

кислородных танков, а также и других аппаратов глубокого охлаждения является чрезвычайно целесообразным и выгодным. Замена магнезии аэрогелем в каждом 1200-литровом танке даёт экономии 18 300 л жидкого кислорода в год, не считая экономии в 110 л при каждой заливке тёплого танка.

Изложенные преимущества изоляции из аэрогеля ставят на очередь вопрос о приме-

нении его при изготовлении транспортных и стационарных кислородных танков. Стоимость 1 м³ аэрогеля при промышленном его производстве будет не выше стоимости 1 м³ магнезии. Внедрение аэрогеля в промышленность является в настоящее время вполне своевременным и необходимым шагом для значительного снижения тепловых потерь различных аппаратов.

ЖИДКИЙ КИСЛОРОД И ЕГО ИСПОЛЬЗОВАНИЕ

Инж. Д. Л. ГЛИЗМАНЕНКО

Результаты работ акад. П. Л. Капицы в области создания турбокислородных установок низкого давления принципиально нового типа для получения жидкого кислорода открыли большие практические возможности производства и применения жидкого кислорода в широких масштабах для обеспечения потребностей в этом газе различных отраслей промышленности. В связи с этим ряд предприятий и областей народного хозяйства проявляет большой интерес к вопросам хранения, транспортировки и газификации жидкого кислорода. При этом ставятся вопросы как технического, так и экономического порядка.

В настоящей статье мы намерены осветить с возможной полнотой проблему использования жидкого кислорода с целью правильной ориентировки потребителей о возможных и целесообразных условиях его применения.

1. Свойства жидкого кислорода

При нормальных условиях (0° Ц и 760 мм рт. ст.) кислород, как известно, находится в газообразном состоянии и имеет удельный вес 1,4289 кг/м³. Жидкий кислород при атмосферном давлении имеет температуру —182,95° Ц, вследствие чего всегда будет происходить интенсивный приток к нему тепла извне, вызывающий постепенное испарение кислорода.

Вес 1 л жидкого кислорода при нормальных условиях составляет 1,13 кг. Таким образом, при испарении 1 л жидкого кислорода получается $\frac{1,13}{1,4289} = 0,79 \text{ м}^3 = 790 \text{ л}$ газообразного кислорода (при 0° Ц и 760 мм рт. ст.).

Для получения жидкого кислорода из атмосферного воздуха применяют метод глубокого охлаждения. Установки, получающие кислород в жидком виде, должны обладать повышенной холодопроизводительностью, так как при отборе из установки кислорода в жидком виде из неё дополнительно отводится около 95 ккал холода на каждый 1 кг жидкого кислорода.

С этой целью установки для получения жидкого кислорода снабжаются холодильным агрегатом — поршневым (работающим по циклу высокого и среднего давления) детандером или турбодетандером (метод акад. П. Л. Капицы). Такое же количество тепла должно быть затрачено в газификаторах при испарении 1 кг жидкого кислорода для превращения его в газ при температуре +20° Ц и давлении 1 ат. Скрытая теплота испарения жидкого кислорода сравнительно невелика и при 1 ат составляет 51 ккал/кг. Вследствие этого жидкий кислород, находясь в сосуде, не снабжённом достаточно хорошей изоляцией от тепла окружающей среды, будет довольно быстро испаряться.

2. Хранение и транспортировка жидкого кислорода

Для хранения и транспортировки жидкого кислорода в небольших количествах применяются сосуды с вакуумной изоляцией в межстенном пространстве — так называемые сосуды Дьюара. Они отличаются лёгкостью и дают весьма небольшое испарение жидкого кислорода. Сосуды Дьюара изготовляются нашей промышленностью ёмкостью 2, 5, 10, 15 и 25 л. Наиболее распространённым типом является сосуд Дьюара на 15 л жидкого кис-

Таблица 1

Ёмкость по кислороду			Вес (в кг)		Габариты (в мм)		Потери при хранении (в г/час)
в л	в кг	в м ³	порож- ный	напол- ненный	D	H	
5	5,7	3,9	4,5	10,2	240	500	50
10	11,3	7,9	7,5	18,8	295	620	45
15	17,0	11,8	17	34	360	690	40

лорода. Разрез этого сосуда изображён на рис. 1, а размеры даны в табл. 1.

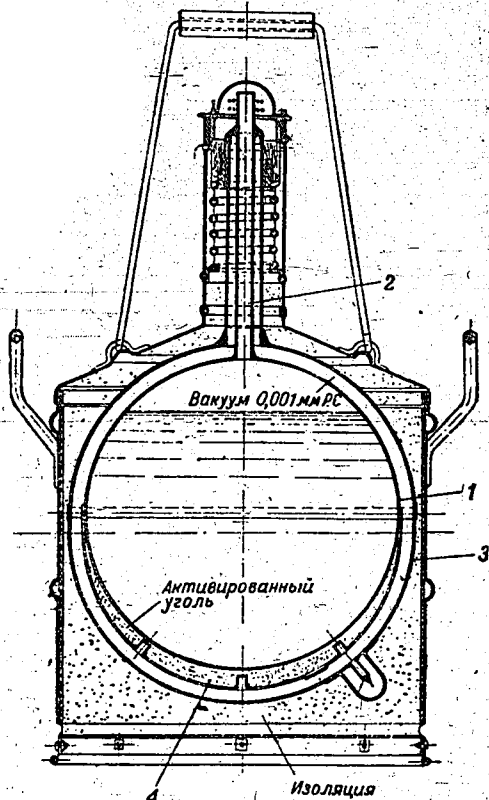


Рис. 1. Сосуд Дьюара для хранения и транспортировки жидкого кислорода.

Жидкий кислород наливается во внутренний шар 1, подвешенный на длинной горло-

Таблица 2

Номиналь- ная ёмкость (в л)	Вес (в кг)			Потеря на испарение	
	тара	брутто	нетто	в кг	в %
5	4,4	9,25	4,85	0,7	14,5
10	7,85	18,05	10,2	1,5	14,7
15	20,2	36,25	16,05	1,95	12,1

Таблица

Наименование	Транспортные		Стационарные	
	1 000	2 400*	4 000	6 600
Ёмкость по жидкому кислороду (в л)	1 200	2 890	4 820	7 950
То же в пересчёте на газ (в м ³)	1 000	2 400	4 000	6 600
Вес: а) порожнего танка (в кг)	1 200	1 800	2 300	3 385
б) жидкого кислорода (в кг)	1 360	3 280	5 450	9 010
в) наполненного танка (в кг)	2 560	5 080	7 750	12 395
Максимальное рабочее давление (в атм)	0,6	0,6	0,6	0,6
Пробное давление (в атм)	2	2	2	2
Потеря на испарение (в % от ёмкости в час) (при изоляции углекислой магнезией)	0,7	0,6	0,5	0,4
Размеры латунного шара (в мм): а) внутренний диаметр	1 320	1 770	2 100	2 480
б) толщина стенки	2	2,5	2,5	3
Наружные габариты кожуха (в мм): а) диаметр	1 850	2 410	2 760	3 150
б) высота	1 810	2 400	3 170	3 510
Потребное количество изоляции (MgCO ₃) (в кг)	500	800	1 350	2 000
Грузоподъёмность автомашины (в т)	2,5—3	5	—	—

* Танк 2 400 часто также употребляется как стационарный.

вине 2 внутри наружного шара 3. Откачка до остаточного давления 0,001 мм рт. ст. производится из междустенного пространства шаров 1 и 3, вакуум в котором поддерживается также адсорбцией при низкой температуре остаточных газов активированным углём 4.

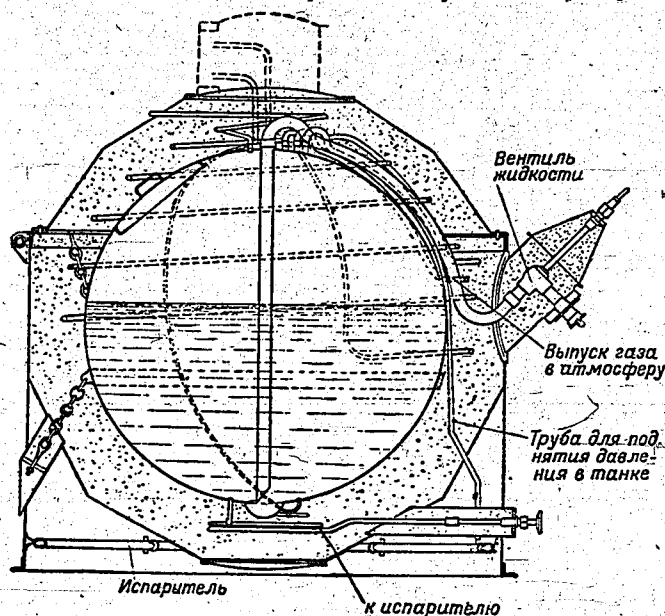


Рис. 2. Разрез транспортного танка.

Благодаря такой конструкции испарение жидкого кислорода из сосуда Дьюара составляет всего от 40 до 60 г в час. При наполнении сосуда Дьюара жидким кислородом часть его испаряется за счёт охлаждения внутреннего шара до температуры жидкого кислорода. Эта потеря на испарение зависит от веса сосуда и составляет по данным сделанных замеров 12—15% весовой ёмкости сосуда, как это видно из табл. 2.

Сосуды Дьюара не отличаются достаточно прочной конструкцией и поэтому более применимы в лабораторных условиях, чем в заводской практике.

Большие количества жидкого кислорода хранятся и перевозятся в так называемых стационарных и транспортных танках. Они представляют собой латунные шаровые резервуары, помещённые в кожух из листового железа. Пространство между латунным шаром и кожухом заполнено изоляцией из шлаковой ваты или порошкообразной магнезии. Разрез транспортного танка дан на рис. 2.

Стационарный танк отличается от транспортного наличием у него сверху дополнительного колпака (показан пунктиром), через который подводится труба для подачи жидкого кислорода и труба для отвода газообразного кислорода в газгольдер. Техническая характеристика танков, выпускаемых нашей промышленностью, приведена в табл. 3.

Потери от испарения жидкого кислорода при наполнении транспортного танка ёмкостью 1000 м³ составляют в среднем 150—200 м³ кислорода в том случае, если танк предварительно не был охлаждён, т. е. находился в «тёплом» состоянии. На кислородных станциях, оборудованных компрессорами, этот испаряющийся кислород отводится по трубе в газгольдер, откуда кислородным компрессором накачивается в баллоны. При отсутствии кислородных компрессоров данное испарение будет являться потерей.

Как видно из табл. 3, в период хранения и перевозки жидкого кислорода в танке потери его на испарение составляют от 0,4 до 0,7% ёмкости танка в час. Эти потери зависят от количества жидкости в танке; с увеличением степени заполнения танка жидким кислородом относительная величина потерь на испарение уменьшается. Проведённые испытания транспортного танка ёмкостью 1000 м³

(считая на газ) с изоляцией из углекислой магнезии дали потери на испарение, приведённые в табл. 4.

Таблица 4

Наименование	Заполнение (в % к объёму)			
	100	50	25	10
Средняя часовая испаряемость кислорода в м ³ /час	5,76	3,16	2,82	2,48
То же в % к фактической заполнённости танка	0,622	0,656	1,282	3,11

Наиболее распространённым в практике типом транспортного танка является танк ёмкостью на 1200 л (1000 м³), так как его можно установить на трёхтонной машине или прицепе. Схема использования транспортных средств, применяемых при перевозке резервуаров с жидким кислородом, дана на рис. 3.

Потери кислорода на испарение определяются качеством изоляции. В крупных резервуарах для этой цели применяется шлаковая вата и магнезия. При этом шлаковая

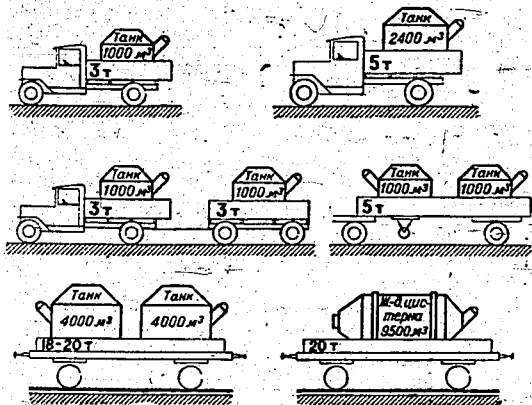


рис. 3. Схема использования транспортных средств при перевозке жидкого кислорода.

вата является наихудшей изоляцией, так как она обладает относительно высоким объёмным весом и большим коэффициентом теплопроводности.

Наилучшей изоляцией для танков с жидким кислородом является так называемый аэрогель*). Как видно из табл. 5,

Таблица 5

Наименование	Материал		
	шлаковая вата	углекислая магнезия	аэрогель
Коэффициент теплопроводности . . .	0,06	0,03	0,0148
Объёмный вес при наибольшем уплотнении (в кг/м³) . .	240	290	100

аэрогель обладает наименьшими коэффициентом теплопроводности и объёмным весом.

При аэрогеле испаряемость жидкого кислорода в танке уменьшается примерно в 2 раза по сравнению с углекислой магнезией и в 4 раза по сравнению со шлаковой ватой. Однако, широкое применение его лимитируется отсутствием выпуска аэрогеля в промышленном масштабе.

*) Статья о свойствах и получении аэрогеля печатается в этом номере бюллетеня «Кислород» (см. стр. 39).

Следует подчеркнуть, что получаемое при аэрогеле уменьшение потерь продукта на испарение позволяет значительно увеличить радиус перевозок жидкого кислорода и расширить области его применения. Тем самым организация промышленного изготовления аэрогеля целесообразна как с технической, так и с экономической стороны.

Весьма интересной и новой для нас является проблема транспортирования больших количеств жидкого кислорода на значительные расстояния в специальных железнодорожных цистернах. В данном случае вопрос потерь кислорода на испарение во время пути является решающим. Такая цистерна, установленная на платформе 20 т грузоподъёмностью, может вместить 13,5 т жидкого кислорода, или 9500 м³ газообразного. Будучи изолированной от тепла внешней среды шлаковой ватой, цистерна даёт потерю на испарение, в среднем равную 30 м³/час. Таким образом, за 4 суток из цистерны испарится около 30% находящегося в ней кислорода. Применением аэрогеля эту величину можно сократить в 4 раза, соответственно увеличив экономически допустимое пребывание цистерны в пути. Наряду с этим предлагались и другие пути разрешения данного вопроса. К ним относятся: а) устройство передвижных газонаполнительных станций и б) снабжение цистерны установкой для вторичного ожижения испаряющегося кислорода.

Передвижная газонаполнительная установка состоит из цистерны с жидким кислородом, вагона с кислородным компрессором, газгольдером и вагона с запасом баллонов и наполнительной рампой. Испаряющийся кислород собирается в резиновый газгольдер, откуда во время пути накачивается в баллоны. Порожние баллоны установка получает с базовых складов на промежуточных станциях в обмен на выдаваемые ею наполненные баллоны. Для возможности наполнения достаточно большого количества баллонов установка может быть снабжена ещё и тёплым газификатором. Таким образом, наличие газгольдера, компрессора и наполнительной рампы исключает возможность потерь кислорода при перевозке его в цистерне.

Транспортная установка для перевозки жидкого кислорода без потерь*) состоит из

*) Эта схема разработана конструкторским бюро Глававтогена.

железнодорожной платформы с цистерной на 13,5 т жидкого кислорода, вагона с компрессорно-ожижительной аппаратурой и бытового вагона для обслуживающего персонала. Компрессорно-ожижительная установка, смонтированная во втором вагоне, служит для оживания испарившегося кислорода с целью направления его обратно в цистерну. Она использует воздушный холодильный цикл высокого давления с поршневым компрессором и поршневым детандером. Компрессор приводится в действие от двигателя внутреннего сгорания. Рекуперация получаемого холода осуществляется в трубчатом теплообменнике. Потребная холодопроизводительность такой установки при испарении кислорода в $30 \text{ м}^3/\text{час}$ составляет около 4500 ккал/час .

Следует указать, что такие комплексные железнодорожные установки для транспорта больших количеств жидкого кислорода без потерь ещё не опробованы в промышленных условиях. В эксплуатации их может встретиться ряд трудностей и весьма возможно, что окажется целесообразным пойти на большие потери кислорода в пути или уменьшать их за счёт применения более дорогой, но высококачественной изоляции. Обслуживание таких установок в пути будет стоить достаточно дорого, что ляжет большим накладным расходом на транспортируемый кислород.

3. Газификация жидкого кислорода

В настоящем разделе мы излагаем вопрос газификации жидкого кислорода, в основном, с точки зрения использования его для автогенной обработки металлов.

Для целей интенсификации технологических процессов в чёрной и цветной металлургии, химии, газификации топлив и т. п. требуются большие количества газообразного кислорода, и в этом случае задача должна разрешаться путём постройки мощных станций для получения газообразного кислорода в непосредственной близости от места его потребления.

а) Газификационные установки низкого давления (холодные газификаторы)

К установкам этого типа относятся газификаторы, которые рассчитаны на максимальное давление кислорода до $15-20 \text{ ат}$. Это давление достаточно для подачи кислорода по трубопроводу к местам его потребления и обеспечивает возможность резки стали толщиной до

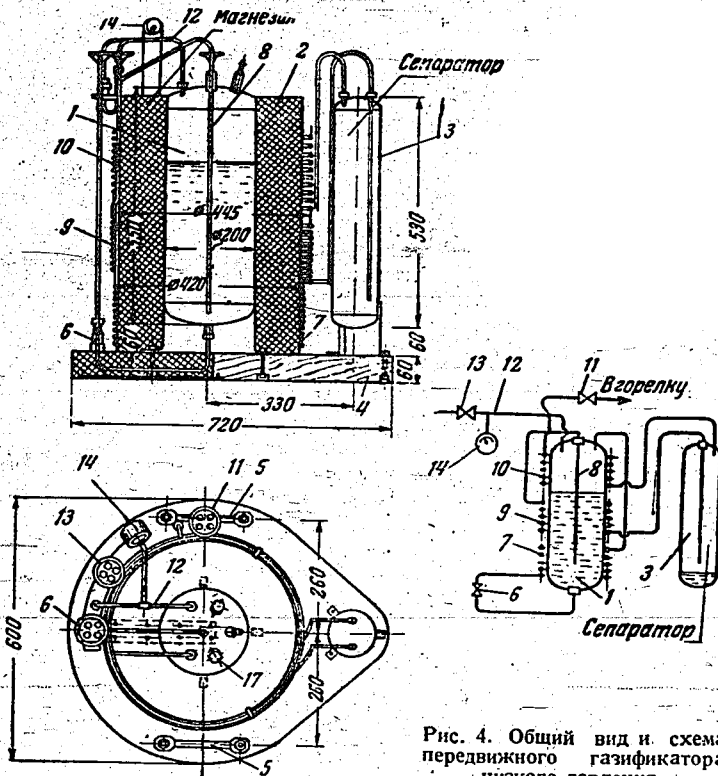


Рис. 4. Общий вид и схема передвижного газификатора низкого давления.

300 мм . Газификаторы низкого давления изготовляются как передвижного, так и стационарного типа.

Передвижные газификаторы служат для питания кислородом 1—2 сварщиков или резчиков. Они устанавливаются в непосредственной близости от места производства автогенных работ. Кислород подаётся в горелку по шлангу. Жидкий кислород доставляется в сосуды Дьюара, из которых переливается в резервуар газификатора. Общий вид и схема такого газификатора представлены на рис. 4.

Газификатор вмещает до 13 л жидкого кислорода и рассчитан на давление до 12 ат. Он состоит из латунного сварного резервуара 1, помещённого в кожух с изоляцией 2. Рядом с газификатором имеется сосуд 3, так называемый сепаратор. Все эти части смонтированы на деревянной подставке 4, снабжённой ручками 5. Газификатор работает следующим образом: жидкий кислород из резервуара 1 через вентиль 6 перепускается в змеевик 7, где испаряется и направляется в верхнюю часть резервуара 1. Образовавшимся давлением жидкий кислород по трубке 8 передвигается в змеевик 9, испаряется в нём, проходит сепаратор 3, где происходит испарение остаточной жидкости, и через подогревательный змеевик 10 и вентиль 11 подаётся в горелку. Трубка 12 соединена с манометром 14 и имеет вентиль 13 для спуска газа из газификатора в атмосферу. Сосуд 1 снабжён пружинным предохранительным клапаном 15 и предохранительной разрывной мембраной 16. Наполнение газификатора жидким кислородом производится через пробку 17.

Для заливки газификатора требуется один сосуд Дьюара ёмкостью 15 л. Запас кислорода (газа) в газификаторе составляет около 9 м³, что соответствует примерно 1½ баллонам кислорода ёмкостью в 40 л.

Газификаторы данного типа опробованы в производственных условиях и оказались весьма практичными в работе. При пользовании этими газификаторами отпадает необходимость иметь большое количество баллонов, которые заменяются сосудами Дьюара, более лёгкими и транспортабельными, не требуется кислородных редукторов и прочей аппаратуры, связанной с баллонным хозяйством. Особенно удобны такие газификаторы при монтажных и строительных работах по сварке и резке. Кислород может храниться в газификаторе несколько суток, причём потери его на испарение составляют не более 1% в час от ёмкости газификатора. Конструкция газификатора настолько проста, что он может быть изготовлен любым предприятием собственными средствами.

Для крупных потребителей кислорода с постоянными местами подводки газа применяют стационарные холодные газификаторы. Схема такого газификатора показана на рис. 5. Газификатор устанавливается в специальном помещении, выполняемом в виде пристройки к основному производственному корпусу или в

виде отдельного здания. Схема планировки помещений газификаторной станции дана на рис. 6.

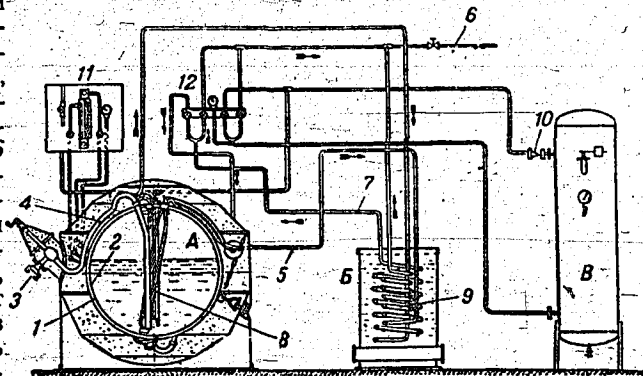


Рис. 5. Схема холодного газификатора.

От газификатора к местам потребления кислорода прокладывается трубопровод для подачи кислорода. Так как газообразный кислород, получаемый путём испарения жидкого кислорода, не содержит в себе водяных па-

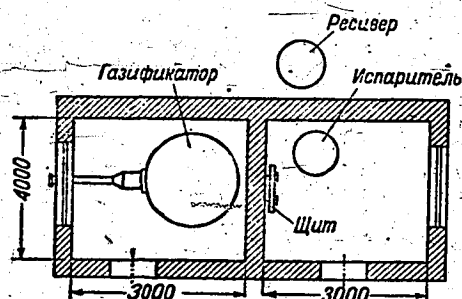
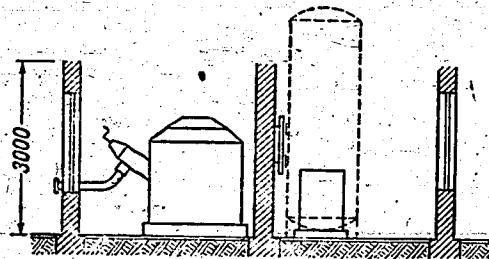


Рис. 6. Планировка помещения для холодного газификатора.

ров, то наружный кислородопровод можно прокладывать по колоннам или стенам зданий без тепловой изоляции или в земле выше

уровня промерзания. Конденсационные горшки на трубопроводе также не ставятся. Стандартной величиной холодного газификатора является ёмкость его на 800 м³ кислорода, что в переводе на жидкий кислород соответствует ёмкости шара в 1000 л. Газификатор, рассчитан на максимальное рабочее давление 15 ат и испытывается гидравлически на 30 ат. При давлении 15 ат он может давать до 150 м³/час газообразного кислорода.

Газификационная установка состоит (рис. 5) из газификатора А, испарителя Б и ресивера В. Газификатор А изготовлен в виде стального шара 1, составленного из двух штампованных полушарий и сваренных по среднему диаметру с помощью электросварки.

Стальной шар служит для восприятия внутреннего давления газа. Для того, чтобы жидкий кислород не соприкасался непосредственно со стальным шаром и не вызывал бы в нём термических напряжений при резком изменении температуры (например, во время заливания жидкого кислорода в газификатор), внутри стального шара находится второй шар 2, изготовленный из тонкой латуни. Этот шар служит резервуаром для жидкого кислорода. Между латунным и стальным шарами имеется небольшой промежуток, сообщающийся с газовым пространством газификатора. Таким образом, латунный шар разгружен от давления и испытывает напряжения только от веса жидкого кислорода. Наполнение газификатора жидким кислородом производится через вентиль 3 и трубу 4 путём перекачки жидкости из транспортного танка, в котором для этого создаётся давление порядка 0,4—0,5 ат.

Из шара газификатора жидкий кислород по трубе 5 поступает в змеевик испарителя Б, а затем в сеть по трубопроводу 6. При необходимости увеличить количество испаряемого кислорода часть газа направляется обратно в газификатор по трубе 7, проходит подогревательный змеевик 8, окружённый жидким кислородом. При этом в газификаторе давление возрастает, и увеличивается подача жидкости в змеевик испарителя Б. От змеевика 8 газ снова поступает во второй змеевик 9 испарителя Б и оттуда идёт в сеть. Для выравнивания колебаний давления в системе к установке приключён через обратный клапан 10 ресивер В ёмкостью 8—10 м³.

Контроль и регулировка работы газификатора осуществляются с помощью щита измерительных приборов 11 и пульта управления 12.

Изготовление газификаторов данной конструкции требует штамповки стальных полушарий с толщиной стенки 18 мм и внутренним диаметром 1250 мм, что может быть осуществлено только на заводах, оборудованных мощными гидравлическими прессами.

Для упрощения изготовления аппарата автором предложена конструкция цилиндрического газификатора секционного типа, схема которого изображена на рис. 7. В этом случае

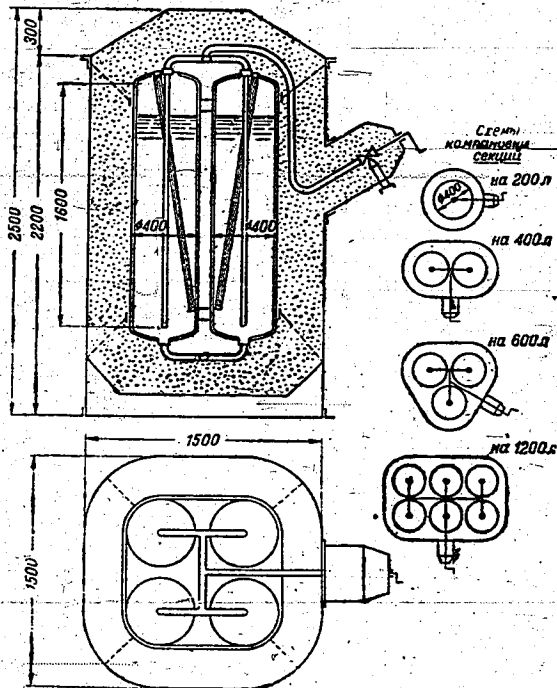


Рис. 7. Схема цилиндрического холодного газификатора секционного типа.

газификатор собирается из нескольких стандартных цилиндрических стальных сосудов, сообщающихся в своей верхней и нижней части с помощью труб. В зависимости от потребности в кислороде можно иметь 2-, 3- и 4-секционную систему. Каждая секция соответствует ёмкости в 200 л жидкого кислорода, или 160 м³ в пересчёте на газ. Процесс изготовления газификатора не требует штамповки полушарий и может быть осуществлён на любом заводе, имеющем котельно-сварочный цех. Изготовление газификатора также упрощается, так как отпадает необходимость выбирать медные полушария, заменяемые вальцовыми цилиндрическими вставками.

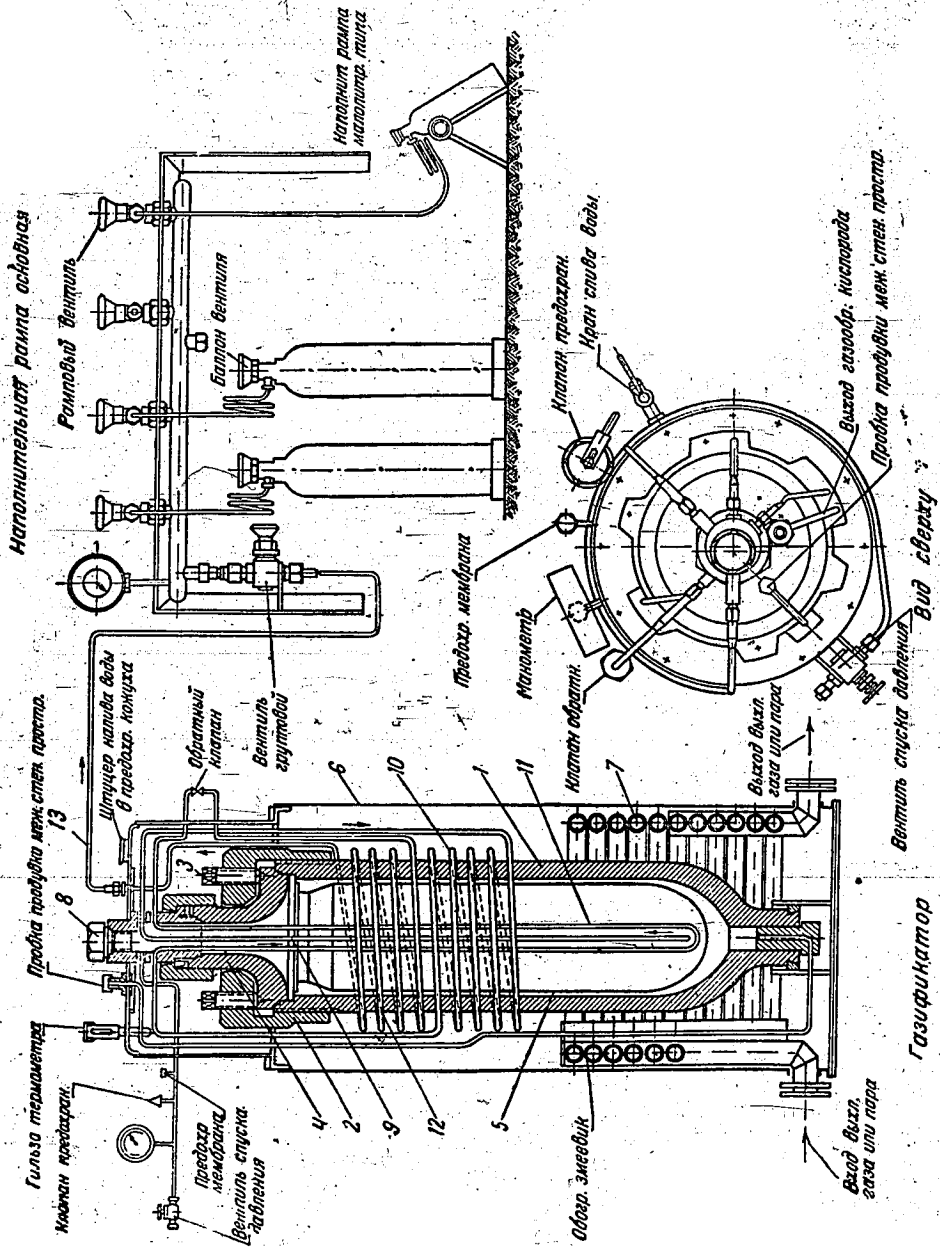


Рис. 8. Газификатор высокого давления.

б) Газификационные установки высокого давления (тёплые газификаторы)

Установки этого типа применяются для наполнения кислородом баллонов при давлении до 150—165 ат. ими пользуются в тех случаях, когда места потребления кислорода для сварки и резки не постоянны, для наполнения баллонов кислородом, используемым для дыхания, и в других случаях, где необходимо иметь кислород в баллонах. Эти установки весьма компактны, но требуют наличия некоторого количества баллонов.

Газификационная установка высокого давления показана на рис. 8. Она состоит из собственно газификатора и дополнительной рампы. Газификатор изготавливается из толстостенного стального баллона 1, закрываемого сверху крышкой 2, в которую ввёрнуты болты 3, прижимающие уплотняющую головку 4. Баллон газификатора рассчитан на рабочее давление 165 ат и испытывается гидравлически на 250 ат. Внутрь баллона помещена тонкостенная латунная вставка 5, в которую вмещается 19,5 л жидкого кислорода.

Газификатор помещается в сосуд 6 с водой, подогреваемой паром, подводимым в змеевик 7. Газификатор может быть установлен на той же автомашине, на которой смонтирован танк для перевозки жидкого кислорода. В этом случае получается транспортная газификационная установка, которая может не только перевозить жидкий кислород, но и, га-

зифицируя его, наполнять баллоны непосредственно на заводах-потребителях. Для подогрева воды газификатора вместо пара используются теплом отработанных газов автомашины. Жидкий кислород заливается в газификатор из танка по гибкому шлангу или из сосуда Дьюара через пробку 8, которая затем плотно завёртывается.

Испаряющийся кислород за счёт притока внешнего тепла создаёт давление в баллоне газификатора, которым жидкость по трубке 9 перекачивается в змеевик 10 испарителя и поступает во внутренний испаритель 11. Этим ускоряется процесс нарастания давления в газификаторе и испарения в нём кислорода. Из испарителя 11 кислород снова выходит в наружный змеевик 12, подогревается в нём и по трубке 13 через обратный клапан идёт в баллоны наполнительной рампы. Одной заливкой газификатора данной ёмкости можно наполнить два 40-литровых кислородных баллона до давления 150—165 ат. Процесс наполнения газификатора и испарения всего кислорода занимает 30—40 мин. Таким образом, один такой газификатор может зарядить кислородом 4 баллона в час, т. е. дать 24 м³/час газобразного кислорода.

Для наполнения малолитражных баллонов имеется отдельная наполнительная рампа. Остаток газа в газификаторе от наполнения первой пары баллонов перепускается в два других баллона, подготавливаемых для последующего наполнения.

О ПРОИЗВОДСТВЕ ТУРБОКОМПРЕССОРОВ В СССР

Инж. В. А. НИКИФОРОВ

Инженер Владимир Александрович Никифоров работает в области турбокомпрессоростроения с 1929 г. Он был главным инженером и главным конструктором завода «Борец», а также работал на других заводах. Тов. Никифоров написал ряд статей по производству турбокомпрессоров, опубликованных в нашей печати в предвоенные годы. В настоящее время он является директором опытного завода турбомашин.

О попытках производства турбокомпрессорных машин упоминается ещё в литературе конца прошлого столетия. Известны, например, работы Парсонса, который в 1897 г. сконструировал турбовоздуховку для подачи 120 м³/мин воздуха с давлением в 1,8 ата,

Однако, началом промышленного производства турбокомпрессоров следует считать первое десятилетие XX в. В это время ряд зарубежных фирм, выпустивших энергетическое оборудование, оценив по достоинству преимущества турбокомпрессорных машин перед порш-