате получится очень сильная взрывчатая смесь, могущая причинить большие разрушения.

Все сказанное об авариях с аппаратами относится, конечно к аппаратам всех систем, а не только к аппаратам Линде.

¹ В случае производства цианамид кальция карбидная и азотная установки бывают всегда вблизи друг к другу, так как цианамид получается действием азота на карбид.

ГЛАВА ВОСЬМАЯ

УСТАНОВКА КЛОДА

Установки Клода в зависимости от их производительности работают при разных давлениях.

Клод дает следующую таблицу рабочих давлений для его аппаратов в зависимости от их производительности.

Часовая производи-
тельность аппарата
в м³ кислорода.

50
100
250
500

Рабочее давление
детандера в ат.

25
20
16
12

Во время охлаждения аппарата, когда его режим еще не налажен, давления эти несколько выше, но все же они сравнительно низки, и потому при эксплуатации установок по системе Клода обычно употребляются трехступенчатые компрессора.

Схема установки изображена на рис. 21.

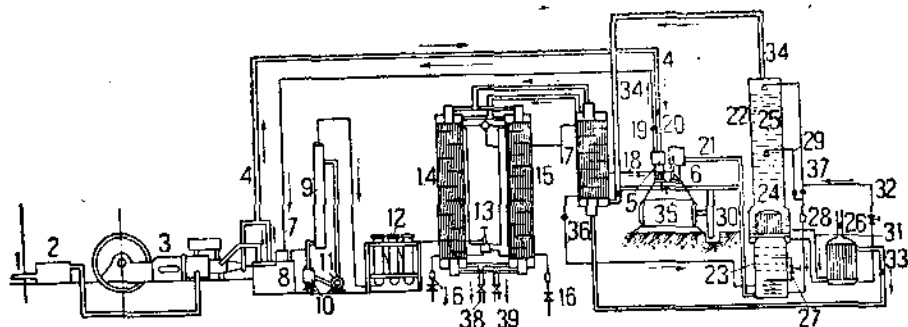


Рис. 21. Схема установки Клода.

Воздух засасывается компрессором по воздухопроводу 1, проходит через фильтр 2, для очистки от пыли, и попадает в первую ступень компрессора 3. После второй ступени часть воздуха ответвляется и идет по воздухопроводу 4 в компрессор-тормоз 5, который спарен с пневматическим двигателем 6 (детандер). Воздух сжимается там и возвращается по трубопроводу 7 к главному компрессору, на соединение с той частью воздуха, которая сжималась в цилиндре третьей ступени. В резервуаре 8 помещены холодильники второй и третьей ступени. Пройдя холодильник третьей ступени, воздух поступает в скруббер (декарбонизатор) 9, для очи-

стки от углекислоты. Устройство его было описано в главе V. Цифрами 10 и 11 помечены на схеме резервуар для щелочи и насос, подающий ее на верх скруббера.

Дальше, воздух сушится в батарее осушителей 12 и через распределительный кран 13 попадает последовательно сначала в один, а затем в другой теплообменники-осушители 14 и 15, где охлаждается за счет холодных газов, выходящих из аппарата. Теплообменники представляют собой трубы большого диаметра, внутри которых находится пучок медных трубок. По тонким трубкам сверху вниз движутся холодные газы, вышедшие из аппарата. Поэтому этот пучок трубок должен быть разделен на две или три части. Между тонкими трубками снизу вверх движется воздух, который, благодаря многочисленным перегородкам в теплообменнике, совершает почти горизонтальный путь и равномерно омывает трубки с холодными газами.

В теплообменниках для установки с производительностью 800 м³ в час имеется около 420 таких трубок диаметром 6×7 мм и длиной 5 м. Диаметр наружной трубы 0,5 м. Воздух охлаждается в этих теплообменниках до температуры 100°, причем водяные пары и углекислота в более холодных частях теплообменника будут осаждаться в виде инея, что будет ухудшать теплообмен и отчасти забивать путь для воздуха. Таким образом через некоторое время придется теплообменники „отогревать“, чтобы расплавить и удалить из них скопившиеся там твердую воду и углекислоту.

Образование инея происходит в тех частях теплообменников, где температуры ниже нуля. Там же, где температуры выше нуля, будет происходить лишь конденсация влаги, причем жидкость стекает вниз в сепараторы 16 (водоотводчики) и время от времени удаляется оттуда „продувкой“.

„Отогревание“ теплообменников производится следующим образом: положим, что у нас воздух идет сначала в теплообменник 14 и затем 15, тогда продукты, выходящие из аппарата, поступают сначала в теплообменник 15 и потом 14. Не изменяя пути холодных газов, воздух направляют прямо в теплообменник 15. Тогда выходящие холодные газы, пройдя теплообменник 15, нагреваются там от воздуха до температуры выше нуля и, двигаясь дальше через теплообменник 14, „отогреют“ его.

Полученные в результате жидкость и углекислота удаляются из теплообменника „продуванием“ последнего. Через некоторое время, когда аппарат 14 оттает, можно включить его вторым по ходу воздуха, а движение холодных газов (уходящих из системы) изменить так, чтобы они попадали сначала в холодильник 14, а затем — 15.

Таким образом, переключая эти два прибора, можно добиться, чтобы время работы всей установки было очень продолжительным — несколько недель и даже месяцев. Когда же наконец иней скопится и в следующих аппаратах: сжижителе, детандере и самом

разделительном аппарате, то процесс приходится прерывать и весь агрегат останавливать для „размораживания“.

После теплообменников воздух попадает в конденсатор 17 (сжижитель), устроенный как теплообменники, выходит отсюда (пройдя только часть конденсатора) по трубе 18 с температурой -155° и попадает в цилиндр детандера 6. Здесь он расширяется до 8 ат., совершая внешнюю работу, которая используется для сжатия воздуха в компрессоре-тормозе 5. Компрессор тормоз и детандер, как говорилось уже выше, спарены между собой, т. е. имеют общий вал.

Вентилими 19 и 20 можно регулировать работу компрессора-тормоза, что вызывает большее или меньшее охлаждение воздуха, расширяющегося в детандере. Воздух охлаждается в детандере до -145° или -130° и направляется дальше в змеевик, расположенный на дне разделительного аппарата 23. При входе и выходе воздуха из детандера имеются термометры и манометры, на основании показания которых и регулируется расширение воздуха. Процесс должен вестись так, чтобы в детандере не происходило сжижения воздуха.

Разделительный аппарат состоит из нижней колонны 23, дефлегматора 24, верхней колонны 25 и дополнительного испарителя 26, вынесенного в сторону от аппарата. Воздух, пройдя змеевик, погруженный в обогащенный кислородом жидкий воздух на дне нижней колонны охлаждается там и конденсируется. Температура его конденсации при 8 ат. равна -163° (табл. 3), а температура кипения обогащенной кислородом жидкости под давлением 4 ат. (больше давление нижней колонны) около -171° или -172° .

Сжиженный воздух передавливается через дроссельный клапан 27 на середину нижней колонны, причем давление его падает до 4 ат. О том, что происходит в колонне с воздухом, уже говорилось при описании аппарата Линде, так как работа и устройство их аналогичны.

Тарелки в нижней колонне аппарата Клода обычные, в верхней же сделаны из спирально свернутых гофрированных пластинок (тарелки системы Кюни).

Обогащенная кислородом жидкость передавливается через фильтр 28 по трубопроводу 29 на середину верхней колонны (которая работает с давлением на несколько десятых атмосферы выше атмосферного давления).

Азот в нижней колонне конденсируется в трубках дефлегматора, за счет кипящего между трубок кислорода, и стекает частично на тарелки нижней колонны, частично в карман 30. Из кармана он перетекает в добавочный испаритель 26, где переохлаждается, так как между трубками испарителя кипит под меньшим давлением чистый жидкий кислород (стекающий сюда из междутрубного пространства дефлегматора по трубопроводу 31). Дальше азот направляется по трубопроводу 32 на орошение верхней колонны, причем

при понижении его давления до давления верхней колонны он охлаждается до $-195,5^{\circ}$.

Испаренный в приборе 26 кислород выводится оттуда по линии 33, как готовый продукт, и переходит через конденсатор 17 и теплообменники 14 и 15 в газгольдер, отдавая по пути свой холод вступающему в агрегат новому воздуху. Азот выходит сверху аппарата по трубопроводу 34 и также проходит через конденсатор и теплообменники.

Жидкий кислород, таким образом, испаряется частично в самом аппарате, частично в добавочном испарителе. Сделано это с целью предотвращения взрывов аппарата, так как ацетилен, попадающий вместе с воздухом, сжижаясь, будет накапливаться именно в той части аппарата, где находится жидкий кислород.

Выводя постоянно из аппарата значительную часть кислорода, тем самым выводят и ацетилен, который при этих условиях не сможет накопиться в аппарате в больших количествах. Он накапливается лишь в добавочном испарителе, и в случае взрыва последнего аппарат не пострадает. Добавочный испаритель устанавливается в подвалом помещении, где находится и нижняя часть разделительного аппарата. При пуске установок в ход, когда еще в аппарате нет жидкости, работу ведут по-другому. Самый пуск производится в следующем порядке: сначала пускают насос, для подачи щелочи на верх скруббера, в котором происходит очистка от углекислоты, затем пускают компрессор и, когда давление достигнет достаточной величины, включают в работу детандер. Расширение в детандере ведут почти до атмосферного давления, с тем чтобы как можно сильнее охладить воздух. Охлажденный за счет совершения внешней работы, примерно до -180° , воздух направляется не в аппарат, так как дроссельный вентиль 27 в это время закрыт, а по обходной линии с вентилем 35 (бай-пасс) — прямо в конденсатор и теплообменники, на выход из агрегата.

Через детандер проходит не весь воздух, а около 80% его. Остальные же 20% (примерно) воздуха сжижаются в междутрубном пространстве конденсатора и выдвигаются по трубопроводу с дроссельным вентилем 36 в нижнюю часть колонны, заполняя ее жидким воздухом. Сжижение в конденсаторе происходит потому, что температура конденсации сжатого до 20—25 атм воздуха (такое давление бывает в период пуска агрегата в ход) значительно выше, чем температура выходящих из детандера газов. Она равна около -150° или даже еще несколько выше.

При прохождении через вентиль 36 давление сжиженного воздуха падает примерно до 1 атм. Это способствует его интенсивному испарению в аппарате и охлаждению последнего. Часть этого жидкого воздуха передается через фильтр 28 по дополнительной линии 37 (которая при нормальной работе закрыта) на верх верхней колонны для охлаждения ее. Теперь начинают постепенно открывать дроссельный клапан 27 и прикрывать бай-пасс 35. К моменту накопления нормальных уровней жидкости уже весь расши-

рившийся воздух из детандера идет в колонну, а бай-пасс к этому времени закрыт полностью. К этому же моменту закрывают и линию 37, направляя обогащенный кислородом воздух не на верх аппарата, а по линии 29 на середину верхней колонны. На верх же аппарата подается через добавочный испаритель, собирающийся в кармане 30, а от.

Давление в нижней колонне поднимается до нормального рабочего давления (около 4 ат), а давление воздуха перед детандером (когда кислород на дне верхней колонны будет чист) несколько понижают. Весь процесс начинает идти нормально. Полученные продукты, если они чисты, направляются в газгольдеры, до этого же времени они выпускались в атмосферу.

Выходы азота и кислорода из агрегата помечены цифрами 38 и 39.

Период „разгона“ аппарата, в зависимости от его размеров и давления при пуске, различен и колеблется от 3 до 8 час. Надо добавить, что использование работы детандера происходит только у больших установок. У мелких установок детандер соединен с динамомашинной, вырабатывающей электрический ток, причем вся энергия поглощается реостатом и не используется. Реостат дает возможность изменять скорость и количество работы детандера, а значит, и степень охлаждения воздуха.

Вольтметр и амперметр здесь будут приборами, при помощи которых осуществляется наблюдение и контроль работы детандера. Последняя может быть использована также путем передачи ее ремнем компрессору, сжимающему воздух, т. е. без установки компрессора-тормоза.

Так как детандер работает при очень низких температурах, то осуществить какую-нибудь смазку его очень трудно: смазочные вещества будут замерзать в цилиндре. Поэтому Клод обошелся совсем без смазки, заменив металлические поршневые кольца и сальниковые уплотнения кожаными.

Кожа обладает свойством не терять своей упругости при низких температурах, и манжеты, сделанные из нее, хорошо работают на поршне детандера. Впуск и выпуск в детандер являются принудительными и осуществляются с помощью рычагов, соединенных с эксцентриками на вале детандера.

В описанном аппарате можно получать кислород не только газообразный, но жидкий, что является более удобным при транспортировке его.

УСТАНОВКА ГЕЙЛАНДТА

Гейландт в своем аппарате ввел комбинацию расширения воздуха с отдачей внешней работы и расширения без внешней работы.

Сжатый до 200 ат воздух, поступающий к аппарату после очистки по воздухопроводу 1, разветвляется перед входом в аппарат (рис. 22); 50—60% его направляются в горизонтальный детандер А, а остальные по трубопроводу 2—в теплообменник В и дальше через змеевик, расположенный в испарителе С—к дроссельному клапану. Воздух, поступивший в детандер, расширяется там от 200 ат до 4—5 ат и, охлаждаясь примерно до 150, поступает по трубе 3 также в определенное место теплообменника, где идет навстречу вступающему в аппарат сжатому воздуху, производя, таким образом, его дополнительное интенсивное охлаждение.

Сам аппарат состоит из теплообменника В, испарителя С, нижней колонны D, дефлегматора Е и верхней колонны F. Нижняя колонна работает под давлением 4—5 ат, верхняя колонна—при 0,2—0,4 ат. Теплообменник расположен наверху аппарата, и потому весь аппарат очень высок. Все части аппарата выполняют те же функции, что и в установке системы Линде.

Теплообменник состоит из двух широких вставленных друг в друга конических труб, между стенками которых остается большое кольцевое пространство. Это пространство заполнено, идущими в виде змеевиков несколькими системами медных трубок. По одной из систем трубок движется входящий в аппарат сжатый воздух, по двум другим—выходят из аппарата грязный и чистый кислород. наконец, по четвертой системе идет воздух, расширившийся в детандере. Азот выводится из аппарата по кольцевому пространству между коническими трубами, омывая все пучки трубок, расположенных в теплообменнике снаружи.

Управление аппарата сосредоточено в одном месте (на щите управления G).

Сжатый воздух после теплообменника по трубе 4 проходит по змеевику, расположенному в испарителе, заставляет кипеть обогащенную кислородом жидкость, окружающую змеевик, и дросселируется через вентиль б. В аппарате с этим воздухом происходит то же, что и в аппарате Линде.

Воздух, расширившийся в детандере, пройдя теплообменник, подходит по линии 5 к другому змеевику испарителя, а оттуда попадает так же в нижнюю колонну аппарата. В результате ректификации в нижней колонне мы получаем жидкий азот в 99,5% и богатую кислородом жидкость.

Жидкий азот попадает через вентиль 7 (по линии 9) на верх верхней колонны. Богатая же кислородом жидкость из испарителя

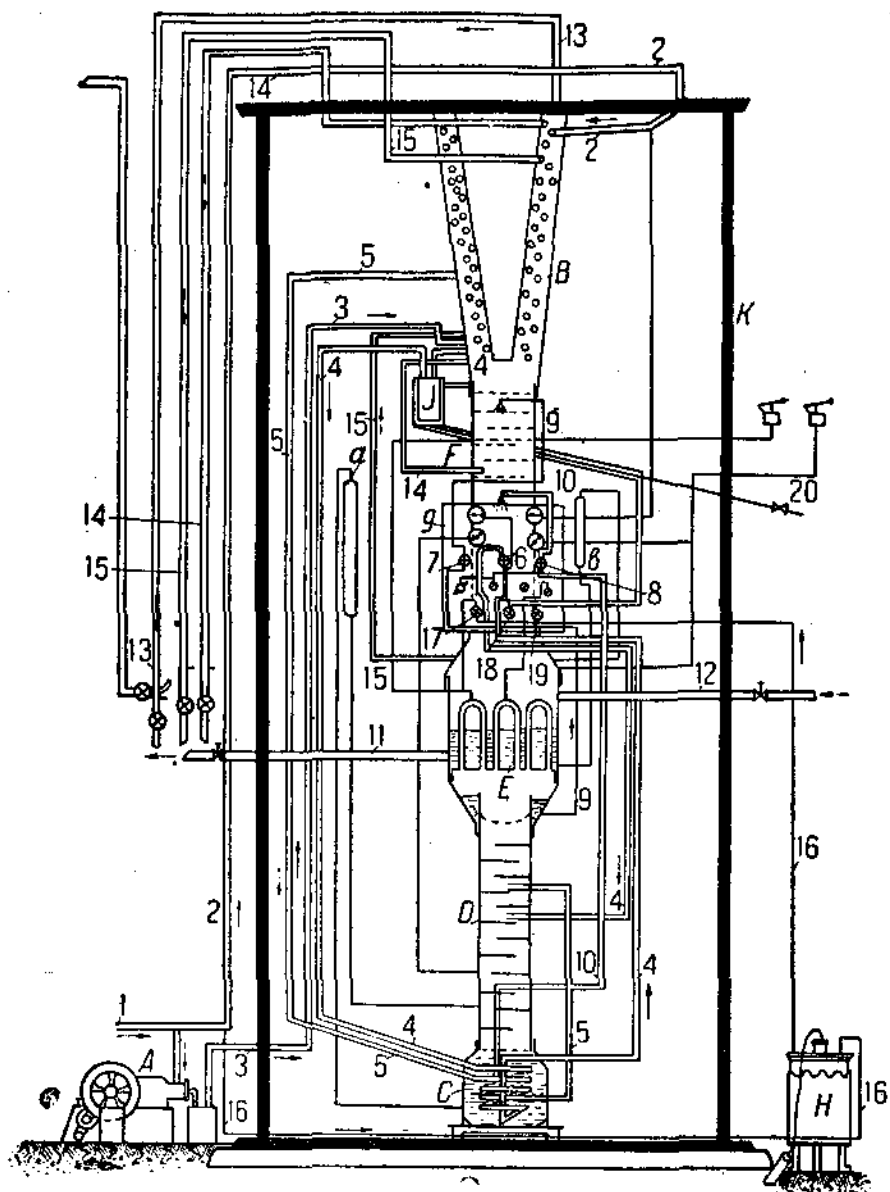


Рис. 22. Аппарат Гейланата.

по линии 10 (через вентиль 8) подается также в верхнюю колонну, но уже на середину последней. Там ректификация продолжается,

и в конце концов мы имеем чистый газообразный азот с содержанием N_2 до 99,8% и жидкий чистый кислород. Последний сливается из аппарата по трубопроводу 11 в специальный стационарный неподвижный танк, описанный в главе XI.

По линии 12 в аппарат возвращаются из танка пары кислорода, образовавшиеся там во время переливки туда жидкости. Линии 13 и 14 служат соответственно для вывода из аппарата чистого азота и грязного кислорода. В аппарате можно получить и газообразный кислород. Для этого работу ведут без детандера, как и с аппаратом Линде, причем рабочее давление будет всего 50–60 ат. В этом случае чистый газообразный кислород отводится через теплообменник по линии 15.

Остается добавить, что для „размораживания“ аппарата (срок работы которого — 2—2½ недели) служит электрическая водяная ванна Н, в которой подогревают воздух. Теплый воздух попадает в ванну из компрессора по линии 16 и направляется дальше к щиту управления, где через вентили 17, 18 и 19 вступает в теплообменник, а также нижнюю и верхнюю колонны.

На щите управления помимо всех перечисленных вентилей находятся: четыре манометра (указывающие давление перед теплообменником, перед дроссельным клапаном, в нижней и верхней колоннах) два указателя уровня жидкости [в испарителе (а) и на дне верхней колонны (б)] и „продувочные“ вентили для продувки фильтра / (20), дроссельного клапана и прочих мест аппарата, а также для отбора проб газа.

Весь аппарат заключен в железный кожух К и хорошо изолируется шлаковой ватой. Изоляция находится также и во внутренней конической трубе теплообменника. Обе колонки аппарата снабжены предохранительными клапанами.

Детандер смазывается обыкновенным машинным маслом и имеет обычные чугунные поршневые кольца. Между детандером и аппаратом находится маслоотделитель.

Впуск и выпуск воздуха в детандер принудительный и производится при помощи клапанов, соединенных рычагами с эксцентриками на валу детандера. Работа, полученная в детандере, передается обычно на вал компрессора, что позволяет рекуперировать 10–12% энергии, затрачиваемой на сжатие воздуха.

В случае работы не на жидкий, а на газообразный кислород, детандер обычно не работает.

Схема установки Гейландта изображена на рис. 23.

Воздух, засасываемый компрессором, проходит сперва через фильтр 1 и только после этого попадает в компрессор 2. Отсюда, после второй ступени, при давлении около 14 ат он проходит маслоотделитель 3 и поступает в два последовательно включенных декарбонизатора (их на заводе называют обшайдерами) 4 и 5. Освободившись от увлеченных брызг щелочи в брызгоуловителе 6 воздух возвращается в третий цилиндр компрессора. Наконец, окончательно сжатый, идет на осушку в батареи осушительных резервуаров 10.

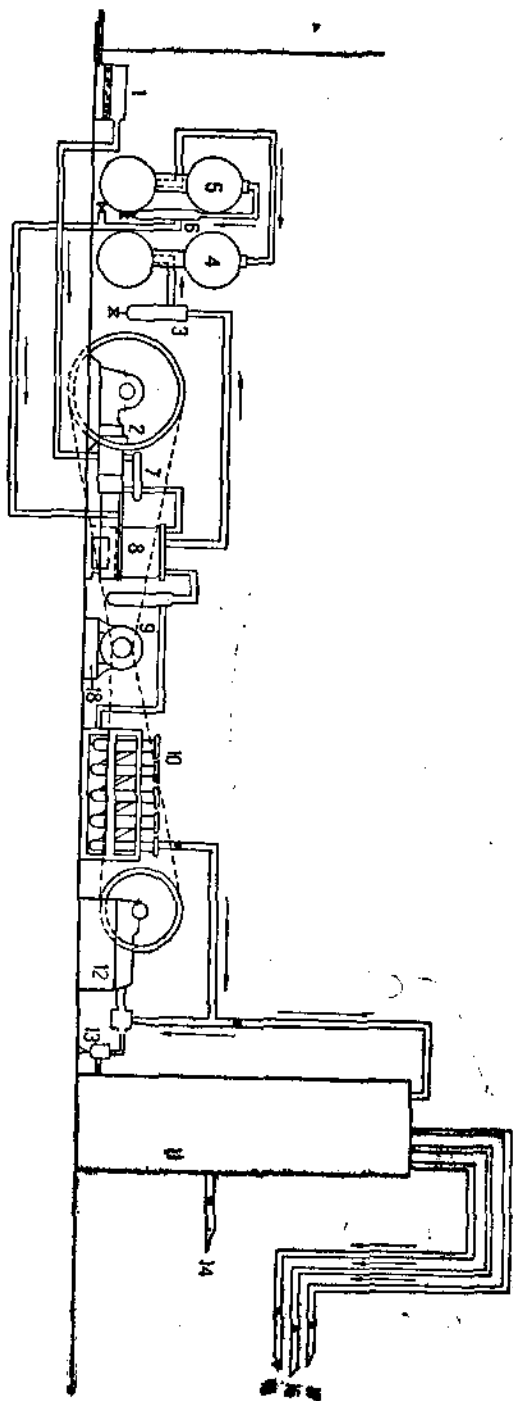


Рис. 23. Схема установки Гейланда.

Цифрой 7 на схеме помечен холодильник первой ступени, цифрами 8 и 9 — ванна для холодильников второй, третьей и четвертой ступеней и маслоотделитель, стоящий за компрессором. Высушенный воздух дальше попадает в аппарат 11, причем в случае работы с детандером часть воздуха (около 60%) ответвляется в детандер 12 и, расширившись там, после маслоотделителя 13 также поступает в аппарат. Трубопровод 14 служит для вывода жидкого кислорода, а трубы 15, 16 и 17 — для вывода азота, грязного кислорода и газообразного чистого кислорода (если не хотят иметь жидкий кислород).

Работа, полученная в детандере, передается при помощи ремня непосредственно компрессору, реже — мотору 18, приводящему в движение компрессор.

ПУСК В ХОД УСТАНОВКИ ГЕЙЛАНДТА

1. Подготовка к пуску

Проверить, сделано ли, и если нет, то сделать:

1. У компрессора: все „продувочные“ вентили на холодильниках и маслоотделителях должны быть открыты; обходной вентиль должен быть открыт; дать воду в холодильники и для охлаждения цилиндров; проверить, имеется ли масло; произвести, где нужно, дополнительную смазку из масленки или спринцовки.

2. У мотора проверить, опущены ли щетки и введен ли пусковой реостат.

3. У декарбонизаторов (обшайдеров): входной и выходной вентили должны быть открыты, а также должны быть открыты „продувочные“ вентили у маслоотделителя перед и у брызгоуловителя за „обшайдерами“. Открыть вентиль в атмосферу на трубопроводе за брызгоуловителем обшайдеров.

4. У осушительных резервуаров: должен быть открыт вход в батарею резервуаров, закрыт выход из батареи и закрыты „продувочные“ вентили всех 10 резервуаров, входящих в батарею.

5. Детандер (расширительная машина): проверяют, имеется ли смазка во всех масленках (цилиндр смазывают простым машинным маслом).

Выходной вентиль для воздуха из цилиндра должен быть открыт, вход воздуха в цилиндр — закрыт.

6. Разделительный аппарат (колонка). Входный вентиль для воздуха закрыт. Выход азота из аппарата открыт в атмосферу. Открыт выход грязного кислорода из аппарата. Выпуск чистого кислорода из аппарата закрыт. Вентиль для перелива обогащенного кислородом жидкого воздуха из нижней колонны в верхнюю открыт (практически оборотов на 10). Открыт также вентиль для перелива жидкого азота из нижней колонны в верхнюю (практически тоже оборотов на 10). Указатели уровней жидкости включить.

II. Пуск производится в следующем порядке: 1) пускается мотор компрессора, и постепенно выводится пусковой реостат, затем

поднимаются щетки мотора, и реостат снова вводится (с целью подготовки его к новому пуску).

2. Постепенно закрываются продувочные вентили, начиная с первой ступени компрессора и дальше: у брызгоуловителя и на выходной трубе за декарбонизатором. Когда давление во вто ой ступени поднимется до 5 ат, медленно закрывается „обходной“ вентиль, и воздух целиком будет проходить через декарбонизаторы.

Давление во всех трубопроводах и в батарее для осушки воздуха постепенно увеличивается, и в это же время (атмосферах при 30) производится поочередная продувка всех резервуаров, входящих в осушительную батарею, после чего открывается вентиль на выходе из батареи.

3. Открывается вход в теплообменник разгонного аппарата, и производится продувка воздушных трубок теплообменника и змеевика испарителя, открытием „продувочных“ вентилях за теплообменником и у дроссельного клапана. После продувки, когда давление воздуха достигнет 80—100 ат, открывают вентиль на входе в цилиндр детанде а. Детандер начинает работать. Дальше открывается дроссельный клапан так, чтобы давление перед ним было максимально-возмо жное (150—200 ат). Воздух поступает в аппарат по двум путям: около 50—60% через детандер, остальное—через дроссельный клапан.

III. Процесс охлаждения длится около 4-5 час., причем через 1—1½ часа появляется жидкость в испарителе, а еще через промежуток времени (около 1 часа)—и в верхней колонне. Когда в последней уровень жидкости достигнет некоторой величины (10—12 см), начинают постепенно закрывать перелив богатой кислородом жидкости из испарителя и одновременно жидкого азота из нижней колонны в верхнюю (практически обычно закрывают оба вентиля на два оборота после повышения уровня в верхней колонне на каждые 4 деления указателя). В конце концов оба эти вентиля окажутся закрытыми до своего нормального положения, которое для вентиля богатой кислородом жидкости равно примерно открытию его на ½ оборота, а для жидкого азота у различных аппаратов различно (около ⅓ оборота и меньше). Чем больше жидкого азота мы передаем в верхнюю колонну, тем полнее там будет идти ректификация. Поэтому нужно стремиться к тому, чтобы переливной азотный вентиль был открыт по возможности больше, но вместе с тем чтобы качество перетекающего вверх азота было достаточно высоким (не менее 99,5% N₂). Таким образом степень открытия азотного вентиля определяется анализами азота из нижней колонны. После этого начинают делать анализы кислорода и азота в верхней колонне и, когда качество этих продуктов будет удовлетворительным, сливают жидкий кислород в стационарный танк. При этом необходимо следить за тем, чтобы уровень кислорода в аппарате не претерпевал больших колебаний, чистый же азот включают в газольдер, прекращая выпуск его в атмосферу.

Если кислород нужен в газообразном состоянии, то воздух прекращают давать в детандер и последний останавливают тогда, когда уровень жидкого кислорода еще несколько не достигнет нормы (35 см). Вслед за этим, постепенно приоткрывая дроссельный вентиль для воздуха, снижают давление перед вентилем до такой степени, чтобы уровень, достигнув нормы, не поднимался выше. Практически давление будет постепенно снижено атмосфер до 60.

Чистый кислород в газообразном виде и чистый азот пускают в газгольдеры. Контроль качества газов осуществляется во все время работы аппарата, причем пробы отбираются и анализируются каждые 30—60 мин.

АНАЛИЗ АЗОТА И КИСЛОРОДА

Анализ азота заключается обычно в определении примеси кислорода в азоте. Эта примесь невелика, и поэтому лучше всего пользоваться аппаратом Орса. Поглощение кислорода ведется чаще всего желтым фосфором (так как это практически удобней), реже употребляется щелочный раствор пирогаллола.

Фосфор помещается в пипетку аппарата в виде тонких палочек, приготовленных следующим образом: расплавленный под водой фосфор засасывается каучуковой грушей в стеклянную трубочку, которая после этого быстро охлаждается холодной водой.

При больших количествах кислорода (больше 25%) фосфором лучше не пользоваться, так как тогда он плавится и реакция часто протекает со взрывом, а это может повести к ожогам лица и глаз у работающего. Присутствие кислорода всегда заметно по образованию белого облачка. Когда поглощение кислорода кончилось, облачко исчезает, так как образовавшиеся фосфорный и фосфористый ангидриды быстро растворяются в воде. Реакция лучше всего проходит при температуре около 20°.

Анализ кислорода производят поглощением кислорода медью, погруженной в раствор хлористого аммония и аммиака. Можно применять и другую аммонийную соль (сернокислый или углекислый аммоний). Медь применяется для анализов в виде сетки или в виде спиралек, свернутая из проволоки с диаметром 0,8 мм.

Анализ производится с помощью бюретки и пипетки Гемпеля.

Аммиачный раствор аммонийной соли готовится по следующему рецепту: в 1 л дистиллированной воды растворяют 750 г хлористого аммония и к раствору прибавляют 1 л нашатырного спирта с содержанием аммиака в нем около 18—20%. Медь в состоянии поглотить очень много кислорода, и поэтому заряженной пипеткой Гемпеля можно сделать несколько десятков анализов кислорода. Поглощение кислорода происходит быстро, особенно при потягивании пипетки.

Раствор от получаемой медноаммиачной соли окрашивается в синий цвет.

Производство анализов просто, и их делает обслуживающий азотно-кислородный аппарат, рабочий или его помощник. Анализы во время работы аппарата производятся каждые 30—60 мин. Анализ грязного кислорода делают так же, как и анализ чистого кислорода.

ХРАНЕНИЕ, УЧЕТ И ТРАНСПОРТ КИСЛОРОДА И АЗОТА

Азот выводится из аппаратов в газообразном виде и поступает в газгольдеры.

Так как для производства аммиака и цианамид азот нужен в больших количествах, то азотные установки строятся всегда около аммиачных или цианамидных заводов, причем кислород, получаемый на этих установках, является отходом производства и использование его бывает различно.

Установки, специально выстроенные для получения кислорода, до сих пор, как правило, азота не используют и выбрасывают его (в более или менее чистом виде) обратно в атмосферу. На большинстве имеющихся кислородных установках кислород производится для автогенных работ. Он выходит из аппарата в жидком или газообразном виде; и в первом случае поступает в особые стационарные кислородные танки, во втором случае—в газгольдеры. Газгольдеры являются промежуточным звеном между производством газа и его дальнейшим потреблением; они выравнивают давление газа, которое в них всегда бывает более или менее постоянно.

Различают два рода газгольдеров: мокрые и сухие. Мокрые газгольдеры состоят из железного клепаного колокола, плавающего в водяном бассейне, причем вода служит гидравлическим затвором. Газ вводится и выводится по трубам, проходящим под водой и выведенным над уровнем воды под колоколом. При наполнении газгольдера колокол поднимается, и, наоборот, когда газ собирается из газгольдера, колокол опускается.

Для того чтобы поднятие и опускание колокола не выводило его из правильного положения, устраивается особый направляющий каркас.

Когда нужны газгольдеры большой емкости, то их делают телескопическими. Телескопический газгольдер состоит из 2—6 звеньев. Его устройство видно на рис. 24. Вокруг бассейна и колокола газгольдера в местах с суровым климатом воздвигается каменное (обычно круглое) здание с крышей, которое зимой приходится отапливать.

Сухой газгольдер представляет собой неподвижный многогранный резервуар с крышей, внутри которого движется диск, отделяющий верхнюю часть резервуара от той части, где находится газ. Диск

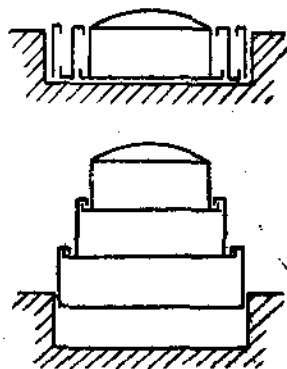


Рис. 24. Схема телескопического газгольдера.

движется свободно, наподобие поршня, причем герметичность достигается с помощью желобов на краях диска, заполненных дегтем или маслом. Некоторое количество дегтя стекает вниз по стенкам резервуара, собирается в приемниках на дне его и снова подается с помощью насоса наверх. Постройка сухих газгольдеров обходится значительно дешевле мокрых, так как здесь не нужно строить ни дорогостоящего бассейна, ни здания.

Для газообразного кислорода иногда применяют газгольдеры сигарообразной формы, сделанные из прорезиненной материи.

Жидкий кислород сливается в особые стационарные танки, хорошо изолированные от проникновения тепла из окружающей среды. Кислородные стационарные танки бывают, различного устройства и формы. На рис. 25 изображен один из таких верти-

кальных металлических танков. Он состоит из приемного резервуара *A* для жидкости и наружного резервуара *B*. Пространство *C* (между ними) заполнено изоляционным материалом. Наполнение танка производится по трубопроводу 1, который соединен с аппаратом для разделения воздуха, при этом открывается вентиль жидкого кислорода на аппарате. Образующиеся при наполнении пары кислорода могут быть отведены обратно в аппарат по трубе 2 или же с помощью змеевика 3 выпускаться на воздух или в газгольдер. Проходя по змеевику, газ отдает свой

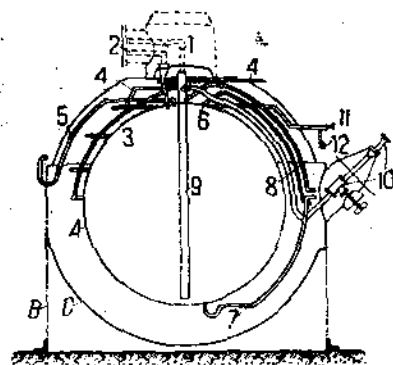


Рис. 25. Схема стационарного танка для жидкого кислорода.

холод изоляции, чем поглощает часть притекающего извне тепла.

При наполнении танка резервуар *A* охлаждается, отчего происходит сжатие самого резервуара и окружающей изоляции. Это может создать разрежение внутри резервуара *B* и вызвать приток снаружи влажного воздуха. Во избежание этого от змеевика 3 отводится труба 4, имеющая целый ряд мелких отверстий и идущая в изоляции *C* тоже в виде змеевика. Через отверстия трубы 4 постоянно выходят в изоляцию тонкие струйки кислорода, что препятствует проникновению туда воздуха. Танк снабжен предохранительным клапаном, установленным на трубе 5, манометром (трубка 6) и указателем уровня жидкости (трубки 7—8). Выпуск жидкого кислорода из танка производится по трубе 9 через вентиль 10. При этом вентиль 11 на змеевике 3 и предохранительный клапан должны быть закрыты. Надо также закрыть обратный выпуск газа в азотно-кислородный аппарат (труба 2). Жидкий кислород выливается за счет давления, которое можно создавать и поддерживать в танке от кислородного аппарата. Если последний не рабо-

тает, то давление создают при помощи баллона с сухим кислородом, присоединенного к штуцеру 12. При этом трубопровод 1 должен быть закрыт. По окончании разлива закрывают вентиль 12 и вентиль 10 и тотчас же снимают с последнего рукав, через который производился выпуск кислорода из танка; затем открывают вентиль 11, чтобы выпустить давление из резервуара А. Во время остановок производства вентиль 11 должен быть всегда открытым, чтобы испаряющийся кислород мог свободно уходить из танка в газгольдер или в атмосферу.

Учет вырабатываемых газов производится часто с помощью диафрагм, установленных в трубопроводах на выходе газов из аппарата. Диафрагмы представляют собой пластинку, суживающую сечения газопровода, отчего напор газового потока за диафрагмой будет значительно меньше, чем до нее. Так как сечения трубопровода перед диафрагмой и за ней одинаковы, то скорость газа не изменится и потеря напора целиком отзовется лишь на давлении. Если мы включим дифференциальный манометр (представляющий собой стеклянную трубку, изогнутую в виде французской буквы U) так, чтобы один ее конец был соединен с газопроводом до диафрагмы, а другой—после диафрагмы, то жидкость, налитая в эту трубку, будет иметь различные уровни в обоих ее коленах (рис. 26). Чем больше газа проходит по трубопроводу, тем больше скорость газа и тем больше будет разность уровней жидкости в манометре.

Если заранее прокалибровать диафрагму непосредственными измерениями, то всегда по показанию манометра можно знать, сколько газа выходит из аппарата в единицу времени (обычно в час). Для этого дифференциальный манометр снабжается шкалой, по которой отсчитываются разности уровней жидкости.

При расходовании газа из газгольдера для какого-либо производства его учет ведут при помощи различных счетчиков, чаще всего труб Вентури, иногда 'мокрых газовых счетчиков.

Кислород, при наполнении его в баллоны, учитывается по емкости баллона, которая множится на давление в баллоне по наполнении. Например: мы имеем баллон емкостью в 40 л, давление кислорода в нем 150 ат. Это значит, что в нем находится $40 \times 150 = 6000$ л, или 6 м³ кислорода. Жидкий кислород учитывается по весу.

Транспорт азота почти не производится, так как крупные потребители имеют, как говорилось, свои азотные установки на

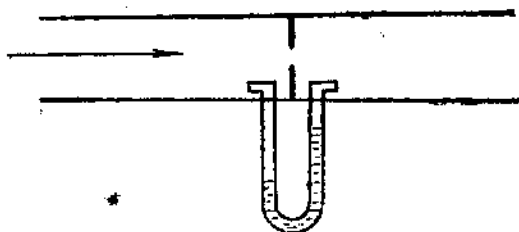


Рис. 26. Схема включения диафрагмы и дифференциального манометра для измерения скорости газов.

месте потребление. Мелкое же потребление азота крайне незначительно. В этом случае азот перевозят в сжатом виде в стальных баллонах. В таких же баллонах перевозят и газообразный кислород; для этого его сжижают до 150 ат. Для сжатия кислорода устанавливаются специальные компрессора, обычно трехступенчатые. Внешний вид такого вертикального компрессора изображен на рис. 27. Компрессор приводится в движение электромотором.

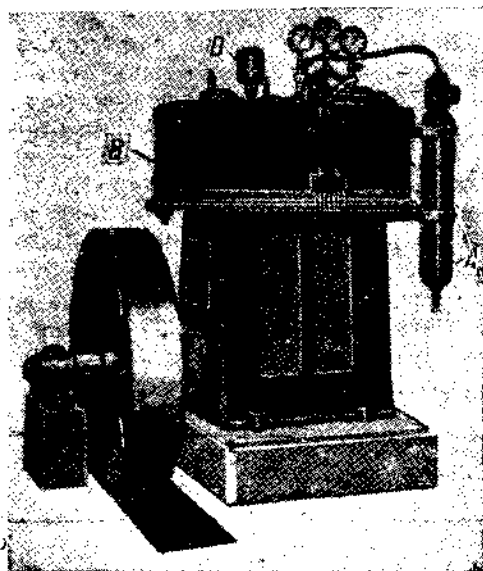


Рис. 27. Внешний вид кислородного компрессора.

Сжатый кислород по выходе проходит через водоотводчик А и направляется по стальному трубопроводу в помещение для „разливки“. Здесь слово „разливка“ нельзя понимать в буквальном смысле, так как сжатый до 150 ат кислород при нормальной температуре не жидкость, а газ. Цилиндры компрессора нельзя смазывать маслом, так как масло с сжатым кислородом взрывает. Поэтому кислородные компрессоры надлежит смазывать водой (лучше всего—дистиллированной). Масло смазываются лишь движущиеся части, не соприкасающиеся с кислородом. Все три штока компрессора приводятся в движение от общего коленчатого вала. Цилиндры и холодильники из медных трубок расположены в одной

общей ванне В с проточной водой. С—масленка для смазки движущихся частей, D—резервуар для дистиллированной воды. На рисунке видны также манометры всех трех ступеней. Сальниковыми уплотнениями для штоков служат фибровые манжеты. Разливочная для кислорода должна быть в отдельном помещении, причем ее не следует загромождать баллонами, наполненными кислородом. Последние должны отправляться тотчас же в особый склад.

Баллоны представляют собой стальные цилиндры, снабженные бронзовыми вентилями. Они должны каждые три года подвергаться гидравлическому испытанию на 225 ат и быть окрашены в голубой цвет. На каждом из них выбивается дата испытания и емкость баллона. Если окраска на баллоне не ясна, или последнее испытание было произведено больше трех лет тому назад, то такой баллон наполнять кислородом нельзя. При наполнении необходимо следить за тем, чтобы вентили не оказались маслянистыми.

Так как кислород поступает в баллоны теплым, то после охлаждения его давление в баллоне несколько понизится. Поэтому само наполнение ведут до 160 ат, с тем чтобы по охлаждении давление не было меньше 150 ат.

Жидкий кислород перевозится в особых резервуарах Дюара, о которых говорилось в гл. III, или в транспортных танках, типа описанного выше неподвижного танка. Резервуары Дюара имеют небольшую величину и могут применяться лишь для перевозки малых количеств жидкого кислорода, в то время как транспортные танки перевозят сразу большие количества кислорода. Танки с жидким кислородом перевозятся на грузовиках. Во время перевозки часть кислорода испаряется и теряется, но все же транспорт жидкого кислорода обходится дешевле, чем газообразного. Дело в том, что стальные баллоны очень тяжелы и малоемки. Так, в баллоны весом около 65—70 кг может вместиться всего около 6 м³ газа в пересчете на атмосферное давление. Это значит, что на 8,5 кг кислорода (вес 6 м³) приходится 70 кг тары. Кроме того стальные баллоны очень дороги, и у нас в СССР их пока недостаточно. Ниже дана таблица, характеризующая транспортные танки, строящиеся фирмой. Гейландт, для перевозки жидкого кислорода.

Таблица 7

Тип	500 м³	1 000 м³	1 500 м³	2 400 м³
Емкость в л.	660	1 317	2 009	2 988
Максимальное наполнение в л.	648	1 296	1 992	2 988
Наполнение в м³ газа при 150 и 760 мм	540	1 080	1 660	2 490
Вес пустого танка в кг	450	580	720	1 050
Вес жидкого кислорода в кг	737	1 453	2 255	3 390
Общий вес	1 187	2 033	2 975	4 440
Наружный диаметр в мм	1 485	1 748	1 934	2 165
Диаметр основания в мм	1 585	1 848	2 034	2 080
Общая высота в мм	1 558	1 886	2 000	2 218
Тип требующ. грузовика	1,5 т	2,5 т	3,5 т	5 т
% испарения кислор. в час. при наполнении на 2/3	0,42	0,34	0,3	0,26

Если кислород для автогенных работ употребляется на месте, то его подводят к месту потребления по трубопроводам, сжатым до давления от 8 до 35 ат. Сжатие производит кислородный компрессор низкого или среднего давления. В этом случае между компрессором и местом потребления кислорода на трубопроводе ставится достаточного объема бак, который будет сглаживать толчки, происходящие от неравномерного потребления кислорода, и служить аккумулятором в случае внезапного прекращения на короткий срок потребления кислорода сварщиками.

П Р И Л О Ж Е Н И Я

ЗАВИСИМОСТЬ ТЕПЛОЕМКОСТЕЙ ВОЗДУХА ОТ ТЕМПЕРАТУР И ДАВЛЕНИЙ

(Теплоемкости даны для 1 кг воздуха)

Темпера- тура	1 ат	10 ат	20 ат	40 ат	70 ат	100 ат
100°	0,237	0,239	0,240	0,245	0,250	0,258
0°	0,238	0,242	0,247	0,251	0,277	0,298
- 50°	0,238	0,246	0,257	0,279	0,322	0,412
-100°	0,239	0,259	0,285	0,370	0,332	0,412
-150°	0,240	0,311	0,505	0,370	0,332	0,412

Примечание: таблица составлена проф. Линде.

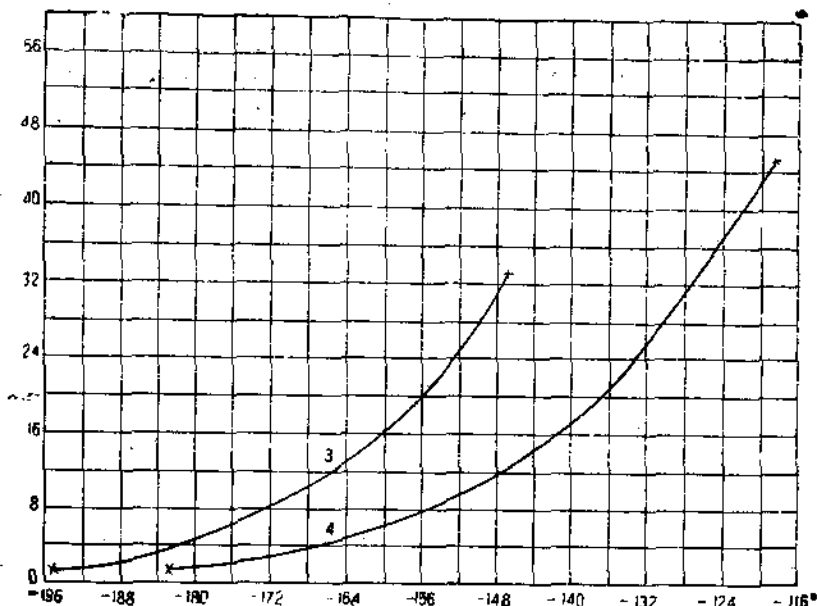


Рис. 28. Кривые 3 и 4 зависимостей температур кипения (сжижения) азота и кислорода от давления.

ЛИТЕРАТУРА НА РУССКОМ ЯЗЫКЕ ПО ПРОИЗВОДСТВУ АЗОТА И КИСЛОРОДА

1. Ж. Клод, Жидкий воздух.
2. Лашин, Технический кислород.
3. Маляревский и Голованов, Синтез аммиака.
4. Фокин, Синтез аммиака.

О Г Л А В Л Е Н И Е

Глава	1. Свойство азота и кислорода и их применение	3
Глава	2. Принцип получения низких температур	12
Глава	3. Свойство жидкого воздуха и принцип ректификации воздуха	18
Глава	4. Компрессоры для сжатия воздуха	24
Глава	5. Очистка воздуха от пыли, углекислоты и влаги	28
Глава	6. Аппарат Линде для разделения воздуха и схема установки Линде	40
Глава	7. Пуск в ход установки Линде, регулирование процесса, неполадки и аварии.	48
Глава	8. Установка Клода	52
Глава	9. Установка Гейландта	57
Глава	10. Анализ азота и кислорода	64
Глава	11. Хранение, учет и транспорт азота и кислорода	65
П р и л о ж е н и я		71