

В.И. Файнштейн

**Кислород,
азот,
аргон –
безопасность
при производстве
и применении**

Москва
«Интермет Инжиниринг»
2008

УДК 661.93
ББК 35.20 (2)
Ф 12

Ф 12 Файнштейн В.И. Кислород, азот, аргон – безопасность при производстве и применении / В.И. Файнштейн. – М.: Интермет Инжиниринг, 2008. – 192 с.: ил.

ISBN 978-5-89594-147-8

Рассмотрены специфические опасности, возникающие при получении продуктов разделения воздуха (кислород, азот, аргон, криптон, ксенон) и при работе с ними, взрывоопасные свойства примесей, а также обстоятельства и причины типичных аварий.

Обсуждены технические, технологические и организационные мероприятия, обеспечивающие безаварийную работу оборудования и безопасность персонала.

Предназначена для специалистов, инженерно-технических работников и рабочих, занятых на производстве продуктов разделения воздуха и предприятиях, использующих эти продукты. Может быть полезна преподавателям и учащимся специальных учебных заведений.

УДК 661.93
ББК 35.20 (2)

V. I. Fainshtein

Oxygen, nitrogen, argon – production and application safety

Specific risks that may arise during recovery of air separation products (oxygen, nitrogen, argon, krypton, xenon) and in the process of working with them, as well as circumstances and causes of typical emergencies occurred are considered in this paper.

Technical, technological and organizational procedures ensuring trouble-free operation of the equipment and safety of the personnel are given.

The book is meant for specialists, engineering technicians and workmen employed at air separation products facilities and the companies using these products, students and teachers of the relevant specialties.

ISBN 978-5-89594-147-8

© Файнштейн В.И., 2008
© Оформление «Интермет
Инжиниринг», 2008

Оглавление

Предисловие	6
Глава 1. Основные опасности при работе на воздухоразделительных установках и применения продуктов разделения воздуха	8
1.1. Общие положения	8
1.2. Основные опасности, обусловленные применением низких температур	8
1.2.1. Влияние низких температур и переохлаждение	8
1.2.2. Особенности применения конструкционных материалов	11
1.2.3. Изоляционные материалы	12
1.3. Газообразный кислород и среды с повышенным содержанием кислорода	13
1.3.1. Общие положения	13
1.3.2. Совместимость материалов с кислородом	14
1.3.3. Пожароопасность	17
1.3.4. Физиологическое влияние кислорода на организм человека	21
1.4. Среда с пониженным содержанием кислорода	21
1.4.1. Пирофорные соединения	21
1.4.2. Физиологическое влияние на организм человека	22
1.5. Предотвращение образования опасных условий при работе с газообразными продуктами разделения воздуха	23
1.5.1. Газоопасные места	23
1.5.2. Дренаж	25
1.5.3. Автогенные работы	27
1.5.4. Продувка трубопроводов	27
1.6. Безопасность при обращении с жидкими криогенными продуктами	28
1.6.1. Общие правила обращения с жидкими криогенными продуктами	28
1.6.2. Особенности обращения с жидким кислородом	31
1.6.3. Особенности обращения с жидким азотом	32
1.7. Особенности обеспечения безопасности на установках безнагревной короткоцикловой адсорбции (КЦА установки)	34
Глава 2. Причины взрывов воздухоразделительных установок	36
2.1. Общие положения	36
2.2. Взрывы в конденсаторах-испарителях	37
Глава 3. Взрывоопасные примеси атмосферного воздуха	47
3.1. Общие положения	47
3.2. Углеводороды	47
3.3. Нормативы содержания примесей в воздухе	49
3.4. Мониторинг загрязненности воздушного бассейна	51

Глава 4. Поведение различных примесей в процессе низкотемпературного разделения воздуха	54
4.1. Общие положения	54
4.2. Взрывоопасные свойства углеводородов	54
4.3. Озон	55
4.4. Электризация жидкого кислорода	56
4.5. Закись азота	57
Глава 5. Накопление опасных примесей в технологических аппаратах	60
5.1. Общие положения	60
5.2. Проточность	63
5.3. Опасности выноса капель жидкого кислорода из конденсаторов-испарителей	63
5.4. Концентрирование примесей в жидком кислороде	64
5.5. Рабочая кампания	66
Глава 6. Средства очистки технологических потоков от опасных примесей	67
6.1 Общие положения	67
6.2. Цеолитовые блоки комплексной очистки воздуха	67
6.3. Адсорбционная очистка жидкого кислорода	70
6.4. Особенности эксплуатации жидкостных адсорберов	76
Глава 7. Особенности накопления взрывоопасных примесей в конденсаторах-испарителях	79
7.1. Общие положения	79
7.2. Гомогенное накопление примесей	80
7.3. Гетерогенное накопление примесей	81
7.4. Гидродинамические условия в парегенерирующих каналах и процесс образования отложений	85
7.5. Первый слив жидкости	89
7.6. Особенности накопления примесей в испарителях жидкого кислорода	90
7.7. Теплые испарители	90
Глава 8. Системы обеспечения взрывобезопасности и принципы их расчета	92
Глава 9. Безопасность при эксплуатации оборудования для получения и очистки редких газов	96
9.1. Особенности обеспечения безопасности при получении криптонового концентрата и сырого криптона	96
9.1.1. Накопление метана	96
9.1.2. Радиационная безопасность	101
9.2. Обеспечение взрывобезопасности при очистке аргона от кислорода	106
Глава 10. Контроль содержания опасных примесей при работе ВРУ. Нормативы	110
10.1. Общие положения	110
10.2. Предельно допустимые содержания примесей в жидком кислороде	111
10.3. Методы определения взрывоопасных примесей	111
Глава 11. Обезжиривание оборудования	119
11.1. Вещества, применяемые для обезжиривания оборудования	119
11.2. Органические растворители	120

11.3. Водные моющие растворы	121
11.4. Технология и правила проведения обезжиривания	123
11.5. Качество обезжиривания	127
11.6. Периодичность обезжиривания	127
11.7. Обеспечение безопасности при обезжиривании	128
11.8. Этиловый спирт	131
Глава 12. Обеспечение безопасности при обращении с аппаратами и сосудами, работающими под давлением	133
12.1. Общие положения	133
12.2. Предохранительные клапаны	134
12.3. Техническое освидетельствование и срок службы	134
12.4. Требования к персоналу, обслуживающему сосуды	136
12.5. Баллоны	137
12.6. Организация безопасной эксплуатации сосудов	143
Глава 13. Обеспечение безопасности при эксплуатации машинного оборудования	144
13.1. Общие положения	144
13.2. Поршневые компрессоры для сжатия воздуха и инертных газов (азот, аргон, криптон, ксенон)	146
13.3. Кислородные поршневые компрессоры	152
13.4. Воздушные и азотные центробежные компрессоры	153
13.5. Кислородные центробежные компрессоры	154
Глава 14. Обеспечение безопасности при ремонте оборудования	157
Глава 15. Организационные основы обеспечения безопасности	164
15.1. Общие положения	164
15.2. Обучение и аттестация персонала	166
15.3. Самоконтроль	169
15.4. Спецодежда	170
15.5. Ликвидация аварий и противоаварийные тренировки	170
15.6. Локализация последствий аварий	170
15.7. Совершенствование нормативной базы	173
15.8. Срок службы оборудования	176
Глава 16. Оказание доврачебной помощи пострадавшим от несчастных случаев	178
16.1. Общие положения	178
16.2. Первая помощь при криогенных обмороживаниях	179
16.3. Первая помощь при поражениях электрическим током	180
16.4. Первая помощь при ранениях	181
16.5. Первая помощь при кровотечениях	182
16.6. Первая помощь при переломах, вывихах, ушибах и растяжении связок	182
16.7. Первая помощь при обмороке, тепловом и солнечном ударах	183
Библиографический список	184
Приложение. Руководящие материалы по безопасности ВРУ	186

Предисловие

Научно-технический прогресс и развитие многих важнейших отраслей промышленности связаны с возрастающим применением кислорода, азота, аргона и других газов, получаемых из атмосферного воздуха. В России и странах СНГ создана широкая сеть воздухоразделительных станций различной производительности. Воздухоразделительные станции – неотъемлемая часть современных металлургических, химических и нефтехимических предприятий.

К середине 1990-х годов в России и странах СНГ работало около десяти тысяч воздухоразделительных установок (ВРУ), в том числе более 300 – производительностью 5–35 тыс. м³/ч по кислороду.

Продукты разделения воздуха (кислород, азот, аргон и другие) в основном получают путем низкотемпературной ректификации атмосферного воздуха. В течение последних 20 лет достаточно широко внедряются установки, на которых кислород и азот получают при нормальных температурах методом короткоциклового безнагревной адсорбции (схемы PSA и VPSA).

Продукты разделения воздуха применяются на сотнях предприятий различных отраслей: в металлургической и химической промышленности, в машиностроении и электронной промышленности, сельском хозяйстве и медицинских учреждениях, космической технике, при научных исследованиях и т. д.

Уже первый опыт производства и применения продуктов разделения воздуха показал их высокую потенциальную опасность, связанную с многочисленными специфическими факторами. Поэтому одновременно с развитием и совершенствованием техники низкотемпературного разделения воздуха и расширением сфер применения полученных продуктов отрабатывались научные основы и технологические приемы, обеспечивающие безопасность работ.

Необходимость выполнения большого комплекса научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ в этой области обусловлена неоднократно происходившими в течение многих лет авариями и взрывами, приводившими к человеческим жертвам и значительным убыткам.

В результате проведенных работ были сформулированы нормативные материалы, регламентирующие безопасность на всех стадиях технологических процессов – от получения продуктов разделения воздуха до их применения.

Основополагающим документом в течение многих лет были «Правила безопасности при производстве и применении продуктов разделения воздуха» (ПБПРВ–88), утвержденные Госгортехнадзором в 1988 году.

Подготовленные ОАО «Криогенмаш» и ОАО «Гипрокислород» и отредактированные большой группой специалистов Госгортехнадзора, металлургической и химической промышленности, эти правила базируются на многолетнем опыте эксплуатации ВРУ и результатах научно-исследовательских, опытно-конструкторских и проектных работ.

В последние годы стали доступны информационные и руководящие материалы по вопросам обеспечения безопасности, подготовленные специалистами ведущих зарубежных компаний, изготавливающих воздухоразделитель-

ные установки, и в частности материалы, выпускаемые Европейской ассоциацией производителей технических газов (EIGA). Анализ этих материалов показывает общность подходов отечественных и зарубежных специалистов к обеспечению безопасности и выполнению действующих норм.

Вопросы, связанные с обеспечением безопасности при производстве и применении продуктов разделения воздуха, в течение последних 7 лет регулярно обсуждаются на международных семинарах, организуемых Украинской ассоциацией производителей технических газов, материалы которых публикуются в журнале «Технические газы».

Безопасность при производстве и применении продуктов разделения воздуха неразрывно связана с технологией. Многие требования, содержащиеся в правилах и в эксплуатационной документации, не очевидны и могут быть поняты только на основе достаточно детальных представлений о протекающих процессах.

В настоящей книге рассмотрен практически весь спектр специфических опасностей, возникающих при производстве продуктов разделения воздуха методом его низкотемпературной ректификации и методом PSA и при их использовании в газообразном и жидком виде, а также мероприятия, выполняемые для предотвращения аварий, взрывов и несчастных случаев.

При создании книги были учтены результаты последних исследований, связанных с обеспечением безопасности эксплуатации воздухоразделительных установок и другого криогенного оборудования, и опыт, накопленный в промышленности, в том числе и по реализации требований правил безопасности.

Представленный материал не следует рассматривать как часть руководства по эксплуатации или как часть инструкции, которые относятся к конкретному типу оборудования. Они должны разрабатываться с учетом конкретных особенностей оборудования, требований действующих документов и накопленного опыта, в том числе обобщенного в данной книге.

Содержание книги во многом определилось тематикой, характером и результатами работ, выполнявшихся автором и коллективами подразделений ВНИИКИмаш, а затем ОАО «Криогенмаш», многие годы изучавшими проблемы обеспечения безопасности при производстве и применении продуктов разделения воздуха и взрывобезопасности воздухоразделительных установок под руководством А.И. Мороза, Г.Ф. Денисенко, Е.В. Вагина, С.С. Петухова, В.Ф. Густова, Н.М. Дыхно, Б.А. Иванова, С.Е. Наркунского.

Неотъемлемой частью этих работ был анализ причин и обстоятельств аварий и несчастных случаев, их обобщение, разработка и внедрение мероприятий по их предотвращению.

Автор выражает благодарность И.Ф. Кузьменко, В.Е. Позняку, В.С. Кортикову, Ю.П. Блазину, Д.И. Масумову, А.С. Розовскому и Е.А. Мельникову, внесшим значительный вклад в развитие работ по рассматриваемой тематике. Обсуждение с ними многих вопросов помогло автору при подготовке рукописи.

Автор признателен руководству ОАО «Криогенмаш» за содействие в работе над материалами книги.

Глава 1. Основные опасности при работе на воздухоразделительных установках и применении продуктов разделения воздуха

1.1. Общие положения

Все многообразие опасностей, встречающихся на воздухоразделительных станциях и при работе с продуктами разделения воздуха, можно условно разделить на две группы: общетехнические и специфические для рассматриваемых производств.

К первой группе относятся опасности, связанные с сосудами, работающими под давлением, электрооборудованием, шумом, работой на высоте, а также в помещениях, где расположены грузоподъемные средства и высокие площадки обслуживания оборудования, движущиеся части машин и ряд других.

Ко второй группе относятся специфические (технологические) факторы и опасности. Большинство из них может проявляться и при применении продуктов разделения воздуха.

Вопросы, связанные с предотвращением поражения персонала общетехническими опасностями, достаточно полно рассмотрены в научной литературе. Поэтому в настоящей книге общетехническим опасностям уделено значительно меньше внимания, чем специфическим.

Перед рассмотрением перечисленных на рис. 1 основных специфических опасностей при производстве и применении продуктов разделения воздуха необходимо обратить внимание на следующие опасные факторы.

1.2. Основные опасности, обусловленные применением низких температур

1.2.1. Влияние низких температур и переохлаждение

Анализ физических характеристик продуктов разделения воздуха, приведенных в табл. 1, показывает, что они имеют весьма низкие температуры кипения. В аппаратах криогенных воздухоразделительных установок все наиболее важные процессы протекают при температурах от -183 до -173 °C ($90-100$ K). В этом же интервале находится и температура жидких криогенных продуктов, выводимых из установок.

Столь низкие температуры обуславливают физиологическую опасность (*возможность обмороживания*) при работе на криогенном оборудовании и с жидкими и газообразными криогенными продуктами.



Рис. 1. Специфические факторы и опасности при производстве и потреблении продуктов разделения воздуха

Таблица 1. Некоторые свойства воздуха и продуктов его разделения

Свойство	Кислород	Азот	Аргон	Криптон	Ксенон	Воздух	Гелий	Неон	Радон
Молекулярная масса	32	28	39,95	83,8	131	29	4	20	222
Температура кипения при атмосферном давлении, К	90,2	77,36	87,3	119,8	165	78,8	4,2	27	208
Температура тройной точки, К	54,4	63,2	83,8	115,8	161,4	—	1,15	24,6	—
Критическая температура, К	154,6	126,3	150,7	209,4	289,8	132,4	5,2	44,4	377,4
Плотность, кг/м ³ : газа при 273 К и атмосферном давлении	1,43	1,25	1,78	3,75	5,90	1,29	0,178	0,9	5,7
жидкости	1136	807	1393	2414	3060	873	125	1205	—
Теплота испарения при температуре кипения, кДж/кг	212	198	161	108	96	201	20/8,5	86	—
Объем, занимаемый газом при испарении 1 л жидкости, дм ³	800	643	780	570	520	675	700	1340	—
Доля газа в воздухе, об. %	20,9	78	0,934	$1,14 \cdot 10^{-6}$	$0,089 \cdot 10^{-6}$	100	$5 \cdot 10^{-4}$	$1,8 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-18}$

Кислород, азот, аргон — безопасность при производстве и применении

Так называемые *холодные ожоги* происходят, когда поверхность тела соприкасается с криогенными жидкостями и газами, находящимися при криогенных температурах, а также с поверхностями (особенно металлическими), ими охлажденными.

Вода, из которой в основном состоит человеческое тело, при низких температурах замерзает, и образующийся при охлаждении лед повреждает и разрушает ткани и кожные покровы. Поражение тела очень напоминает термический ожог. Степень поражения зависит от продолжительности контакта с охлажденными предметами или криогенными жидкостями и ряда других факторов. Недостаточно защищенные части тела при соприкосновении с неизолированными поверхностями, охлажденными до криогенных температур, могут быстро к ним примерзнуть, а при отдергивании возможно значительное повреждение кожного покрова.

Весьма опасна работа с криогенными продуктами во влажных одежде или рукавицах, так как это может привести к обмороживанию.

Первым признаком обмороживания является потеря чувствительности, сопровождающаяся обычно изменением цвета обмороженных участков тела до восковидного и бледно-желтого. После оттаивания обмороженное место становится очень болезненным, на коже появляются пузыри, весьма подверженные инфекции.

Особую чувствительность к низким температурам имеют слизистые оболочки глаз, носа, полости рта и гортани. Поэтому очень опасно вдыхание холодного воздуха, что может привести к серьезным заболеваниям легких.

Также опасным из-за переохлаждения может быть проведение ремонтных работ в неотагретых отсеках блока разделения.

1.2.2. Особенности применения конструкционных материалов

При создании оборудования, работающего в условиях криогенных температур, необходимо уделять особое внимание конструкционным материалам, так как при понижении температуры у многих из них существенно и не в благоприятную сторону изменяются некоторые физикомеханические свойства.

Для широко применяемых конструкционных материалов при понижении температуры такие характеристики, как временное сопротивление, предел текучести, предел усталости, обычно повышаются, но понижаются показатели пластичности и, что самое важное, понижается ударная вязкость. В результате этого у многих металлических материалов при низких температурах появляется склонность к хрупкому разрушению, т. е. разрушению без заметной пластической деформации, так называемое явление *хладноломкости*. К таким материалам относятся углеродистые и низколегированные стали, у которых ударная вязкость при понижении температуры снижается настолько, что применение сталей этой группы при температурах ниже 230 К недопустимо.

Серьезные опасности могут возникать при охлаждении трубопроводов или арматуры, изготовленных из углеродистых или низколегированных сталей, во время нештатных ситуаций в местах, где при нормальном протекании процесса должны поддерживаться положительные температуры (теплые концы теплообменной аппаратуры, трубопроводы и арматура после испарителей жидких криогенных продуктов и т. п.).

Для среднелегированных мартенситных сталей типа 0Н9 и высоколегированных сталей аустенитного класса типа Х18Н10, являющихся основными конструкционными материалами в криогенной технике, характерны достаточно высокие показатели вязкости и пластичности при низких температурах. В то же время их прочностные характеристики подчиняются тем же закономерностям, что и у углеродистых низколегированных сталей. Однако при этом показатели пластичности снижаются с понижением температуры в значительно меньшей степени, чем у низколегированных сталей, и остаются достаточными для обеспечения их надежной работы вплоть до гелиевых температур.

В последние годы все шире используются аустенитные стали, упрочненные азотом (в России – сталь 03Х19АГЗН10, в США – AISI 304LN), что позволяет уменьшить металлоемкость работающих в криогенных условиях основных несущих элементов на 30% по сравнению с металлоемкостью элементов из сталей типа Х18Н10.

Особенно хрупкими при криогенных температурах становятся пластмассы. Исключение составляют фторопласты, которые достаточно широко применяются при криогенных температурах в качестве уплотнительных и прокладочных материалов.

Следует отметить, что фторопласты обладают хорошей совместимостью в контакте с жидким и газообразным кислородом.

1.2.3. Изоляционные материалы

Использование в оборудовании изоляционных материалов связано с рядом опасностей.

Минеральная (шлаковая) вата – длительное время была основным изоляционным материалом на воздухоразделительных установках. Она состоит из очень тонких стеклоподобных волокон. При контакте минеральной ваты или ее пыли с кожными покровами и слизистыми оболочками (органы дыхания и зрения) появляется длительное раздражение, возможны аллергические явления. Меры безопасности при ремонтных работах на блоках с минеральной ватой рассмотрены в главе 14.

Песок перлитовый вспученный (далее перлит) – основной изоляционный материал, используемый в крупных и средних воздухоразделительных установках. Представляет собой мелкий порошок диаметром частиц около 0,2–1,25 мм с преобладанием мелких частиц. Перлит относится к сыпучим материалам, имеющим большое сцепление между частицами. Угол откоса

перлита, соответствующего требованиям технических условий, составляет около 45°. Физические характеристики перлита в значительной степени зависят от его влажности и технологии загрузки в блок разделения. Поэтому крайне важным является безусловное выполнение указаний изготовителя по технологии загрузки, выгрузки и хранения перлита.

По воздействию на организм человека перлит относится к умеренно опасным веществам (3 класс опасности по ГОСТ 12.1.005).

При контакте со слизистыми оболочками возможны раздражения и аллергические явления.

Человек, попав в массу перлита, может утонуть и задохнуться.

Серьезные опасности могут возникать при осыпании перлита в отсеках, где проводятся ремонтные работы, и при осыпании перлита в незаполненные изоляцией объемы во внутриблочном пространстве. Последнее может приводить к разрушению кожуха блока разделения и выбросам перлита за пределы установки.

Весьма опасна продолжительная работа установок с газовыми или жидкостными утечками во внутриблочном пространстве, заполненном перлитом. Такие утечки приводят к интенсивному истиранию перлита и могут сопровождаться интенсивным абразивным истиранием стенок близлежащих аппаратов, арматуры и трубопроводов вплоть до их разрушения.

При эксплуатации изолированных перлитом установок обязательными являются наддув сухим газом внутриблочного пространства, контроль расхода газа, необходимого для поддержания заданного давления, и исправное состояние средств, препятствующих повышению давления во внутриблочном пространстве (предохранительные мембраны, регуляторы давления).

Меры безопасности при ремонтных работах блоков, изолированных перлитом, рассмотрены в главе 14.

1.3. Газообразный кислород и среды с повышенным содержанием кислорода

1.3.1. Общие положения

Сами по себе ни газообразный, ни жидкий кислород не являются ни пожароопасными, ни взрывоопасными, ни токсичными. Однако кислород очень сильный окислитель. В среде кислорода и в газовых смесях с повышенным по сравнению с воздухом содержанием кислорода интенсивно горят большинство материалов, в том числе металлы. Поэтому работа с кислородом представляет особую опасность.

Принципиально: чтобы произошло загорание или взрыв, необходимо горючее вещество (топливо), окислитель и инициатор, обеспечивающий энергию, требуемую для воспламенения.

В обычных промышленных системах нельзя полностью исключить всевозможные инициаторы, а количество окислителя в кислородных системах всегда достаточно для зажигания и последующего горения материалов.

Таким образом, загорания, пожары и взрывы в системах с повышенным содержанием кислорода могут быть полностью исключены только в тех случаях, когда горючие вещества присутствуют в количествах, при которых исключается распространение горения. Поэтому при работе с кислородом и кислородсодержащими средами первостепенное внимание уделяют подбору материалов.

Возможность горения материалов указывает только на потенциальную опасность их контакта с кислородсодержащими средами. Для оценки реальной опасности необходимо рассматривать последствия, которые могут возникнуть в случае загорания.

Работа с кислородсодержащими средами в конкретных условиях допустима, если возможность загораний полностью исключена или если вероятность загораний не исключена, но принятые меры обеспечивают безопасность персонала и контролируемый материальный ущерб.

Рассмотрение и оценка таких опасностей должны осуществляться в процессе проектирования систем, работающих с повышенным содержанием кислорода, и производств, в которые входят такие системы.

1.3.2. Совместимость материалов с кислородом

В связи с высокой химической активностью кислород способен окислять большинство известных веществ и материалов. В зависимости от условий (давления и температуры), а также агрегатного состояния материалов (газы, жидкости, порошки, монолитные тела и т. п.) их окисление происходит с различной скоростью. При определенных для каждого материала условиях окисление может протекать в виде горения или взрыва с выделением значительных количеств энергии.

Наиболее подробно вопросы, связанные с совместимостью материалов с кислородом, рассмотрены в работе [1].

Большое количество энергии, выделяющейся при горении металлов, является основной причиной серьезных последствий, возникающих при загораниях в кислородных средах.

В процессах воспламенения материалов в среде кислорода решающую роль обычно играют загрязняющие вещества, например масла, находящиеся на поверхности конструктивных элементов и имеющие значительно меньшую энергию зажигания. Эти вещества воспламеняются в первую очередь и затем могут инициировать зажигание металла.

Известно очень много загораний, причиной которых были либо несовместимость использованных материалов с кислородом, либо накопление в изделии загрязняющих веществ.

Возможность загорания материалов в контакте с кислородом резко возрастает при повышении давления и температуры, причем загорание одних материалов может инициировать загорание других. Наиболее опасно загорание материалов, если при этом имеются условия для самоподдерживающегося горения, которое продолжается до тех пор, пока не выгорит весь материал или не изменятся в определенной степени условия горения (снизится давление, уменьшится концентрация кислорода).

Исследования показали, что основным параметром, определяющим возможность самоподдерживающегося горения при заданной концентрации кислорода, является давление. Чем выше давление кислорода, тем система становится потенциально опаснее и требует более внимательного отношения, как к возможности зажигания, так и к возможным последствиям воспламенения.

Введено понятие *предельного давления*, выше которого материал способен к самоподдерживающемуся горению. При меньших давлениях после зажигания материала и прекращения действия источника зажигания происходит затухание горения.

Для определенного материала величина предельного давления зависит от температуры, скорости потока и концентрации кислорода, от конструктивных особенностей применения материала и свойств контактирующих с ним веществ.

Влияние скорости потока окислителя на процесс горения: вначале с повышением скорости возрастают температура и тепловыделение, а затем температура может начать снижаться и иногда может происходить даже прекращение горения.

Не менее важной характеристикой процесса загорания материалов является *энергия зажигания*, т. е. наименьшая энергия, которую необходимо сообщить материалу для его зажигания. Величина этой энергии в значительной степени зависит от конкретных условий. Поэтому при сравнении материалов пользуются данными об энергии их зажигания, полученными в определенных (стандартных) условиях.

Диапазон изменения значений энергии зажигания для различных материалов при давлениях от $9,8 \cdot 10^4$ до $14,7 \cdot 10^6$ Па характеризуется следующими данными, Дж:

Металлы	400–3000
Пленки масел	0,11
Пары масел	$(0,03–0,075) \cdot 10^{-3}$
Неметаллические материалы (прокладочные, уплотнительные и т. п.)	0,0425

Таким образом, наиболее слабыми в пожароопасном отношении элементами конструкции оборудования являются детали из различных неметаллических материалов и металлические детали, загрязненные маслами.

В связи с этим один из основных принципов обеспечения безопасности кислородного оборудования состоит в исключении присутствия на поверхностях контактирующих с кислородсодержащими средами жировых отложений в количествах, при которых возможно горение этих отложений.

Внутренние поверхности оборудования могут быть загрязнены маслоподобными веществами в результате:

неудовлетворительного удаления антикоррозионных и других покрытий, использовавшихся при консервации;

неудовлетворительного удаления различных эмульсий и масел, использовавшихся при изготовлении деталей и узлов;

случайного загрязнения при монтажных и сборочных работах;

накопления загрязнений внутри оборудования при его работе.

Последнее, например, может происходить в воздухоразделительных установках, перерабатывающих воздух, загрязненный маслом в поршневых компрессорах или в детандерах, а также в резервуарах и испарителях, работающих на жидком кислороде, загрязненном маслом.

Удаление масляных загрязнений обеспечивается обезжириванием, которое проводится после окончания сборочных, монтажных и ремонтных работ, а также в необходимых случаях в процессе эксплуатации оборудования (см. главу 11).

Нормативы на содержание жировых отложений в кислородном оборудовании регламентированы ГОСТ 12.2.052–81 и СТП-2082-594–2004. Эти нормативы разработаны исходя из результатов экспериментальных работ по определению минимальных толщин слоев различных масел, по которым может распространяться горение или возможна детонация.

Неоднократно причиной аварий арматуры и другого оборудования, работающего с кислородом, было применение горючих смазочных материалов, герметиков и прокладочных материалов, воспламенение которых приводило к зажиганию металлических деталей.

Разработанные специализированными организациями совместно с ОАО «Криогенмаш» кислородостойкие смазки, герметики и прокладочные материалы безопасно работают в среде кислорода в широком диапазоне давлений и температур.

Применение материалов в контакте с газообразным кислородом регламентировано ГОСТ 12.2.052–81 «Система стандартов безопасности труда. Оборудование, работающее с газообразным кислородом. Общие требования безопасности». Стандартом предусмотрены три группы условий применения материалов:

группа А — условия, при которых материал неспособен к горению;

группа Б — условия, при которых материал может гореть и при его применении имеется определенная вероятность загорания;

группа В – условия, при которых материал может гореть, однако опыт эксплуатации этих материалов в конкретных видах оборудования показал их достаточно надежную работу.

Выбор материалов согласно стандарту осуществляется разработчиком оборудования. Замена материала деталей или смазок при ремонте и обслуживании оборудования допускается только по согласованию с заводом-изготовителем.

В тех случаях, когда в оборудовании применяются материалы в условиях группы Б, разработчиком должны быть рассмотрены возможные последствия загораний и приняты меры, исключающие поражение персонала и нанесение значительного материального ущерба.

Следует отметить, что подбор материалов для работы в среде кислорода не может быть проведен исходя только из логических соображений, а возможен лишь на основе исследований процесса их горения в кислороде в рассматриваемых условиях.

Например, по данным о высокой коррозионной стойкости титана можно было бы предположить, что изделия из него допустимо применять в кислородных средах. Однако это далеко не так. Исследования показали, что титан сравнительно легко поджигается в газообразном кислороде в широком интервале давлений и температур. Это подтверждается и рядом серьезных аварий, вызванных применением арматуры из титана на кислородопроводах.

Очень важным для предотвращения загораний кислородного оборудования является обеспечение чистоты внутренних поверхностей трубопроводов и аппаратов, контактирующих с кислородом. Наряду с обезжириванием, рассмотренным в главе 11, необходима надлежащая очистка кислородного оборудования и трубопроводов от пыли, сварочного грата и любых посторонних предметов после проведения монтажных и ремонтных работ.

Необходимо обратить внимание на то, что при загорании кислородопроводов процесс горения продолжается до тех пор, пока не прекращается поступление кислорода к месту горения. В таких случаях вследствие весьма высоких температур повреждаются расположенное вблизи оборудование и трубопроводы, что приводит к весьма тяжелым последствиям. Исключение подобных аварий возможно только при безусловном выполнении требований «Правил безопасности при производстве и потреблении продуктов разделения воздуха» (ПБ 11-544-03) и стандарта «Оборудование, работающее с газообразным кислородом. Общие требования безопасности» (ГОСТ 12.2.052-81), а также соответствующих указаний разработчика оборудования.

1.3.3. Пожароопасность

Наибольшая опасность для персонала при работе с кислородом возникает при попадании кислорода в помещение, где работают люди. В этом случае

кислород заполняет поры тканей, как бы пропитывает одежду, и она долго остается легко воспламеняемой. Загорание одежды может произойти от искры, папиросы, от разряда статического электричества, возникающего при трении одежды из синтетических материалов, шерсти и шелка.

Скорость горения одежды в атмосфере, обогащенной кислородом, весьма велика. Так, если при содержании кислорода в воздухе 21% загорание хлопчатобумажной материи при соприкосновении с нагретой электрической спиралью происходит через 10 с, то при увеличении содержания кислорода до 30% загорание происходит через 3 с.

Возможны также случаи воспламенения волос, пропитанных кислородом, при их расчесывании в связи с возникновением при этом разрядов статического электричества. (Во всяком случае, этим можно объяснить один несчастный случай, произошедший с рабочим во время протирки спиртом кислородной цистерны. Перед возникновением пожара он расчесывал волосы.)

Опасность воспламенения одежды значительно возрастает в тех случаях, когда *огневые работы* проводят в местах, где возможно повышенное содержание кислорода.

Известны также случаи воспламенения пропитанной кислородом одежды от искр, возникающих от ударов и трения металлических предметов, подкованных сапог. Немало несчастных случаев произошло при курении и зажигании спичек в недозволенных местах.

Во время одного несчастного случая при выполнении огневых ремонтных работ содержание кислорода в воздухе достигло 35% (анализ перед началом работ не был сделан). От попадания искры вспыхнула брезентовая одежда на газосварщике. Одежда остальных рабочих, пытавшихся оказать помощь пострадавшему, также вспыхнула, нанеся им тяжелые ожоги.

В случае аварийного попадания в помещения цеха значительных количеств жидкого или газообразного кислорода при концентрации его в воздухе более 23% необходимо срочно отключить электрооборудование и включить аварийную вентиляцию, а затем покинуть помещение. Продолжение работ в помещении допустимо только после снижения концентрации кислорода в воздухе до нормы.

Следует обратить внимание на безусловную необходимость тщательного тушения предметов, случайно загоревшихся при проведении огневых работ или начавших тлеть. Это связано с тем, что при последующем повышении концентрации кислорода в атмосфере даже слаботлеющие предметы (бумага, дерево, ткани и тому подобное) способны вновь воспламеняться.

Плотность кислорода и кислородсодержащих смесей существенно выше плотности воздуха, и в случае утечек они накапливаются в наиболее низких местах, траншеях, приямах и т. п. Поэтому огневые и другие ра-

боты могут проводиться только после определения содержания кислорода в месте выполнения работ.

Вопросы обеспечения пожарной безопасности при работах в кислородсодержащих средах достаточно подробно изложены в работах [14, 15], где также содержатся рекомендации по предотвращению загораний медицинских барокамер и сравнительные данные по скорости распространения горения различных тканей в кислородных средах.

Например, в работе А.С. Мелихова [14] приведены следующие данные о ресурсе времени при кислородных загораниях (табл. 2).

Отмечено, что тушение загораний и пожаров в средах, обогащенных кислородом, значительно усложняется. Во-первых, это обуславливается невозможностью применения большинства спецсредств, кроме воды и инертных газов, расход которых возрастает в 2–3 раза. Во-вторых, в кислородсодержащих средах резко уменьшается время, необходимое для того, чтобы после загорания потушить одежду без опасных для человека ожогов.

В тех случаях, когда при повышенных содержаниях кислорода произошло загорание одежды, пострадавшего следует немедленно окунуть в воду или сорвать с него одежду. Необходимые для этого ванны или душевые устройства согласно нормативам должны быть во всех помещениях, где возможно повышение концентрации кислорода в воздухе.

Нельзя до прекращения горения закутывать пострадавшего, так как доступ кислорода к горячей одежде при этом не прекратится.

Учитывая изложенное, обслуживающему персоналу, включая и лаборантов, которым даже временно приходится находиться в атмосфере, обогащенной кислородом, следует носить хлопчатобумажную одежду и белье.

После пребывания в атмосфере, обогащенной кислородом, запрещается в течение 20–30 мин подходить к открытому огню, электроплиткам, курить и зажигать спички.

Таблица 2. Ресурс времени при загораниях

Объемная доля кислорода, %	Время, с, с момента загорания, после которого возможна	
	потеря трудоспособности (ожог 3% поверхности тела)	смертельная опасность (ожог 25% поверхности тела)
20	40/47	66/81
25	31/36	47/54
30	18/23	32/46
40	10/12	16/23

Примечание. В числителе при плотности ткани 140 г/м³, в знаменателе при 280 г/м³.



Рис. 2. Мероприятия, выполняемые для обеспечения взрывопожаробезопасности кислородного оборудования

Оборудование, работающее с кислородом или смесями, обогащенными кислородом, необходимо немедленно остановить (вывести из эксплуатации) в следующих случаях:

- параметры среды (давление, температура, концентрация кислорода) превысили максимально допустимые;
- давление среды меньше минимально допустимого;
- неисправны или отсутствуют предохранительные устройства, предусмотренные проектами оборудования и производства;
- возникновение на объекте аварийных ситуаций, загораний и тому подобное;
- содержание кислорода в помещении вышло из допустимого предела (19–23%).

Мероприятия, выполняемые для обеспечения взрыво- и пожаробезопасности кислородного оборудования, представлены на рис. 2.

1.3.4. Физиологическое влияние кислорода на организм человека

Как показали исследования, нормальное состояние человека и его работоспособность сохраняются в интервале изменения парциального давления кислорода во вдыхаемом воздухе от 10,66 до 42,66 кПа. При нормальном атмосферном давлении (98 кПа), обычном парциальном давлении водяных паров (6,27 кПа) и парциальном давлении диоксида углерода (5,33 кПа) объемная доля кислорода в легких находится на уровне не менее 16,85%. Если во вдыхаемом воздухе содержание кислорода будет ниже 16,8%, то возможно возникновение опасной ситуации, которая в зависимости от ее продолжительности и индивидуальных особенностей человека может привести к головокружению или даже потере сознания.

Длительное нахождение человека при концентрации кислорода более 50,0% приводит к кислородному отравлению, которое может отрицательно сказываться на органах дыхания и центральной нервной системе.

Отрицательное влияние повышения парциального давления других составляющих во вдыхаемом воздухе начинает сказываться при общем давлении в несколько сотен килопаскалей.

1.4. Среды с пониженным содержанием кислорода

1.4.1. Пирофорные соединения

Одна из специфических опасностей сред с пониженным содержанием кислорода заключается в возможности образования в них так называемых *пирофорных* соединений, которые могут самопроизвольно возгораться при повышении содержания кислорода. Наиболее благоприятные условия для таких процессов могут возникать, например, в поршневых, смазываемых маслом компрессорах, компримирующих чистый азот (содержание 5–10 млн⁻¹ кислорода). Если в работающий в таких условиях компрессор подать грязный азот (содержание кислорода 100 млн⁻¹ и более), то может происходить

интенсивное окисление находящихся в компрессоре масла и нагара, сопровождающееся воспламенением, а иногда и взрывом.

В связи с этим у потребителей, использующих инертные газы с малым содержанием кислорода (5 млн^{-1} и менее), или на воздухоразделительных станциях, подающих такие газы потребителям, целесообразно устанавливать специальные устройства, предотвращающие попадание к потребителю газа с повышенными концентрациями кислорода, в случаях повышения содержания кислорода в газе в результате нарушений технологического режима воздухоразделительной установки или в аварийных ситуациях. Рекомендации по проектированию таких систем разработаны ОАО «Гипрокислород».

Известен случай воспламенения деревянной опалубки, находившейся в отсеке клапанных коробок азотных регенераторов, где обычно снижено содержание кислорода. Загорание произошло вследствие утечки кислорода вблизи указанного отсека. Загорания графитовых колец при разборке насосов жидкого аргона также объясняются пирофорными свойствами графита при его длительной работе в средах, обедненных кислородом.

Для предотвращения загораний, связанных с пирофорными свойствами материалов, переход оборудования от работы с глубоко очищенными от кислорода продуктами разделения воздуха (содержание кислорода менее 10 млн^{-1}) к заполнению воздухом или газами с более высоким содержанием кислорода должен выполняться достаточно медленно. При этом скорость повышения содержания кислорода, особенно в интервале от долей до десятков млн^{-1} , должна быть как можно меньше.

1.4.2. Физиологическое влияние на организм человека

При нормальном атмосферном давлении увеличение содержания во вдыхаемом воздухе азота и аргона неблагоприятно сказывается только в результате соответствующего уменьшения содержания кислорода. Такое понижение концентрации кислорода в воздухе весьма опасно и может быть обусловлено натеканием азота и аргона. Степень негативного воздействия недостатка кислорода на человека (асфиксия) зависит от содержания кислорода во вдыхаемом воздухе и продолжительности нахождения человека в таких условиях.

При нахождении человека в атмосфере с пониженным содержанием кислорода различают несколько степеней поражения. При содержании кислорода в воздухе от 19 до 14% начинают появляться первые, подчас едва заметные признаки уменьшения содержания кислорода в крови. Дыхание становится более глубоким, пульс учащается. Наблюдается ослабление внимания и ясности сознания, а также некоторое нарушение мускульной координации. По мере увеличения времени пребывания в таких условиях негативные явления нарастают.

При содержании кислорода от 14 до 10% возможна потеря сознания, нарушаются правильность суждений и чувствительность. Иногда теряется чувство боли. Наблюдаются быстрая утомляемость и чувство недомогания.

При содержании кислорода от 10 до 6% могут появиться тошнота и рвота, теряется способность производить значительные мускульные усилия. До наступления этой стадии, а иногда и во время нее пострадавший не осознает опасности положения. После этого теряется способность ходить, стоять и даже ползти.

Характерно, что все указанное выше происходит совершенно безболезненно. Если пострадавший в таком состоянии оказывается в атмосфере с нормальным содержанием кислорода, то возможно оживление. Однако при этом часто остаются необратимые мозговые расстройства.

При содержании кислорода во вдыхаемом воздухе менее 6% наблюдается прерывистое дыхание со все более продолжительными остановками, появляются конвульсивные движения. Затем дыхание прекращается, однако сердце после этого может биться еще несколько минут.

При вдыхании в течение короткого времени чистого азота (аргона) человек теряет сознание и падает. Если при этом он продолжает находиться в атмосфере азота (аргона), то наступает смерть.

Пострадавшего от недостатка кислорода необходимо немедленно удалить из зоны с пониженным содержанием кислорода и сразу же до оказания специализированной медицинской помощи начать делать искусственное дыхание, удалив предварительно одежду, стесняющую или затрудняющую дыхание, по возможности надеть ему кислородную маску.

1.5. Предотвращение образования опасных условий при работе с газообразными продуктами разделения воздуха

1.5.1. Газоопасные места

Плотность продуктов разделения воздуха даже при комнатной температуре значительно отличается от плотности воздуха (см. табл. 1). Поэтому кислород и аргон, как более тяжелые газы, при утечках из оборудования в помещении накапливаются в траншеях, каналах и колодцах, образуя там опасные среды с ненормальным содержанием кислорода.

Наиболее опасные условия могут возникать при утечках газов в подвальные помещения и проходные тоннели, по которым проложены трубопроводы, транспортирующие кислород или аргон.

Серьезные опасности могут возникать в результате работы кислородных и азотных компрессоров с пропусками в промежуточных охладителях, так как в этом случае охлаждающая вода насыщается компримруемым газом, который затем выделяется из воды в сливных трубопроводах, накапливается в канализационных колодцах и может далее перетекать в другие связанные с ними каналы.

При наличии утечек азота или аргона в закрытых невентилируемых помещениях концентрация кислорода постепенно понижается и выравнивается по всему помещению. Поэтому даже кратковременный вход в такие помещения становится опасным.

Не менее опасно может быть натекание кислорода или других газов через неплотности арматуры в отключенные аппараты и установки или машины. Постепенно вытесняя находящийся в коммуникациях воздух, кислород заполняет в оборудовании полости, расположенные ниже отводов арматуры, предназначенной для сброса среды в атмосферу (аналогично ведет себя и аргон). Поэтому перед проведением любых работ на оборудовании, подключенном к коллекторам, в которые подаются газы с других установок, на отсекающей арматуре необходимо устанавливать заглушки, а затем продувать оборудование воздухом.

В тех случаях, когда оборудование остановлено в резерв, заглушки на коммуникациях не устанавливаются. Однако в таких случаях необходимо после остановки агрегатов проверять плотность закрытия отсекающих и анализных вентилях и другой арматуры, через которую газ из внутренних полостей может попасть в атмосферу, и обеспечивать их закрытое положение в течение всего периода стоянки в резерве.

При остановках воздуходелительных агрегатов также необходимо, как показывает негативный опыт, тщательно проверять плотность закрытия арматуры на потоках газов, сбрасываемых из регенераторов в атмосферу через подземные глушители, так как при продолжительном заполнении кислородом таких устройств в районе их размещения могут образовываться зоны с повышенным содержанием кислорода.

В связи с этим необходимо постоянно следить за наличием и состоянием надписей, предупреждающих об опасности в районах подземных испарителей и других местах на открытом воздухе, где возможно изменение состава воздуха, и исключать возможность стоянки в таких местах автотранспорта.

Следует отметить, что неоднократно происходили несчастные случаи в результате асфиксии или загорания при входе персонала в траншеи, каналы и канализационные колодцы, в резервуары, а также в закрытые невентилируемые помещения, где находились сосуды Дьюара с жидкими криогенными продуктами, и при работе в них.

Такие случаи практически всегда были обусловлены только тем, что перед входом в опасные места не проводился анализ воздуха.

При этом, как правило, оказать пострадавшим своевременную необходимую помощь крайне тяжело, так как подготовка и экипировка спасателей требуют достаточно много времени.

Спасательные работы, выполняемые без соответствующей подготовки и экипировки, неоднократно приводили к несчастным случаям со спасателями.

В связи с серьезными опасностями, возникающими при изменении содержания кислорода в воздухе, на каждом предприятии, производящем и применяющем продукты разделения воздуха, должен быть составлен перечень газоопасных помещений и мест. В этом перечне регламентируется контроль за содержанием кислорода в воздухе в газоопасных местах и определяются меры по нормализации состава воздуха.

Все помещения, включаемые в указанный перечень, должны быть оборудованы знаками опасности по ГОСТ 12.4.026–76. Все работы в помещениях и местах повышенной опасности могут выполняться только по наряду-допуску.

1.5.2. Дренаж

Сравнительно узкие границы безопасных для людей и пожаробезопасных содержаний кислорода в воздухе обуславливают необходимость постоянного внимания к условиям, в которых производится сброс в атмосферу (дренаж) кислорода и инертных газов. Такой сброс в атмосферу производится из воздухоразделительных установок при пуске и остановке, регенерации адсорберов, частичных отогревах, а также при пуске и остановке кислородных и азотных компрессоров, заполнении резервуаров жидкими криогенными продуктами и снижении в них давления, при хранении жидких криогенных продуктов в сосудах Дьюара. Во многих случаях сброс этих газов производится непрерывно (например, сброс азота на установках, получающих только кислород, сброс кислорода после теплых испарителей и т. п.).

Неудачная организация дренажа кислорода и азота в атмосферу может приводить к тому, что в приземном слое или в зоне аэродинамической тени зданий, в зонах забора воздуха на вентиляционные устройства и вблизи оконных форточек и фрамуг, а затем и в помещениях концентрации кислорода или азота достигнут предельных для безопасности для персонала или пожаробезопасности значений.

Известен, например, случай, когда причиной продолжительных жалоб персонала кислородной установки на неудовлетворительное самочувствие во время работы оказалось неудачное выполнение азотного дренажного устройства, в результате чего концентрация кислорода в пультовом помещении снижалась иногда до 16–17%. Известны также случаи, когда неудовлетворительная организация дренажа кислорода приводила к загоранию людей при проведении огневых работ и при курении в местах, где это не было запрещено.

В качестве предельных концентраций, как уже отмечалось, должны быть приняты следующие значения кислорода: не более 23 и не менее 19%. Избыточная концентрация компонентов в воздухе не должна превышать 2% по отношению к нормальной.

Изменение концентрации компонентов в определенном объеме газа при введении в него одного из компонентов определяется процессом

диффузии, осложненной гравитационной и тепловой конвекцией, и турбулентным перемешиванием потока.

Расчет таких процессов регламентирован выпущенным Госкомгидрометом нормативным материалом «Методика расчета концентраций в атмосферном воздухе вредных веществ, содержащихся в выбросах промышленных предприятий».

Согласно этим нормам по высоте выброса над уровнем земли (H) различают выбросы высокие ($H > 2,5$ высоты здания или установки) и затененные ($H < 2,5$ высоты здания или установки). По температуре выбрасываемой в атмосферу смеси различают:

горячие выбросы при $T_{\text{выб}} > T_{\text{окр.среды}}$

холодные выбросы $T_{\text{выб}} < T_{\text{окр.среды}}$

Исходя из этого, выбросы газообразных криогенных продуктов могут быть, как правило, квалифицированы как затененные, холодные, точечные.

Следует заметить, что наиболее безопасным является сброс газов за пределы аэродинамической тени зданий. Номограммы для расчета координат аэродинамической тени зданий приведены в научной литературе.

Имеется также выпущенное Гипрокислородом совместно с Институтом охраны труда (ВНИИ ОТ) «Руководство по расчету и устройству выбросов азота и кислорода в цехах производств продуктов разделения воздуха» (РП2–77). В этом документе для многих конкретных случаев регламентированы условия безопасного дренажа кислорода и азота – минимальная высота от земли и диаметр дренажных труб.

Серьезные опасности могут возникать, когда в системе коммуникаций компрессора предусмотрена возможность подать на вход воздушного компрессора или на наполнительные (раздаточные) рампы различные газы, например кислород и азот.

В этом случае даже при относительно небольших пропусках в арматуре возможно недопустимое загрязнение газа, подаваемого потребителю или закачиваемого в баллоны, что может привести к весьма тяжелым последствиям. Поэтому на таких соединениях необходимо устанавливать заглушки, извлекаемые только при изменении схемы. Установка последовательно двух вентилей с продувочным вентилем между ними также надежно исключает возможность перетока газа через арматуру.

В этой связи следует обратить внимание на взрыв, произошедший в компрессоре при следующих обстоятельствах.

В связи с большой производительностью воздушодувки, используемой для подачи воздуха для регенерации сорбента в блоке осушки кислорода, избыток воздуха направлялся на вход воздушного компрессора с целью наддува и повышения его производительности. Такая схема проработала более 5 лет. В результате появления неплотности в арматуре блока осушки кислород по коммуникациям наддува попал в смазываемый маслом воздушный компрессор.

Это привело к взрывам в цилиндрах первой и второй ступени и к полному разрушению компрессора.

1.5.3. Автогенные работы

Наиболее широко кислород применяют при автогенных работах (сварка и резка металлов). Такие работы в помещении ограниченного объема могут приводить к неблагоприятному изменению состава воздуха.

Наиболее серьезные опасности возникают при выполнении таких работ внутри трубопроводов, клапанных коробок и крупногабаритной арматуры.

В связи с этим безусловно необходима организация вентиляции в помещениях и отсеках, где проводятся автогенные работы, которая компенсировала бы уменьшение содержания кислорода при сварке или его увеличение при резке металла, а также обеспечивала вывод образующихся опасных газов.

1.5.4. Продувка трубопроводов

Непременным условием надежной и безопасной работы кислородного оборудования и кислородопроводов является их обязательная продувка инертным газом или не содержащим масло воздухом, которая должна проводиться перед первым включением в работу после окончания монтажных работ и после ремонтов.

Особенно важно это для трубопроводов, соединяющих установку и кислородные компрессоры с оборудованием потребителей.

Известно несколько крупных аварий, сопровождавшихся выгоранием 10–20 м кислородопроводов и арматуры, происшедших при первой подаче через них кислорода потребителю. Во всех случаях надлежащая продувка кислородопроводов перед первым включением в работу не производилась.

Продувка должна производиться по специальной инструкции, утвержденной руководством предприятия и согласованной с организацией, проектировавшей трубопроводы. Рабочая схема продувки должна быть тщательно продумана и должна обеспечивать удаление остатков от монтажных работ, сварочного грата и других посторонних частиц и предметов из всех участков трубопровода, расположенных до и после арматуры на выходе из установки или из кислородного компрессора.

Продувку трубопроводов следует проводить при скоростях газа в трубопроводах, в несколько раз превышающих рабочие скорости кислорода. При этом в процессе продувки целесообразно неоднократно закрывать арматуру на выходе продувочного газа в атмосферу, а затем резко полностью ее открывать.

1.6. Безопасность при обращении с жидкими криогенными продуктами

1.6.1. Общие правила обращения с жидкими криогенными продуктами

Как следует из табл. 2, жидкие криогенные продукты (жидкие кислород, азот, аргон) имеют очень низкую температуру кипения (при атмосферном давлении около 90 К и ниже), что обуславливает основные опасности при их применении (эти опасности уже рассматривались выше).

При испарении жидких криогенных продуктов образуется большое количество газа (например, при испарении 1 дм³ жидкого кислорода образуется около 800 дм³ газа при нормальных условиях). Это создает опасность значительного возрастания давления при испарении жидких криогенных продуктов в закрытых объемах. Скорость нарастания давления зависит от величины теплопритоков и объема газовой подушки над жидкостью.

Для исключения таких явлений на всех сосудах, предназначенных для жидких криогенных продуктов, и на отсекаемых с обеих сторон участках трубопроводов, по которым протекают жидкие криогенные продукты, обязательно устанавливают *предохранительные клапаны и разрывные мембраны*, предотвращающие неконтролируемое возрастание давления.

Резервуары, сосуды и ванны могут быть заполнены и использованы только для тех криогенных продуктов, для которых они предназначены изготовителем, о чем должна свидетельствовать окраска сосуда и надпись на нем.

При необходимости их применения для другого криогенного продукта выполняются специальные, оговоренные в технической документации изготовителя мероприятия, включающие, например, при переходе с азота на кислород обезжиривание внутренних полостей и испарителя.

Учитывая, что при хранении криогенных жидкостей в сосудах происходит их постоянное испарение, надо принимать меры, исключающие возможность возрастания давления в сосуде. С этой целью сосуды должны быть оснащены предохранительными клапанами или предохранительными мембранами. При их отсутствии выход газа из сосуда должен быть постоянно открыт.

Недопустимо быстрое нагревание сжиженных газов в сосудах с узкой горловиной.

Работать с жидкими криогенными продуктами следует очень осторожно, не допуская их разбрызгивания и вскипания. Попадание случайных предметов в ванны и сосуды с жидкими криогенными продуктами должно быть полностью исключено.

Количество криогенного продукта, заливаемого в резервуар, не должно превышать для жидкого кислорода 1,08, а для жидкого азота 0,77 кг/дм³ вместимости.

Переливание жидких криогенных продуктов из одного резервуара в другой и их заполнение из транспортных резервуаров должно производиться на бетонных площадках. Производить сливноналивные операции с криопродуктами на площадках, покрытых асфальтом, категорически запрещено, ввиду того что система асфальт – жидкий кислород (или жидкость, обогащенная кислородом) взрывоопасна и имеет очень малую энергию зажигания.

При заполнении сосудов небольшой емкости и сосудов Дьюара следует пользоваться специальными воронками. Верхняя часть воронки должна быть частично закрыта для уменьшения разбрызгивания жидкости.

Применяемые при переливании криогенных жидкостей металлические шланги должны использоваться только для определенного продукта. Применение шлангов для одного, а затем для другого криогенного продукта не допускается.

Шланги, которые не используются, должны быть закрыты заглушками для предотвращения их загрязнения и проникновения воды. Состояние шлангов следует регулярно проверять.

По окончании переливания криогенная жидкость должна быть полностью удалена из шлангов во избежание их разрыва в случае герметичного закрытия с обоих концов.

При эксплуатации сосудов и резервуаров с жидкими криогенными продуктами необходимо постоянно обращать внимание на состояние трубопроводов и устройств, по которым отводится образующийся в емкостях пар.

Известны неединичные случаи, когда вымораживание атмосферной влаги и образование льда на внутренней поверхности горловин сосудов Дьюара и внутри сбросных трубопроводов приводило к опасному повышению давления в сосудах.

Отбор проб жидких криогенных продуктов на анализ следует осуществлять в предварительно охлажденные сосуды. Заполнять сосуды криогенными жидкостями следует осторожно, не допуская интенсивного вскипания жидкости. Особенно это относится к сосудам с открытой горловиной, так как при их быстром заполнении возможно выбрасывание жидкости в помещение.

Жидкие криогенные продукты имеют температуру от 77 до 90 К (от –196 до –183 °С). В связи с этим обращаться с ними следует осторожно. Попав на кожу, они быстро растекаются на поверхности и вызывают сильное охлаждение, что может привести к обмороживанию. Особенно опасным является попадание капель сжиженных газов в глаза, что приводит к серьезным травмам. Кратковременное воздействие капель криогенных жидкостей на кожу не вызывает ее повреждение вследствие очень ма-

лой теплоемкости сжиженных газов. Однако опасность обмороживания существенно возрастает при попадании криогенных жидкостей за воротник одежды или внутрь обуви.

При работе с жидкими криогенными продуктами необходимо защищать глаза лицевым щитком или защитными очками, имеющими боковые щитки. Верхняя одежда должна быть чистой, наглухо закрытой и не иметь наружных карманов, а брюки должны закрывать обувь.

Опасно прикосновение руками к предметам и стенкам сосудов, охлажденным жидкими криогенными продуктами. В связи с этим операции заливания, переливания и переноса криогенных жидкостей следует производить в асбестовых, кожаных или брезентовых рукавицах, которые должны надеваться на руку свободно, чтобы при необходимости их можно было легко сбросить.

При попадании криогенных жидкостей на незащищенный участок тела его следует немедленно обмыть водой.

В помещениях, где ведутся работы с жидкими криогенными продуктами, должны быть организованы хорошая вентиляция и регулируемый контроль за содержанием кислорода в воздухе. Следует иметь в виду, что кислород и аргон при комнатной температуре значительно тяжелее воздуха. Поэтому при утечках в помещение содержание этих газов в прямых и траншеях может быть значительно выше их содержания в помещении. Этим обуславливается необходимость контроля содержания кислорода в прямых и траншеях перед доступом туда людей для выполнения каких-либо работ.

После окончания работ с жидкими криогенными продуктами или перерыва в работе на сколь-нибудь значительное время сосуды с жидкими криопродуктами из помещения необходимо удалить, а из открытых ванн и сосудов криопродукты надо слить. Если по каким-либо причинам сосуды с криопродуктами оставлены в закрытом помещении, вход в него персонала может быть допущен только после контроля содержания кислорода в помещении.

Категорически запрещается выливать криогенные жидкости на пол помещений, поскольку их испарение приводит к значительному загрязнению атмосферы помещения, а также к охлаждению перекрытий, что может привести к разрушению последних.

Слив жидкого кислорода в помещении может привести к пожару или взрыву.

Неиспользованные жидкие криогенные продукты следует сливать в специальные испарители или резервуары. Слив их на грунт неоднократно приводил к сильным взрывам, так как криогенные жидкости постепенно пропитывают грунт и могут проникать на значительную глубину, достигая находящихся там горючих предметов (веществ).

Проведение каких-либо работ запрещается, если содержание кислорода в воздухе более 23 или менее 19%.

Жидкие криогенные продукты относятся к опасным грузам. Классификация их по степени опасности приведена в ГОСТ 19433–81 «Грузы опасные», а особенности их транспортировки регламентированы «Правилами перевозки автомобильным транспортом инертных газов и кислорода сжатых и жидких».

1.6.2. Особенности обращения с жидким кислородом

Особую опасность при контакте с жидким кислородом представляют вещества, например дерево, асфальт, которые пропитываются им и образуют так называемые *оксиликвиты*, по своим взрывным свойствам близкие к наиболее сильным взрывчатым веществам. Опасно также соприкосновение жидкого кислорода с маслом, жирами, тканями.

Все оборудование, предназначенное для работы с жидким кислородом, должно быть обезжирено и соответственно обработано для удаления остатков растворителя.

При хранении и использовании инструмента и оборудования, предназначенных для работы с жидким кислородом, следует обеспечить их чистоту.

В помещениях, где проводятся работы с жидким кислородом, должны быть вывешены плакаты «Осторожно, кислород!».

Ремонт аппаратов, сосудов, приборов и коммуникаций, в которых находился жидкий кислород, можно проводить только после их отогрева до положительных температур и удаления из них газообразного кислорода продувкой воздухом.

Оборудование, предназначенное для работы с жидким кислородом, категорически запрещается использовать для работы с другими криогенными жидкостями, так как при этом оно может быть загрязнено.

В помещениях, где проводят работы с жидким кислородом, категорически запрещается курить, зажигать спички, пользоваться открытым огнем и электронагревателями с открытой спиралью. В этих помещениях должны быть вывешены специальные плакаты.

Одежду, в которой проводили работы с жидким кислородом, следует хранить в шкафах в специальных отделениях, изолированно от загрязненной спецодежды.

Одежда должна висеть свободно. Если она была облита жидким кислородом, необходимо заменить ее другой, а пропитанную кислородом одежду надо проветрить в течение не менее 30 мин.

При работе с жидким кислородом неоднократно происходили взрывы, обусловленные взрывоопасностью большинства органических веществ в жидком кислороде, а также тем, что многие из них пропитываются жидким кислородом, образуя взрывчатые вещества, называемые оксиликвитами (асфальт, дерево, хлопчатобумажные ткани, опилки).

Например, известно несколько взрывов с весьма тяжелыми последствиями, происшедших в результате проливов на асфальт жидкого кислорода во время его переливания из одного резервуара в другой. Во время одного из них взрыв был инициирован падением молотка на асфальт, пропитанный жидким кислородом.

К взрывам большой силы приводили проливы жидкого кислорода на деревянные шпалы железнодорожных путей. Один из них был вызван трещиной в паяном соединении трубки, предназначенной для отбора жидкого кислорода на анализ. В результате во время стоянки железнодорожной емкости жидкий кислород капал на шпалы достаточно длительное время и после начала движения состава произошел сильный взрыв, повредивший участок железнодорожного пути и вагон, располагавшийся после кислородной цистерны. Также было повреждено остекление домов, расположенных в районе железнодорожного пути.

Поэтому совершенно недопустимо переливать жидкий кислород или проводить какие-либо работы с ним в помещениях или на площадках, имеющих асфальтовое покрытие. Шпалы на путях, где проводятся сливно-наполнительные работы с жидким кислородом, должны быть железобетонные.

Наличие на промышленных площадках, а иногда и в помещениях, резервуаров с жидкими криогенными продуктами создает предпосылки для возникновения серьезных аварий в результате разливов жидких криогенных продуктов или их выпуска на грунт.

В мировой практике известны случаи с разливом жидкого кислорода, вызвавшие очень тяжелые последствия.

Например, на одном из химических предприятий жидкий кислород из-за отсутствия потребителей в значительных количествах сливали на грунт. Постепенно жидкий кислород, пропитав грунт, проник до слоев битумной гидроизоляции, взрыв которой привел к значительным разрушениям. Меры по предотвращению подобных аварий должны всегда прорабатываться при проектировании производств разделения воздуха.

Особенности обращения с жидким кислородом должны учитываться при обращении с жидким воздухом и первичным криптоновым концентратом.

Наиболее подробно вопросы, связанные с безопасностью при работе с жидким кислородом, рассмотрены в работе [2].

1.6.3. Особенности обращения с жидким азотом

Основная опасность, которая возникает при обращении с жидким азотом, заключается в том, что образующийся при его испарении газообразный азот при попадании в помещение или в зону дыхания может

приводить к снижению концентрации кислорода в воздухе до значений, при которых становится невозможной нормальная жизнедеятельность организма человека. Более подробно эти вопросы рассмотрены в разделе 1.4.2.

Как уже отмечалось, при даже кратковременном пребывании в атмосфере, содержащей менее 10–14% кислорода, человек теряет сознание без каких-либо предварительных симптомов, например наступает головокружение и т. п.

Основным условием, обеспечивающим безопасность работы с жидким азотом, является организация вентиляции и регулярного контроля содержания кислорода в воздухе.

Особенно опасно и недопустимо оставлять в закрытых помещениях на длительное время, например на ночь, ванны с жидким азотом. Перед началом работ помещения, где находились сосуды Дьюара или ванны с жидким азотом, следует тщательно проветрить.

Прежде чем войти в какой-либо резервуар или цистерну большой вместимости для хранения жидкого азота, необходимо убедиться в том, что все трубопроводы совершенно свободны от жидкости или надежно перекрыты. Затем резервуар должен быть продут воздухом, а нормальное содержание кислорода в нем должно быть подтверждено анализом, проведенным непосредственно перед началом работ. Если возникают сомнения в надежности подачи свежего воздуха в резервуар, то следует использовать дыхательный аппарат с собственным запасом кислорода или воздуха. Ни в коем случае нельзя пользоваться при этом фильтрующим противогазом.

В случае, если при работе с жидким азотом или при работе в помещении, где проводят работы с ним, кто-либо из работающих теряет сознание, пострадавшего следует немедленно вынести на свежий воздух и сделать искусственное дыхание. Кроме этого, необходимо сразу вызвать врача для оказания медицинской помощи. Работы в помещении можно возобновить только после того, как оно будет проветрено и содержание кислорода в воздухе будет не менее 19%.

При использовании жидкого азота для охлаждения деталей, проводимого в открытых ваннах, наряду с опасностью асфиксии, возникающей при нахождении человека в атмосфере с пониженным содержанием кислорода, появляются серьезные опасности, связанные с возможностями загораний и взрывов.

Это обусловлено тем, что при охлаждении деталей значительная доля жидкого азота испаряется, оставшаяся жидкость соответственно обогащается кислородом. Температура кипения жидкого азота при атмосферном давлении примерно на десять градусов ниже температуры конденсации кислорода при том же давлении. В связи с этим возможны конденсации воздуха на предметах и стенках сосудов, имеющих температуру жид-

кого азота, и постепенное обогащение жидкого азота кислородом. В результате этого при сколь-нибудь длительной работе ванн находящаяся в них жидкость может содержать 10–20% и более кислорода.

Интенсивность концентрирования кислорода в ваннах зависит от их конструкции, режима долива свежей жидкости, количества и массы охлаждаемых деталей.

Не исключено и существенное обогащение жидкого азота кислородом при его длительном хранении в сосудах Дьюара.

В таких условиях присутствие на охлаждаемых деталях и поверхности ванн масел и других органических веществ и их накопление в ваннах может приводить к взрывам, что неоднократно было причиной тяжелых несчастных случаев.

Необходимо отметить, что одновременно с повышением содержания кислорода в жидком азоте повышается и его содержание в паре, выходящем из ванны, т. е. создаются условия для возможного загорания многих неметаллических и тканых материалов.

Оптимальной была бы организация непрерывного контроля за содержанием кислорода в жидкости, находящейся в ваннах. Такой контроль может быть организован с применением автоматических газоанализаторов, а также ручных приборов типа ПАКЗ.

Возможен также непрерывный контроль состава жидкости в ваннах по ее температуре.

Предельное безопасное содержание кислорода в жидкости, используемой для охлаждения, составляет 30%.

Если возможность контроля содержания кислорода в жидкости ванн и своевременной ее замены отсутствует, то в таких условиях необходимо выполнять все указанные выше меры безопасности при работе с жидким кислородом (предварительное обезжиривание ванн и охлаждаемых объектов, исключение возможности попадания в ванны посторонних предметов и тому подобное, а также соответствующая организация работ в помещении).

Указанные выше особенности работы с жидким азотом необходимо учитывать при работе с жидкими аргонем и неоном.

1.7. Особенности обеспечения безопасности на установках безнагревной короткоцикловой адсорбции (КЦА установки)

В установках КЦА технологический процесс реализуется в условиях изменения давления в адсорберах от 0,6–0,9 до 0,1 МПа на установках PSA и от 0,15–0,20 до 0,03 МПа на установках VPSA с периодичностью около 1 мин. В связи с этим при конструировании адсорберов и ресиверов таких установок должна рассматриваться необходимость сохранения достаточной прочности этих аппаратов при знакопеременных нагрузках,

многократно (до нескольких миллионов раз) повторяющихся в течение срока жизни аппарата.

Во время технологического цикла установок КЦА предусматривается стадия продолжительностью от 7 с и более, во время которой прекращается поступление воздуха в адсорберы. В этот период исключение повышения давления в ресивере и на компрессоре обеспечивается соответствующими размерами ресивера и системой поддержания заданного давления, которой оснащен компрессор. На случай каких-либо неполадок в системе регулирования давления или в переключающих потоки клапанах на аппаратах установки предусматриваются предохранительные клапаны, работоспособность которых должна систематически проверяться.

На установки КЦА в полном объеме распространяются требования к оборудованию, работающему с повышенным или пониженным содержанием кислорода, изложенные в разделах 1.3 и 1.4.

Следует обратить внимание на то, что в адсорберы азотных установок КЦА загружены угольные молекулярные сита (УМС). При получении азота с содержанием кислорода менее 1% часть слоя адсорбента, находящаяся в зоне продукционного азота, становится пирофорной и может даже воспламеняться при контакте с воздухом. Поэтому перед вскрытием адсорберов азотных установок необходимо выполнить их продувку в течение 3–5 мин сухим воздухом в рабочем направлении. При вскрытии адсорбера контакт сорбента с атмосферным воздухом должен быть сведен до минимума, так как это может привести к заметному ухудшению адсорбционных характеристик УМС и соответственно технологических показателей установки.

Глава 2. Причины взрывов воздуходелительных установок

2.1. Общие положения

Как уже отмечалось, предотвращение взрывов – одна из основных задач, которые необходимо решать при создании воздуходелительных установок и их эксплуатации [3–5].

Исходя из условий и обстоятельств, в результате которых образовалась взрывоопасная смесь, взрывы, происходившие на воздуходелительных установках, можно разделить на две самостоятельные группы.

К первой из них относятся взрывы, происходившие вне технологических аппаратов и трубопроводов. Такие взрывы обусловлены образованием взрывоопасных смесей жидкий кислород – органические вещества (жидкий воздух – органические вещества) в местах, где при нормальной работе оборудования присутствие жидкого кислорода (жидкого воздуха) или органических веществ должно быть исключено.

Это взрывы во внутриблочном пространстве пропитанных жидким кислородом деревянных деталей, использовавшихся в качестве изоляции; взрывы в маслобаках и редукторах турбодетандеров, вызванные попаданием в них обогащенного кислородом жидкого воздуха в результате работы установки с чрезмерно высоким уровнем жидкости в сборнике колонны высокого давления; взрывы в детандерных фильтрах, вызванные попаданием на фильтрующую ткань жидкости, обогащенной кислородом, и взрывы, вызванные попаданием в изоляцию органических веществ, например этилового спирта при обезжиривании установки, а затем жидкого кислорода. Сюда можно отнести и взрывы в изоляционном пространстве сосудов Дьюара, вызванные использованием в качестве адсорбента в вакуумной полости активированного угля, взрывоопасного в смесях с жидким кислородом.

Для таких взрывов характерно, что органические вещества, образующие затем взрывоопасную смесь с жидким кислородом, были предусмотрены в конструкции оборудования или попадали в установку при выполнении монтажных (ремонтных) работ и их количество сравнительно велико (сотни граммов, а иногда и более). Поэтому эти взрывы характеризовались сравнительно высокой мощностью, приводили к весьма тяжелым последствиям и сопровождалась поражением персонала.

Возникновение указанных взрывов всегда обусловлено серьезными конструктивными недостатками оборудования и грубыми нарушениями правил эксплуатации и ремонта. Следует подчеркнуть, что общее число

таких взрывов относительно невелико и не превышает 2–3% от общего числа известных взрывов.

Ко второй, наиболее многочисленной группе относятся взрывы, происходящие в результате образования взрывоопасных условий в технологических аппаратах установок и обусловленные присутствием взрывоопасных примесей в перерабатываемом воздухе. Такие примеси, накапливаясь в конденсаторах-испарителях и в некоторых других местах установок, способны образовывать смеси, взрывоопасные в жидком кислороде. Возможность реализации таких процессов – очень важная специфическая особенность установок разделения воздуха методом низкотемпературной ректификации.

Вероятность возникновения таких взрывов значительно возрастает, при прочих равных условиях, по мере увеличения продолжительности работы установки после отогрева (продолжительности кампании). Это связано с тем, что все взрывоопасные примеси, поступающие в установку с перерабатываемым воздухом, имеют достаточно низкие температуры кипения и сравнительно высокую упругость насыщенного пара при положительных температурах. Поэтому при отогревах они полностью испаряются и выносятся из оборотования.

2.2. Взрывы в конденсаторах-испарителях

Наиболее часто такие взрывы происходили в самих конденсаторах-испарителях, сравнительно небольшое число взрывов происходило в клапанных коробках регенераторов и примыкающих к ним трубопроводах, а также в сборниках колонн высокого давления и в некоторых других местах.

Взрывы возникают в тех местах воздухоразделительных установок, где происходит испарение или выпаривание жидкого кислорода (обогащенной кислородом жидкости), в результате чего на теплоотдающих поверхностях, а иногда и в массе жидкости накапливаются взрывоопасные количества примесей.

Мощность взрыва и его последствия зависят от количества имеющегося в аппарате взрывчатого вещества и энергии, выделяемой при разрушении сосуда. Эта энергия зависит от давления в сосуде в момент разрушения и соответственно от количества испарившегося жидкого кислорода.

При сильных взрывах разрушается не только сосуд, где произошел взрыв, но и соседние аппараты, кожух блока разделения, а иногда повреждаются здание и расположенные вблизи другие сооружения.

При слабых взрывах разрушения обычно не выходят за пределы конденсатора-испарителя. Иногда при взрывах (так называемых микровзрывах) разрушается только одна или несколько трубок или каналов конденсатора-испарителя. Это приводит только к снижению концентрации продукционного кислорода.

Взрывы происходили также в трубопроводах, по которым жидкий кислород подводился к арматуре, и в сливных ventилях, что было обусловлено неудовлетворительным выполнением трубопроводов, допускавшим поступление жидкого кислорода к арматуре, находящейся в закрытом положении.

Рис. 3–6 иллюстрируют последствия некоторых взрывов на воздухо-разделительных установках.

В современных ВРУ повсеместно применяются алюминиевые пластинчато-ребристые конденсаторы-испарители и алюминиевая структуриро-

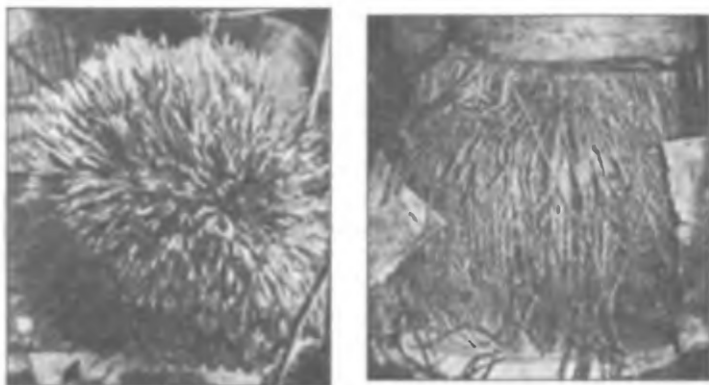


Рис. 3. Последствия взрывов в конденсаторах с межтрубным кипением

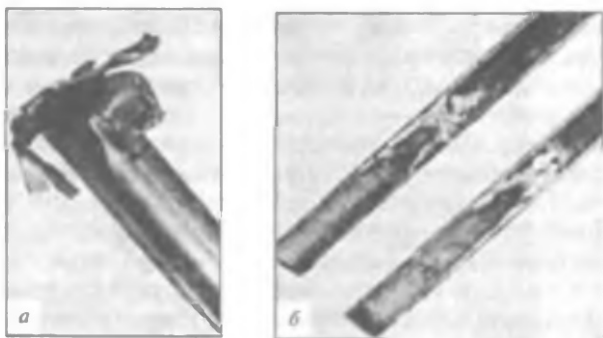


Рис. 4. Вид трубки длиннотрубного конденсатора-испарителя, разрушенной микровзрывом:

а — разрушенная трубка; *б* — концы разрушенных трубок, запаянные при сборке конденсатора



Рис. 5. Вид конденсатора-испарителя с внутритрубным кипением, поврежденного несколькими взрывами

ванная (регулярная) насадка в ректификационных колоннах, представляющие собой тонкостенные алюминиевые конструкции. Установлено, что при взрывах в среде жидкого кислорода такие алюминиевые конструкции могут воспламеняться и гореть с выделением значительных количеств энергии. Таким образом, взрывы, происходящие в конденсаторах-испарителях, могут сопровождаться испарением больших количеств жидкого кислорода. Это значительно увеличивает количество энергии, выделяемой при разрушении аппарата, в котором произошел взрыв, и может серьезно отягчать последствия аварии (такие наиболее мощные взрывы рассмотрены далее).

Научные основы и технологические приемы, обеспечивающие взрывобезопасное протекание процессов низкотемпературного разделения воздуха, отработывались одновременно с развитием и совершенствованием этой специфической отрасли химического машиностроения. Необходимость выполнения комплекса научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ в области обеспечения взрывобезопасности воздухоразделительных установок в течение многих лет постоянно подстегивалась авариями и взрывами, приводившими к человеческим жертвам и значительным убыткам. Результаты



Рис. 6. Фрагмент пластинчато-ребристого конденсатора-испарителя, поврежденного микровзрывом в канале (чистота кислорода понизилась примерно на 2%) [23]

расследований взрывов неоднократно вносили серьезные коррективы в направления и программы научно-исследовательских работ и вызывали необходимость реконструкции ранее выпущенных установок.

Основные работы по созданию методов и средств обеспечения взрывобезопасности выполнены в 1960–70-х годах. В это время стремительно возрастала производительность воздухоразделительных установок (от 30–100 м³/ч до 15–35 тыс. м³/ч по кислороду). Это сопровождалось изменением технологических схем, методов очистки и охлаждения воздуха, конструкций технологических аппаратов и условий протекания процессов, определяющих поведение взрывоопасных примесей, содержащихся в перерабатываемом воздухе, а также и условий, в которых эксплуатировались установки.

Первые технические решения, направленные на повышение взрывобезопасности (оснащение адсорберами на потоке кубовой жидкости и непрерывный вывод из конденсаторов кислорода в жидком виде), принимались исходя из уверенности, что опасным является накопление в жидком кислороде только ацетилена, а также из необходимости предотвращения попадания в установки масла из компрессоров. Их внедрение в установки в 1940–50-х годах привело только к временному снижению частоты взрывов. Далее, в 1960-х годах по мере расширения числа предприятий, где вводились в эксплуатацию установки, частота взрывов вновь возросла.

В этот же период началось широкое применение кислорода на металлургических предприятиях в доменном, мартеновском и конвертерном производствах и интенсивное развитие химической и нефтехимической промышленности, которое сопровождалось широким внедрением крупных воздухоразделительных установок. Эти установки, в отличие от ранее выпускавшихся, работали уже по технологическим схемам низкого давления, а для мест их эксплуатации, как правило, была характерна относительно высокая загрязненность перерабатываемого воздуха различными углеводородами.

Результаты исследований и накопленный опыт потребовали коренного изменения существовавшей концепции обеспечения взрывобезопасности. Была расширена номенклатура рассматриваемых опасных примесей, детально проанализировано изменение их агрегатного состояния, рассмотрена динамика их накопления в основных теплообменных аппаратах и конденсаторах-испарителях.

Были созданы математические модели этих процессов, проведены исследования на экспериментальных стендах в условиях, максимально приближенных к производственным, и на промышленных установках, исследованы адсорбционные и фильтрационные процессы в криогенных условиях и изучены физико-химические свойства ряда опасных примесей. Все это позволило разработать методы расчета и технические решения, обеспечивающие создание установок, надежно работающих при всех известных условиях загрязненности перерабатываемого воздуха.

Одновременно были созданы нормативные документы, регламентирующие требования безопасности при проектировании воздухоразделительных установок и станций и при эксплуатации оборудования.

В частности, были разработаны Правила безопасности при производстве и потреблении продуктов разделения воздуха (ПБПРВ-88), утвержденные в 1988 г. Госгортехнадзором.

По современным представлениям, как уже отмечалось, работа воздухоразделительных установок связана с рядом специфических опасностей, которые могут приводить к авариям и несчастным случаям (см. рис. 1).

Предотвращение этих опасностей достигается рациональным проектированием оборудования, применением материалов, исключаящих опасное воздействие на персонал, оснащением оборудования специальными защитными устройствами, регламентацией параметров, при которых допускается ведение технологического процесса.

Особое внимание при создании и эксплуатации воздухоразделительных установок уделяется предотвращению взрывов, обусловленных накоплением в аппаратах взрывоопасных компонентов, содержащихся в перерабатываемом воздухе. Это достигается оснащением установок системами обеспечения взрывобезопасности, предусматривающими глубокую очистку перерабатываемого воздуха от опасных примесей, доочистку технологических потоков, постоянную очистку жидкого кислорода, а также вывод из установки части кислорода в жидком виде.

Наряду с этим реализуются технологические мероприятия, обеспечивающие максимально возможное снижение интенсивности накопления взрывоопасных примесей на теплоотдающих поверхностях при испарении жидкого кислорода и исключение выноса взрывоопасных примесей в последующие аппараты с каплями жидкости.

Наиболее высокая степень взрывозащищенности достигается на установках, оснащенных цеолитовыми блоками комплексной очистки воздуха (БКО) перед его поступлением в низкотемпературную часть установки.

БКО обеспечивают необходимую и достаточно глубокую очистку воздуха не только от технологически нежелательных примесей (влаги и диоксида углерода), но и от большинства взрывоопасных веществ.

Внедряемый при проектировании и реализуемый при эксплуатации современных воздухоразделительных установок комплекс мероприятий, обеспечивающих взрывобезопасную работу, предусматривает:

- адсорбционную очистку разделяемого воздуха от опасных примесей на синтетических цеолитах;

- адсорбционную очистку жидкого кислорода в циркуляционном контуре;

- непрерывную проточность конденсаторов-испарителей;

- работу конденсаторов-испарителей в благоприятном гидродинамическом режиме;

- систематические отогревы аппаратов, работающих при повышенных содержаниях взрывоопасных примесей;

контроль за содержанием взрывоопасных примесей в местах их наибольшего обогащения;

исключение попадания во внутриблочное пространство любых органических материалов;

исключение возможности поступления криогенной жидкости в детандерные фильтры;

эффективную сепарацию продукционного кислорода от капель жидкости;

выполнение специальных требований при монтаже трубопроводов;

недопущение работы с пропусками.

Представленный комплекс мероприятий имеет целью, во-первых, исключить возможность опасного накопления взрывоопасных примесей на теплоотдающих поверхностях конденсаторов-испарителей путем максимального понижения их концентрации в испаряемом жидком кислороде и создания в этих аппаратах гидродинамических условий, при которых имеет место минимальная интенсивность образования взрывоопасных отложений; во-вторых, исключить возможность неконтролируемого испарения жидкого кислорода при контакте с закрытой запорной арматурой, что достигается надлежащим расположением подводящих трубопроводов, а также исключить вынос капель жидкого кислорода в трубопроводы газообразного кислорода.

После внедрения результатов научно-исследовательских работ частота взрывов и аварий на воздухоразделительных установках в России и на территории бывшего СССР в период с 1964 по 1995 год уменьшилась в десятки раз (табл. 3). При этом число работающих установок многократно возросло.

Таблица 3. Взрывы, связанные с накоплением углеводородов, на территории России и стран СНГ

Вид установок	Количество взрывов в периоды					
	до 1963 г.	1964–69 гг.	1969–74 гг.	1975–79 гг.	1980–84 гг.	1985–95 гг.
Установки низкого давления:						
сильные взрывы	–	5	4	3	–	–
микровзрывы в конденсаторах	–	47	128	176	31	3
Установки среднего и высокого давления, сильные взрывы	95	15	16	7	–	–
Установки среднего давления с БКО, сильные взрывы	–	–	–	–	2	–

Сведения о взрывах на воздуходелительных установках западных фирм (начиная приблизительно с 1964 г.), связанных с накоплением углеводородов, рассмотрены в работе [6]:

сильные взрывы, сопровождавшиеся разрушением не только установок, но и соседних сооружений, – 3;

локальные взрывы, последствия которых не выходили за пределы кожуха блока разделения, – 8;

микровзрывы, приводившие к появлению неплотностей в парогенирирующих каналах испарителей кислорода, – 36.

Внедрение БКО началось более 25 лет назад на установках высокого и среднего давления. Известно только о двух взрывах, происшедших около 20 лет назад на таких установках среднего давления, работавших на нефтеперерабатывающем предприятии, причем тщательное расследование их причин проведено не было.

Согласно мировой статистике, до 1997 года на агрегатах, оснащенных БКО, практически не наблюдалось взрывов, связанных с накоплением взрывоопасных примесей, содержащихся в перерабатываемом воздухе.

Тем неожиданнее прозвучали известия о двух крупных авариях, происшедших в 1997 году в Юго-Восточной Азии. В результате этих взрывов были полностью выведены из строя оснащенные БКО установки разделения воздуха в Бинтулу (Малайзия) и Фусуне (Китай). Первые доступные материалы по этим авариям обсуждались в статье, опубликованной в журнале «Холодильное дело» [4].

В статьях [7, 8] весьма подробно рассмотрены обстоятельства и результаты расследования указанных аварий. Учитывая крайне тяжелые последствия, представляется необходимым остановиться на этих авариях более подробно.

Взрыв в Бинтулу произошел на одной из крупнейших в мире кислородных установок производительностью 2500 т кислорода в сутки, которая работала в составе нефтехимического комплекса.

В результате взрыва в основном конденсаторе-испарителе и последующего возгорания в жидком кислороде четырех алюминиевых пластинчато-ребристых пакетов конденсатора и части алюминиевой регулярной насадки колонны низкого давления разрушен аппарат, в котором размещались пакеты конденсатора-испарителя, и кожух блока разделения и нанесены значительные повреждения окружающему оборудованию. Ранено 12 человек. Общая энергия взрыва оценивается в 4,2 ГДж.

Установка была оснащена конденсаторами-испарителями с нисходящим потоком испаряемой жидкости. Адсорбер циркуляционного контура отсутствовал. Проточность основного конденсатора составляла всего 0,02%, что обуславливало значительное концентрирование в жидком кислороде опасных примесей – до 5000 раз по отношению к перерабатываемому воздуху.

Причина взрыва — накопление в конденсаторе-испарителе взрывоопасных компонентов, содержащихся в перерабатываемом воздухе. Ими были продукты неполного сгорания, образовавшиеся при длительных лесных пожарах.

В течение полутора месяцев в районе расположения установки из-за лесных пожаров видимость была менее 20 м. По литературным данным, такая малая видимость соответствует концентрации аэрозолей в воздухе 20–50 мг/м³. В этом случае на установке, перерабатывающей около 300 тыс. м³/ч, поток массы аэрозоля на входе в воздушные фильтры мог достигать 6–15 кг/ч.

При лесных пожарах в воздух поступает большое количество недоокисленных твердых частиц типа сажи. Образующаяся при этом дымка представляет собой комбинацию всех типов аэрозолей (пыль, дым, туман) и является разновидностью смога. Дисперсный состав таких аэрозолей находится в основном в интервале 0,1–1 мкм.

Воздух, содержащий столь значительное количество аэрозолей, не может быть эффективно очищен в фильтрах, устанавливаемых перед компрессором. Нельзя рассчитывать и на высокую эффективность отделения указанных частиц в цеолитовых блоках очистки и в циркуляционном адсорбере.

Таким образом, значительная доля аэрозоля поступала в жидкий кислород и накапливалась в нем. Даже если в жидкий кислород поступал 1% золя, содержащегося в перерабатываемом воздухе, то за месяц в конденсаторах-испарителях могли накопиться десятки килограммов золя, в значительной степени состоящего из недоокисленных горючих частиц, взрывоопасных в жидком кислороде.

Горючая пыль, накапливаясь на поверхности парогенерирующих каналов, достигла взрывоопасной толщины. Начавшееся возгорание этих отложений привело к воспламенению тонкостенных алюминиевых конструкций и мгновенному испарению значительных количеств жидкого кислорода.

Анализы жидкого кислорода показывали обычные содержания типичных углеводородов и не превышали норм. На установке не проводилось каких-либо специальных мероприятий или дополнительных анализов, несмотря на ее работу в экстремальных условиях по загрязненности воздуха.

Взрыв в Фусуне произошел на установке, производившей 6000 м³ кислорода и 6000 м³ азота в час, работавшей в комплексе получения и переработки этилена.

Установка была оснащена пластинчато-ребристыми конденсаторами-испарителями с естественной циркуляцией. Имелся адсорбер циркуляционного контура.

Центр взрыва располагался в районе основного конденсатора-испарителя. В результате взрыва и последующего возгорания в жидком кислороде части алюминиевых пластинчато-ребристых пакетов конденсатора-испарителя и части алюминиевой регулярной насадки колонны низкого

давления и испарения значительных количеств жидкого кислорода разрушены обечайка аппарата, в котором размещались пакеты конденсатора-испарителя, и кожух блока разделения, нанесены значительные повреждения окружающему оборудованию; 4 человека погибли, 4 тяжело ранены и 27 задеты.

Общая энергия взрыва оценивается в 0,8 ГДж, тротилловый эквивалент 1750 кг.

Причина взрыва – поступление в воздуходелительную установку значительных количеств этилена в связи со сбросом в атмосферу газа, содержавшего 46% этилена, из агрегата получения оксида этилена, располагавшегося на расстоянии 103 м от воздухозабора компрессора. Разность высот сброса этилена в атмосферу и воздухозабора 9 м. Направление ветра было самое неблагоприятное.

Перед взрывом установка работала в разгруженном режиме в связи с прекращением потребления кислорода. Отбор жидкого кислорода не производился. За 9 ч до аварии уровень жидкого кислорода в основном конденсаторе понизился до 50–60 % от полного погружения. Результаты анализов жидкого кислорода на взрывоопасные примеси в статье не приведены.

Обычно содержание этилена в воздухе очень мало, и считалось, что накопление его взрывоопасных количеств в конденсаторах-испарителях маловероятно. Этилен лишь незначительно задерживается блоком комплексной очистки и адсорберами циркуляционного контура.

В рассматриваемом случае в результате чрезвычайно высоких содержаний этилена в воздухе произошло накопление значительных количеств его в теплопередающих каналах конденсатора-испарителя. Взрыв сравнительно небольшого количества этилена, около 500–600 г, привел к возгоранию в жидком кислороде примерно 1000 кг алюминия.

Таким образом, обе описанные аварии произошли при экстремальной загрязненности перерабатываемого воздуха взрывоопасными примесями.

Возникновению взрывоопасных условий в конденсаторах-испарителях способствовали:

на установке в Бинтулу – применение конденсаторов-испарителей с нисходящим потоком испаряемой жидкости (оросительного типа), в которых весьма сложно надежно исключить интенсивное накопление в парогенерирующих каналах примесей, содержащихся в испаряемом кислороде, и очень малая проточность основного конденсатора;

на установке в Фусуне – работа конденсаторов-испарителей при чрезвычайно низком уровне жидкого кислорода, что привело к работе парогенерирующих каналов в сухом режиме и обусловило интенсивное накопление в них углеводородов;

отсутствие в технической документации указаний о недопустимости или порядке работы установки в условиях экстремального загрязнения воздуха или невыполнение таких указаний;

недостаточно эффективный контроль за содержанием в жидком кислороде опасных примесей, специфичных для промышленного района, где работает установка, или неадекватная реакция персонала на результаты анализов.

Принципы и рекомендации по обеспечению взрывобезопасности конденсаторов-испарителей, сформулированные специалистами ведущих западных фирм после указанных взрывов, изложены в стандарте фирмы «Эр Ликид» «Рекомендации по обеспечению взрывобезопасности, связанной с углеводородами, при работе воздухоразделительных установок» [7], и документе «Безопасная работа испарителей-конденсаторов в воздухоразделительных установках» [8], подготовленном Европейской ассоциацией производителей технических газов (EIGA). Следует отметить, что изложенные в этих материалах рекомендации практически не отличаются от принципов и технических решений, реализуемых ОАО «Криогенмаш», в течение последних 20 лет [3, 5].

Взрыв в Бинтулу подтвердил опасность для воздухоразделительных установок не только газообразных взрывоопасных примесей, но и горючих аэрозолей и пылей.

Рассмотренные взрывы должны положить конец дискуссиям об опасности применения в ректификационных колоннах регулярной насадки из тонкослойного алюминия и пластинчато-ребристых испарителей. О возможности загорания тонких алюминиевых пластин в жидком кислороде было известно уже очень давно. Однако возможность их поджигания в условиях промышленной установки считалась практически невероятной. В литературе приведена фотография микровзрыва в алюминиевом пластинчато-ребристом конденсаторе-испарителе, не сопровождавшегося загоранием металла [23] (см. рис. 6).

Следует признать реальные опасности, связанные с использованием тонкостенных алюминиевых изделий, работающих в жидком кислороде. Для предотвращения взрывов, подобных происшедшим, необходимо максимально повысить надежность и эффективность указанного выше комплекса мер, направленных на обеспечение взрывобезопасности.

Многолетнее отсутствие взрывов, а может быть, и отсутствие доступной информации о них способствовали возникновению у некоторых специалистов представлений о том, что воздухоразделительные установки с БКО в любых условиях полностью защищены от взрывов, а система обеспечения взрывобезопасности таких установок может быть без ущерба существенно упрощена.

Описанные выше серьезные аварии убедительно показывают, что это далеко не так. Поэтому, несмотря на весьма малую вероятность подобных взрывов, необходимо принимать надлежащие меры для их предотвращения.

Глава 3. Взрывоопасные примеси атмосферного воздуха

3.1. Общие положения

Наряду с основными компонентами (кислород, азот, аргон, криптон, ксенон, неон, гелий) атмосферный воздух содержит многочисленные примеси (влага, диоксид углерода, различные углеводороды и др.). По воздействию на оборудование и технологический процесс разделения воздуха примеси можно сгруппировать следующим образом: взрывоопасные (в основном углеводороды), засоряющие (влага, диоксид углерода, закись азота), химически активные (хлористый водород, окисиды серы, сероводород, озон).

Содержание в атмосферном воздухе взрывоопасных примесей изменяется в очень широком интервале значений и определяется в первую очередь конкретными особенностями промышленного района и условиями работы химико-технологических и энергетических установок, а также метеорологическими условиями (атмосферное давление, сила и направление ветра, температура воздуха и его влажность).

3.2. Углеводороды

Наиболее обширная информация о номенклатуре и содержаниях углеводородов в воздухе приведена в работе [24]. Некоторые обобщенные данные о загрязненности воздуха представлены ниже:

Примесь	Интервал изменения среднего содержания, млн ⁻¹
Диоксид углерода	350–600
Озон	0.005–0.1
Метан	1–10
Этан, этилен, пропан	0.1–3
Углеводороды, содержащие 4–5 атомов углерода	0.01–9,5
Ацетилен	0.01–0,5
Галогеносодержащие углеводороды, в том числе CF ₄	0.001–0,1

Исследования, проведенные Е.Е. Вагиным и Д.И. Масумовым, показали, что определенная группа углеводородов содержится в атмосферном

воздухе многочисленных обследованных предприятий независимо от характера входящих в них производств. В эту группу углеводородов входят: метан, этан, этилен, пропан, пропилен, изобутан и *n*-бутан; ацетилен и метилацетилен; бутены: бутен-1, изобутилен, бутен-2(транс), бутен-2(цис); углеводороды, содержащие пять и более атомов углерода (изопентан, *n*-пентан, 3-метилбутен-1) и ряд других.

Особенности состава оборудования предприятий и условий их работы проявляются в повышенных содержаниях тех или иных углеводородов и присутствии в воздухе некоторых других примесей.

По результатам многочисленных измерений установлено, что для содержаний большинства примесей в атмосферном воздухе характерно нормально-логарифмическое распределение. Поэтому среднее содержание примесей в воздухе в значительной степени зависит от периода осреднения. При его увеличении (от нескольких часов до суток и месяцев) среднее значение обычно уменьшается в десятки раз, и оно значительно отличается от максимальных содержаний.

Реальное содержание примесей в воздухе, перерабатываемом ВРУ, зависит от расположения устья воздухозабора по отношению к источникам загрязнения и от метеорологических условий.

Наиболее распространенной взрывоопасной примесью воздуха является ацетилен, что связано с широким применением его для автогенной сварки и резки металла, повсеместно используемых на промышленных предприятиях.

Взрывоопасность ацетилена обусловлена такими его физико-химическими свойствами, как неустойчивость и активность. Обычно содержание ацетилена в воздухе находится на уровне $0,001-0,5 \text{ см}^3/\text{м}^3$ и зависит от взаимного расположения места забора воздуха и ацетиленовых станций, переносных ацетиленовых генераторов, сварочных постов и цехов, мест хранения карбида кальция, захоронения его шлама и ряда других факторов. В отдельных неблагоприятных случаях содержание ацетилена в воздухе может возрасти до $1-3 \text{ см}^3/\text{м}^3$, а иногда и более.

К особо опасным последствиям может приводить складирование карбида кальция вблизи воздухозаборов или всасывающих камер компрессоров, а также расположение возле них ацетиленовых генераторов.

Источниками других углеводородов являются различные металлургические и химические, коксохимические и нефтехимические производства, нагревательные печи, котельные, теплоэлектроцентрали, хранилища нефти и мазута.

Значительные количества метана могут выделяться в атмосферу из разломов в земной коре и из различных работающих или законсервированных подземных сооружений.

Опасность могут представлять газокompрессорные станции, автотранспорт и тепловозы, выбрасывающие в атмосферу значительные ко-

личества различных углеводородов. В связи с этим совершенно недопустимо расположение стоянок автомобилей и тепловозов вблизи всасывающих камер и входных патрубков воздухозаборов.

Наряду с взрывоопасными примесями, поступающими с атмосферным воздухом, в блоки разделения могут попадать углеводороды, генерируемые в самой установке: например, загрязнение воздуха маслом может происходить в фильтрах очистки воздуха от пыли, а также в компрессорах и детандерах при их неудовлетворительной конструкции и эксплуатации.

Кроме того, воздух при сжатии в смазываемых поршневых компрессорах загрязняется продуктами термического крекинга масла в цилиндрах компрессоров, который особенно интенсивно протекает при температурах сжатия более 423 К (150 °С) и при использовании недостаточно стабильных типов масел.

3.3. Нормативы содержания примесей в воздухе

На протяжении всей истории создания и развития техники разделения воздуха методом низкотемпературной ректификации предпринимались попытки ограничения нормативами содержания опасных примесей в перерабатываемом воздухе. Эти нормативы под названием «предельно допустимые содержания примесей в воздухе» обычно указываются в технической документации на поставку установки.

В табл. 4 приведены нормативы по загрязненности воздуха, включаемые в техническую документацию отечественных установок, и требования к воздуху, предъявляемые зарубежными фирмами.

Указанные в табл. 4 нормативы по номенклатуре контролируемых примесей в воздухе и по предельным содержаниям достаточно близки, а имеющиеся различия во многом определяются применяемыми методами контроля. Во всех документах отмечается, что в случае превышения этих концентраций необходимы соответствующие изменения в конструктивном исполнении установки или в режимах ее работы.

В зарубежных документах не нормируется содержание сероуглерода в воздухе и жидком кислороде. В то же время известно, что физико-химические характеристики сероуглерода очень близки к показателям ацетилена, а взрываемость сероуглерода в жидком кислороде подтверждена экспериментально. Следовательно, для нормирования содержаний сероуглерода в технологических потоках ВРУ имеются достаточные основания.

Обычно сероуглерод обнаруживается в воздухе только в промышленных районах, где имеются производства искусственного волокна. Поэтому, если в районе расположения установки отсутствуют источники эмиссии сероуглерода, контроль за содержанием этой примеси в жидком кислороде не проводится.

Таблица 4. Предельные содержания примесей в воздухе, подаваемом в воздухоразделительную установку, оснащенную БКО

Примесь	Нормы, ppm			
	EIGA [6, 12]	Air Liquide [11]	Air Products [9]	российские
Сумма C_1-C_3	—	—	—	20 (в пересчете на CH_4)
Метан	5	8	10	—
Этан	0,1	—	0,1	—
Этилен	0,1	—	0,3	—
Пропан	0,05	—	0,06	—
Пропилен	0,2	—	0,2	—
Сумма C_n без метана	—	0,5	—	—
Сумма C_4 и более тяжелые	1	—	—	1 (в пересчете на n -бутан)
Ацетилен	0,3	0,3	1	1
CO_2	425	400	400	400
CO	—	0,6	20	0,6
Водород	—	0,7	10	0,5
$NO (NO+NO_2)$	0,1	0,1	0,05	—
N_2O	0,35	0,6	0,3	0,05
Озон	—	0,2	0,2	—
Сероуглерод	—	—	—	0,06

Результаты анализов достаточно надежно характеризуют загрязненность воздуха только за период обследования и при имевших место метеорологических условиях и не позволяют оценить изменение загрязненности после ввода в эксплуатацию новых объектов или изменения режима работы существующих, в том числе и при аварийных ситуациях.

Поэтому на стадии проектирования производств разделения воздуха, когда, как правило, сооружение производственного комплекса далеко от завершения, более предпочтительной является расчетная оценка загрязненности воздуха.

Необходимые расчеты обычно проводятся по различным методикам расчета концентраций в атмосферном воздухе вредных веществ, содержащихся в выбросах производств [10].

При выполнении таких расчетов должны быть учтены все имеющиеся на промышленной площадке источники загрязнения воздуха взрывоопасными примесями как при нормальной работе технологических установок, так и при аварийных нештатных ситуациях с учетом показателей вытянутости розы ветров для рассматриваемого района и рельефа местности.

Включаемые сейчас в техническую документацию нормативы разработаны исходя из действующих норм содержания опасных примесей в жидком кислороде и данных о средней за достаточно длительный период

Таблица 5. Средняя эффективность различных средств и систем очистки, %

Система очистки	Этилен	Пропан	Пропилен	Ацетилен	C ₄ –C ₅
БКО	10	50–60	60–70	Более 98	Более 95
Регенераторы	40	40–60	50–70	До 80	До 90
Адсорберы кубовой жидкости	30–40	40–60	60–80	До 95	До 80
Система регенераторы – адсорберы кубовой жидкости – суммарно	Не менее 50	Не менее 60	Не менее 70	–	–

времени степени очистки, обеспечиваемой в эксплуатационных условиях различными средствами очистки.

Следовательно, действующие нормативы на воздух можно интерпретировать как нормы среднесуточного содержания примесей в воздухе и их необходимо дополнить нормами на максимальные разовые концентрации.

Необходимо обратить внимание на то, что применение блоков комплексной очистки воздуха и соответственно исключение из установки узла регенераторов или реверсивных теплообменников и адсорберов на потоке кубовой жидкости заметно понизило эффективность защиты установок от таких углеводородов, как этилен и пропан. Например, доля этилена, поступающего в колонну низкого давления, при наличии на установке регенераторов и адсорберов на потоке кубовой жидкости обычно не превышает 50% от содержания в перерабатываемом воздухе [13], тогда как в установках с БКО эта доля составляет более 80%.

Некоторые данные об эффективности различных средств и систем удаления опасных примесей приведены в табл. 5.

Обычно содержания углеводородов группы C₂–C₃ в атмосферном воздухе очень далеки от содержаний, при которых возможно возникновение взрывоопасных условий в установке.

Однако может оказаться весьма опасным, что подтверждает взрыв в Фусуне, экстремальное загрязнение перерабатываемого воздуха такими углеводородами в результате нештатных ситуаций на производствах и технических объектах, расположенных на промышленной площадке в районе воздухоразделительной станции и ее воздухозабора. Это в первую очередь относится к возможному сбросу в атмосферу углеводородов и других взрывоопасных примесей при остановках или при изменении режима работы химико-технологических агрегатов и устройств.

3.4. Мониторинг загрязненности воздушного бассейна

Исходя из сказанного выше особую актуальность приобретает систематическое проведение на предприятиях, эксплуатирующих воздухоразделительные установки, мониторинга загрязненности воздушного бассейна,

предусмотренного правилами безопасности, т. е. необходимы систематическая оценка состояния загрязненности воздуха, подаваемого в воздухоразделительные установки, и прогнозирование возможных ее изменений с учетом условий работы размещенного на промышленной площадке оборудования и других объектов, а также развития промышленного района.

Такая работа должна проводиться совместно с генеральным проектировщиком, отвечающим за взаимодействие предприятий промышленного района, и органами санитарного и экологического надзора.

При проведении мониторинга наряду с металлургическими, химическими и нефтехимическими производствами необходимо рассматривать загрязнение атмосферы такими объектами, как автомобильные магистрали, стоянки автотранспорта и тепловозов, теплоцентрали и котельные, дымящие свалки и терриконы, склады и хранилища нефтепродуктов, газовые перекачивающие компрессорные станции, предохранительные мембраны газопроводов и т. п., действующие и неработающие шахты и другие подземные сооружения.

Применительно к воздухоразделительным установкам загрязненность атмосферного воздуха должна описываться средними и максимально возможными значениями содержаний примесей за 4; 8 и 24 ч.

Мониторинг необходимо производить по всем примесям, указанным в технической документации на поставку воздухоразделительной установки (типовые примеси), и другим взрывоопасным примесям, специфичным для промышленного района, где располагается установка.

В типовую номенклатуру контролируемых примесей входят:

взрывоопасные примеси (углеводороды);

блокирующие примеси (диоксид углерода и закись азота);

примеси, которые могут оказывать негативное влияние на цеолиты блоков комплексной очистки воздуха (сернистые соединения, HCl и др.).

Предельные содержания примесей в воздухе регламентируются разработчиком воздухоразделительной установки и содержатся в техническом задании на создание установки (ТЗ), контрактах, технико-коммерческих предложениях (ТКП), а также в эксплуатационной документации (РЭ).

Мониторинг загрязненности воздушного бассейна должен предусматривать:

составление перечня расположенных на промышленной площадке производств и объектов, выбрасывающих в атмосферу взрывоопасные примеси, в том числе по номенклатуре, приведенной в ТЗ на установку, с оценкой массового расхода выбросов (кг/с) при наиболее неблагоприятном режиме работы указанных производств и объектов как в штатных, так и в аварийных ситуациях. Очевидно, что указанный перечень должен систематически обновляться;

проведение расчетов рассеивания примесей в атмосфере и определение их максимально возможных концентраций в месте воздухозабора

кислородной станции при наиболее неблагоприятных метеоусловиях (проектный мониторинг) [10]:

сравнение результатов расчетов с нормативами и принятие соответствующих решений;

проведение при необходимости инструментального анализа содержания отдельных примесей в воздухе, поступающем в установку, при различных направлениях ветра и других метеоусловиях и выяснение возможностей уменьшения загрязненности поступающего воздуха путем перехода с удаленного воздухозабора на местный или наоборот.

Если проектный мониторинг воздушного бассейна показывает, что загрязненность воздуха не может превысить нормативы, то при эксплуатации воздухоразделительных установок инструментальный контроль за содержанием примесей в перерабатываемом воздухе не проводится, а постоянно контролируется только содержание примесей в жидком кислороде в соответствии с указаниями РЭ. Сопоставляя хроматограммы этих анализов, можно также получить определенную информацию о происходящих изменениях в загрязненности перерабатываемого воздуха. Такую работу регулярно должны проводить сотрудники аналитических лабораторий.

Если установлено, что загрязненность воздуха может превысить нормативы, то эксплуатирующая организация должна принять необходимые меры по снижению содержания этих примесей в перерабатываемом воздухе и оперативно рассмотреть сложившуюся ситуацию с разработчиком установки. Одновременно должен быть усилен контроль за работой системы обеспечения взрывобезопасности установки и за выполнением требований РЭ.

Для всех возможных случаев аварийного загрязнения воздуха необходимо разрабатывать планы предотвращения аварий, четко регламентирующие действия персонала в таких ситуациях.

В некоторых случаях единственным средством обеспечения надлежащего качества воздуха является сооружение удаленных воздухозаборов, устья которых разнесены на достаточно большое расстояние и расположены так, что не находятся с подветренной стороны по отношению к наиболее опасным источникам эмиссии углеводородов. В связи с тем, что удаленные воздухозаборы весьма дорогостоящие сооружения, их строительству должна предшествовать очень тщательная проработка. Во многих случаях более экономично при выборе места строительства воздухоразделительной станции учесть розу ветров и расположение наиболее интенсивных источников загрязнения воздуха.

Сооружение удаленных воздухозаборов, как и вообще воздухоразделительной станции, накладывает серьезные обязательства на проектировщиков по недопущению при дальнейшем развитии инфраструктуры расположения вблизи устья воздухозаборов источников загрязнения воздуха. Известны случаи, когда невыполнение этих условий привело к серьезным авариям.

Глава 4. Поведение различных примесей в процессе низкотемпературного разделения воздуха

4.1. Общие положения

К физико-химическим свойствам, определяющим поведение взрывоопасных примесей воздуха при прохождении по технологическим потокам воздуходелительной установки и условия возникновения взрывоопасных ситуаций, относятся растворимость в жидком кислороде, давление насыщенного пара при низких температурах, плотность, температура кипения и пределы взрываемости примесей в жидком кислороде.

Данные о пределах взрываемости и растворимости примесей используют при разработке нормативов на предельно допустимые содержания в жидком кислороде.

Данные о давлении насыщенного пара необходимы при рассмотрении поведения примесей во время прохождения воздуха по основным теплообменным аппаратам и при оценке возможности выноса примесей из аппаратов с паром.

В табл. 6 приведены физико-химические параметры, характеризующие свойства некоторых взрывоопасных примесей воздуха, а также диоксида углерода.

Исходя из растворимости в жидком кислороде углеводороды подразделяют на несколько групп: ацетилен, углеводороды, имеющие высокую растворимость в жидком кислороде (группа C_1-C_3), углеводороды, имеющие среднюю растворимость в жидком кислороде (группа C_3-C_4), углеводороды, имеющие малую растворимость в жидком кислороде (группа C_5).

4.2. Взрывоопасные свойства углеводородов

Взрывоопасные свойства углеводородов в жидком кислороде характеризуются следующими данными [1, 2].

Смесь углеводородов, растворенных в жидком кислороде, становится взрывоопасной при их содержании 5% и более при пересчете на углерод.

Толщина взрывоопасного слоя углеводородов, находящегося на металлической поверхности в среде жидкого кислорода, составляет 10–30 мкм.

Смесь кристаллов углеводородов с жидким кислородом становится взрывоопасной при содержании углеводородов более 3–4% мас.

По детонационной способности и взрывным характеристикам смеси всех исследованных углеводородов с жидким кислородом очень близки к аналогичным свойствам известных взрывчатых веществ.

Таблица 6. Физико-химические свойства некоторых примесей воздуха

Примесь	Фор- мула	Концентрационные пределы взрываемости, % об.				Температура, К		Плот- ность при 90 К, г/см ³	Растворимость, млн ⁻¹		Давление насыщенного пара, Па, при температуре, К		Содер- жание при- меси, млн ⁻¹
						кипе- ния	плав- ления						
		в воздухе		в кислоро де	в жидком кислороде при 90 К				в кубовой жидкости при 100 К				
										min	max	min	
Метан	CH ₄	5,3	14	5,1	61	111,5	89	—	910000	990000	10,1·10 ³	32·10 ³	5,2·10 ⁴
Этан	C ₂ H ₆	3	12,5	3	66	184,5	101,1	—	83000	109000	0,92	0,95·10	1,35·10
Этилен	C ₂ H ₄	3,1	32	3	80	169	103,6	0,727	27500	—	3,5	4,1·10	6,5·10
Пропан	C ₃ H ₈	2,2	9,5	2,3	55	230,8	83,1	—	7700	10800	0,15·10 ⁻²	0,3·10 ⁻¹	4,8·10 ⁻²
Пропилен	C ₃ H ₆	2,4	10,3	2,1	53	226	85,5	0,778	6700	—	2,9·10 ⁻³	5,6·10 ⁻²	8,8·10 ⁻²
n-Бутан	C ₄ H ₁₀	1,9	8,5	1,8	49	272	134,8	0,77	700	1170	3,3·10 ⁻¹⁰	2,6·10 ⁻⁵	4,2·10 ⁻⁵
Изобутилен	C ₄ H ₈	1,8	8,8	—	—	266,1	132,2	—	130	—	2,4·10 ⁻⁷	2,1·10 ⁻⁵	2,3·10 ⁻⁴
Бутен-2 (транс)	C ₄ H ₈	—	—	—	—	273,9	167,5	—	500	—	0,13·10 ⁻⁷	0,19·10 ⁻⁵	—
n-Пентан	C ₅ H ₁₂	1,4	7,6	—	—	309,2	141,5	—	65	116	1·10 ⁻¹⁰	0,25·10 ⁻⁷	4·10 ⁻⁸
Пентен-1	C ₅ H ₁₀	—	7,5	—	—	303	108	—	240	—	4,7·10 ⁻⁷	6,4·10 ⁻⁷	1·10 ⁻⁶
n-Гексан	C ₆ H ₁₄	1,2	—	—	—	341,9	177,8	0,795	5,95	10,6	—	—	—
Ацетилен	C ₂ H ₂	2,5	100	2,5	100	189,4	193,1	0,79	5,4	19,5	0,19·10 ⁻¹	0,36	0,56
Диоксид углерода	CO ₂	—	—	—	—	194,7	—	1,58	4,5	24	5,3·10 ⁻⁴	0,019	0,031
Закись азота	N ₂ O	—	—	—	—	184,7	—	0,32	140	464	0,002	0,06	0,09

Примечание. Содержание соответствует давлению насыщенного пара при 100 К и давлению 6,5·10⁵ Па.

Примечание. Содержание соответствует давлению насыщенного пара при 100 К и давлению 6,5·10⁵ Па.

Наибольшей чувствительностью к импульсу давления в среде жидкого кислорода обладают твердые ацетилен и сероуглерод. У остальных углеводородов и различных масел чувствительность к импульсу давления в среде жидкого кислорода значительно ниже, чем у ацетилена, но при достаточно большом импульсе взрывоопасны смеси кристаллов всех углеводородов с жидким кислородом.

Из всех примесей воздуха наиболее опасным для воздухоразделительных установок считается ацетилен. Малая растворимость ацетилена в жидком кислороде приводит к тому, что уже при весьма небольших концентрациях его в жидком кислороде создаются благоприятные условия для образования взрывоопасных смесей.

В то же время применяемые сейчас средства очистки позволяют при правильной эксплуатации установок надежно защитить их от попадания и накопления ацетилена.

Концентрации метана в атмосферном воздухе, как правило, таковы, что взрывоопасные условия могут возникнуть только на установках, оснащенных оборудованием для получения первичного криптонового концентрата.

Другие углеводороды в зависимости от их содержаний в перерабатываемом воздухе могут образовать взрывоопасные смеси в аппаратах установок любых типов.

Серьезную опасность может представлять накопление в аппаратах смазочных масел и продуктов их разложения. Эти вещества взрывоопасны в жидком кислороде, хотя их чувствительность к различным импульсам значительно ниже чувствительности ацетилена. Последнее ни в коей мере не может оправдать ослабление внимания к этим примесям, тем более что при неудовлетворительной очистке воздуха в аппаратах блоков разделения воздуха может накопиться большое количество масла, взрыв которого может привести к очень серьезным разрушениям. Достаточно сказать, что взрыв смеси 100 г масла с жидким кислородом эквивалентен взрыву около 30 г тринитротолуола.

Учитывая сравнительно малую чувствительность масла к импульсу давления в среде жидкого кислорода, можно представить, что взрыв масла и некоторых других углеводородов в жидком кислороде происходит в две стадии. Вначале происходит взрыв ацетилена или другого вещества, имеющего большую чувствительность к взрыву, что затем приводит к взрыву масла.

4.3. Озон

В атмосферном воздухе, перерабатываемом воздухоразделительными установками, постоянно присутствует озон. Его содержание в воздухе обычно находится в интервале $0,001-0,01$ млн⁻¹ и может возрастать в десятки и более раз при грозах.

Повышенное содержание озона в воздухе может наблюдаться в районах разрядников электротехнических устройств высокого напряжения и вблизи линий электропередач.

Имеются литературные данные, что содержание озона в городской атмосфере максимально в период от 11 до 13 ч дня и что его максимальные концентрации могут до 40 раз превышать минимальные.

Озон способен вступать в многочисленные реакции, протекающие в самых разнообразных условиях. Например, реакции озона с некоторыми веществами могут проходить при температурах 4–11 К.

Нагревание озono-кислородных смесей приводит к распаду озона, интенсивность которого повышается с ростом температуры. Поэтому при компримировании воздуха, которое сопровождается его нагревом, значительная часть озона может распасться.

Физико-химические свойства озона, определяющие его поведение в процессе низкотемпературного разделения воздуха, — давление насыщенного пара (P) и растворимость в азото-кислородных смесях (S) — приведены ниже:

Температура, К	77	90	93
P , гПа	0,0044	0,14	0,57
S , млн ⁻¹	$80 \cdot 10^3$	$190 \cdot 10^3$	$340 \cdot 10^3$

Таким образом, растворимость озона в жидком кислороде весьма велика. При указанных выше содержаниях озона в воздухе и реальных значениях проточности выделение озона в самостоятельную жидкую фазу в конденсаторах-испарителях происходить не может.

В то же время еще в работе Клода упоминалось, что в стеклянных сосудах Дьюара, заполненных жидким кислородом, наблюдали ярко-синюю каемку у края жидкого кислорода, которую идентифицировали как слой озона.

Столь значительное накопление озона в жидком кислороде возможно только при длительной работе установки почти без вывода жидкого кислорода из конденсатора-испарителя либо, если генерирование озона происходит в результате каких-либо энергетических воздействий на жидкий кислород, непосредственно в блоке разделения воздуха.

К таким воздействиям могут быть отнесены:

статическая электризация жидкого кислорода при его кипении (впервые такое предположение было высказано еще Поллитцером в 1923 году); кавитационные явления при кипении, которые способствуют электризации жидкого кислорода.

4.4. Электризация жидкого кислорода

Жидкий кислород, как и все жидкие криогенные продукты, является очень хорошим диэлектриком. Поэтому при его кипении происходит интенсивная электризация. Например, при кипении жидкого кислорода в

незаземленном сосуде потенциал по отношению к земле может достигать 3000 и более вольт. В то же время, как показали исследования профессора Н.Г. Дроздова в МЭИ, напряжение, при котором наблюдаются заметные электрические разряды в жидком кислороде, составляет около 200 В.

Непосредственные измерения, проведенные во ВНИИКИмаш, показали, что удельная мощность, накапливаемая в жидком кислороде в результате статической электризации в конденсаторе-испарителе воздухо-разделительной установки производительностью 1400 м³/ч, может достигать 2 Вт/м³.

Степень электризации жидкого кислорода значительно возрастает в местах с повышенными скоростями движения жидкости или парожидкостной смеси (измерения выполнялись на установке, имевшей надежное заземление всех технологических аппаратов и трубопроводов), причем степень электризации в решающей степени зависит от содержания в жидком кислороде различных механических примесей, кристаллов влаги и диоксида углерода. Для максимального уменьшения электризации аппараты воздухо-разделительных установок должны быть надежно заземлены.

Предотвращение опасного накопления озона в технологических аппаратах воздухо-разделительных установок достигается обязательным постоянным выводом из аппаратов части кислорода в жидком виде.

Такие примеси, как водород и оксид углерода, не задерживаются средствами очистки, не концентрируются в кислородсодержащих жидкостях и проходят по воздухо-разделительной установке вместе с азотом.

4.5. Закись азота

В последние годы некоторые зарубежные фирмы начали нормировать содержание в жидком кислороде закиси азота. Эта примесь достаточно широко встречается в атмосферном воздухе промышленных предприятий. Наиболее высокие концентрации закиси азота наблюдаются вблизи некоторых химических производств и дорог с интенсивным движением автомобильного транспорта.

Физико-химические свойства закиси азота довольно подробно рассмотрены в работе [26].

Аналогично диоксиду углерода закись азота относится к блокирующим примесям, которые при достаточно высоких содержаниях в воздухе после БКО могут вымораживаться в основном теплообменном узле ВРУ, повышая его сопротивление, выноситься в виде кристаллов в последующие технологические аппараты и накапливаться в конденсаторах-испарителях, в том числе и в парогенерирующих каналах.

Растворимость закиси азота в жидком кислороде значительно выше, чем диоксида углерода (табл. 6).

При использовании в БКО обычных цеолитов закись азота удаляется заметно хуже, чем диоксид углерода. Известно несколько патентов, пред-

лагающих способы модификации цеолитов для повышения эффективности очистки воздуха от закиси азота. Однако на рынок такие цеолиты пока не поступили.

В системах адсорбционной очистки жидкого кислорода в циркуляционном контуре закись азота удаляется также менее эффективно, чем диоксид углерода (средняя степень очистки не превышает 30–40%).

Взрывоопасные свойства закиси азота в жидком кислороде были много лет назад исследованы Е. Карватом (фирма «Линде»). Было показано, что закись азота, будучи воспламеняемой в жидком кислороде, не инициирует горение даже в случае образования суспензий в жидком кислороде.

Закись азота обнаруживается в жидком кислороде при анализах на многих предприятиях. Какой-либо связи происходивших взрывов с присутствием закиси азота не установлено, хотя такие предположения неоднократно выдвигались.

Глава 5. Накопление опасных примесей в технологических аппаратах

5.1. Общие положения

Поведение примесей, содержащихся в перерабатываемом воздухе, в процессе низкотемпературного разделения в значительной степени зависит от технологической схемы установки и режимов ее работы [3].

подавляющее большинство выпускаемых в настоящее время воздухо-разделительных установок работают по схемам низкого и среднего давления. На упрощенной технологической схеме установки, работающей по схеме низкого давления (рис. 7), пунктиром показаны трубопроводы, по которым проходит основная масса взрывоопасных примесей.

Важнейшая особенность современных установок с позиции обеспечения безопасности заключается в том, что они оснащены блоками комплексной очистки воздуха на цеолитах (БКО), в которых воздух очищается не только от влаги и диоксида углерода, но и от взрывоопасных примесей.

В установках низкого давления воздух после сжатия в компрессоре до давления 0,54–0,56 МПа (5,4–5,6 кгс/см²) и охлаждения до температуры 283 К поступает в блок комплексной очистки (БКО), где очищается от влаги, диоксида углерода и большинства опасных примесей.

Из БКО воздух поступает в основной теплообменный узел (нереверсивные пластинчато-ребристые теплообменники), где охлаждается до температуры около 100 К.

Если при охлаждении воздуха парциальное давление примеси превышает упругость пара в рассматриваемых условиях, то возможны десублимация (конденсация) примеси и образование твердой или жидкой фазы.

В табл. 6 приведены содержания, соответствующие давлению насыщенного пара для некоторых углеводородов. Сопоставление этих содержаний насыщения с возможными содержаниями углеводородов в воздухе после БКО показывает, что при нормальной работе БКО изменение агрегатного состояния углеводородов в основном теплообменном узле практически исключается.

Эффективность очистки воздуха в БКО при правильной эксплуатации настолько высока, что при предусмотренной проектом установки проточности конденсаторов-испарителей (доля кислорода, выводимого в жидком виде) практически исключается возможность образования в них взрывоопасных условий.

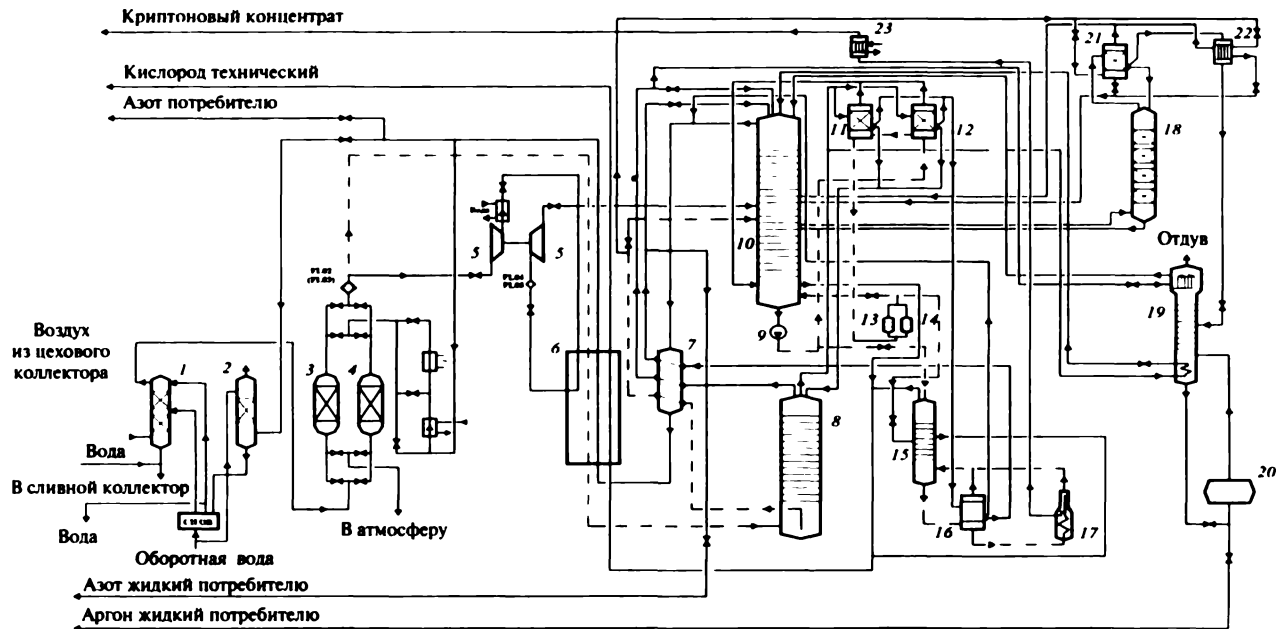


Рис. 7. Принципиальная технологическая схема воздухоразделительной установки низкого давления:

1 и 2 – скрубберы системы АВО; 3 и 4 – адсорберы БКО; 5 – турбодетандер; 6 – основной теплообменник; 7 – переохладитель; 8 – колонна высокого давления; 9 – насос жидкого кислорода; 10 – колонна низкого давления; 11 – основной конденсатор-испаритель; 12 – циркуляционный конденсатор-испаритель; 13 и 14 – адсорберы циркуляционного контура; 15 – криптоновая колонна; 16 – конденсатор криптоновой колонны; 17 – испаритель-конденсатор; 18 – аргонная колонна; 19 – колонна очистки аргона; 20 – резервуар жидкого аргона; 21 – конденсатор аргонной колонны; 23 – теплый испаритель криптонового концентрата

Содержания диоксида углерода, а иногда и закиси азота в атмосферном воздухе, поступающем в установку, обычно во много раз превышают концентрации насыщения в основном теплообменном узле.

При работе БКО в штатном режиме вымораживание диоксида углерода в основном теплообменном узле исключается.

Случаи, когда возможна конденсация закиси азота в основном теплообменном узле, маловероятны.

Таким образом, на установках с БКО в воздухе, поступающем из основного теплообменного узла в куб колонны высокого давления, углеводороды и диоксид углерода обычно находятся в растворенном виде. В растворенном виде эти примеси находятся и в кубовой жидкости, однако их содержание в ней примерно в два раза выше, чем в воздухе, так как расход кубовой жидкости примерно в два раза меньше расхода воздуха, поступающего в колонну высокого давления.

В регенераторах, применявшихся ранее в качестве основного теплообменного узла, накапливались значительные количества углеводородов и диоксида углерода.

В табл. 7 приведены данные о количестве различных примесей, извлеченных из регенераторов при отоплении. В случае отепления регенераторов накопившиеся в них примеси могут поступать в последующие аппараты и создавать в них взрывоопасные условия.

В дальнейшем по мере прохождения по технологическим потокам углеводороды и диоксид углерода накапливаются в жидком кислороде. При этом по сравнению с содержанием в потоке кубовой жидкости их содержание повышается примерно пропорционально отношению расхода кубовой жидкости к расходу жидкого кислорода из рассматриваемого аппарата.

В газообразном азоте, выходящем из колонн высокого и низкого давления, углеводороды должны практически отсутствовать.

В современных крупных воздухоразделительных установках предусматривается второй контур очистки от углеводородов и диоксида углерода.

Обычно с этой целью используется адсорбер, включаемый в циркуляционный контур на одном из конденсаторов-испарителей.

Таблица 7. Количество углеводородов, извлеченных при отоплении из регенераторов

Регенераторы	Масса углеводородов ¹ , кг, содержащих различное число атомов углерода			Общая масса, кг
	2–3	4	5–6 и более	
Кислородные	1,6/0,8	2,1/1,05	1,3/0,35	5/2,5
Азотные	5,5/0,92	14/2,3	5,8/0,97	25,3/4,2

¹ В числителе — извлеченных из всех регенераторов (кг), в знаменателе — из одного регенератора (кг).

5.2. Проточность

Технологическую схему современных воздухоразделительных установок проектируют таким образом, чтобы обеспечивалась постоянная проточность (вывод жидкости) из всех аппаратов, где находятся кислород или жидкости, обогащенные кислородом.

Это необходимо для того, чтобы вывести из аппаратов не задержанные средствами очистки углеводороды и не допустить их опасного накопления в конденсаторах-испарителях.

Общепринятые нормативы на проточность отсутствуют. Наиболее обоснованно ее можно определить расчетом при проектировании установки (см. главу 8). Например, специалисты фирмы Air Products считают, что для обеспечения взрывобезопасности конденсаторов-испарителей проточность должна быть не менее 0,2 (0,1)% от расхода перерабатываемого воздуха [9].

Проточность должна обеспечиваться непрерывно и постоянно контролироваться.

Максимальная проточность обеспечивается на установках, производящих кислород в жидком виде, и на получивших распространение в последнее время так называемых установках с внутренним сжатием. В этих установках производственный кислород отбирается из конденсаторов в жидком виде насосами и испаряется в основных теплообменниках.

Как уже отмечалось, взрывоопасные примеси накапливаются в жидком кислороде, находящемся в конденсаторах-испарителях.

Производственный газообразный кислород из конденсаторов-испарителей или из сборника колонны низкого давления обычно поступает в основной теплообменный узел.

5.3. Опасности выноса капель жидкого кислорода из конденсаторов-испарителей

При недостаточно эффективной конструкции сепаратора, расположенного в верхней части производственного конденсатора, или неправильной организации отбора кислорода из сборника верхней колонны, а также в случае чрезмерного повышения уровня кислорода в конденсаторах-испарителях газообразный кислород, поступающий в основной теплообменный узел (регенераторы, реверсивные и неревверсивные теплообменники), может выносить из конденсаторов достаточно большие количества капель жидкого кислорода, содержащих взрывоопасные примеси.

Попадая, например, в клапанные коробки кислородных регенераторов, капли жидкого кислорода отделяются от потока газа и накапливаются в их нижней части. В период прямого дутья температура в клапанных коробках повышается и находящаяся там жидкость упаривается полностью или частично, а содержащиеся в ней углеводороды остаются в клапанной коробке. Во время работы установки этот процесс многократно

Таблица 8. Количество углеводородов, извлеченных при отопреве из клапанных коробок кислородных регенераторов

Продолжительность работы ВРУ без отопрева, мес	Масса углеводородов ¹ , кг, содержащих различное число атомов углерода			Общая масса, кг
	2—3	4	5—6 и более	
14	0,158/0,03	0,192/0,032	0,051/0,021	0,4/0,091
16	0,167/0,09	0,171/0,14	0,012/0,009	0,35/0,24

¹ В числителе — извлеченных из первого регенератора, в знаменателе — из второго.

повторяется и количество углеводородов, накапливающихся в клапанной коробке, может оказаться достаточно большим и привести к взрыву.

Аналогично накопление взрывоопасных примесей может происходить и в трубопроводах, по которым газообразный кислород, содержащий капли жидкого кислорода, поступает в основной теплообменный узел.

В табл. 8 приведены количества углеводородов, извлеченных при отопреве из клапанных коробок регенераторов и примыкающих к ним трубопроводов.

Взрывы, связанные с выносом из конденсаторов капель жидкого кислорода, загрязненных взрывоопасными примесями, происходили неоднократно. Во всех случаях в клапанных коробках при продувке постоянно обнаруживали жидкость.

На одной из установок взрыв в клапанной коробке произошел непосредственно после заброса в нее капель жидкого кислорода вследствие значительного повышения уровня жидкости в продукционном конденсаторе.

5.4. Концентрирование примесей в жидком кислороде

Содержание взрывоопасных примесей в жидком кислороде, испаряющемся в конденсаторах-испарителях, повышается обратно пропорционально расходу жидкого кислорода, выводимого из аппарата, так как с газообразным кислородом примеси из конденсаторов-испарителей практически не выводятся (исключение составляют метан и в значительной меньшей степени ацетилен).

Минимальное концентрирование примесей в конденсаторах-испарителях происходит, когда весь продукционный кислород выводится из установки в жидком виде. В этом случае обогащение жидкого кислорода взрывоопасными примесями, т. е. отношение содержания примеси в жидком кислороде к содержанию примеси в воздухе, поступающем в установку, не может быть более пяти, даже если не учитывать очистку воздуха от этих примесей.

В то же время на установках, получающих только газообразный кислород, обогащение взрывоопасными примесями жидкого кислорода в продукционном конденсаторе без учета очистки может возрасти в 500–800 раз.

Именно этим объясняется тот факт, что взрывы в конденсаторах-испарителях происходили только на установках, производивших газообразный кислород, а на установках жидкого кислорода взрывов не зарегистрировано.

Более подробно вопросы, связанные с предотвращением взрывов, изложены в работе [3].

Комплекс мероприятий, внедряемых для обеспечения взрывобезопасной работы воздухоразделительных установок, в сводном виде представлен на рис. 8.

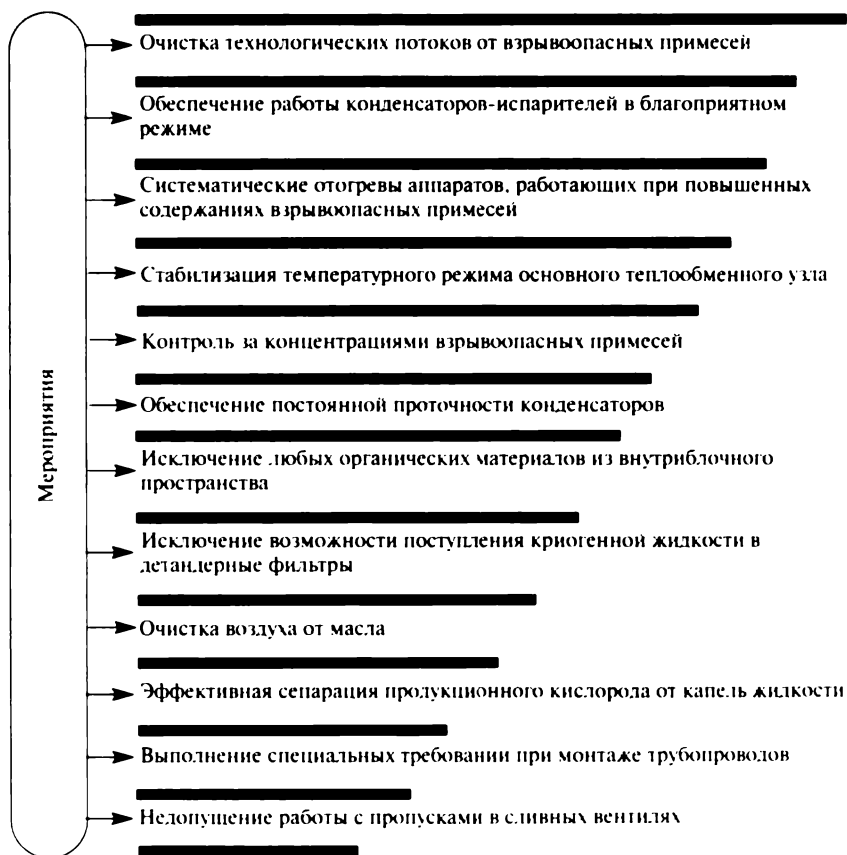


Рис. 8. Мероприятия, обеспечивающие взрывобезопасность воздухоразделительных установок

5.5. Рабочая кампания

Возможность накопления значительных количеств взрывоопасных примесей в аппаратах воздухоразделительных установок обуславливает ограничение продолжительности работы низкотемпературной части установок без отогрева (продолжительности кампании).

Обычно для средних и крупных установок регламентированная руководством по эксплуатации продолжительность кампании составляет 2 года (примерно 16 тыс. ч непрерывной работы). Для мелких установок она принимается от 6 до 12 мес.

Для некоторых узлов установок, работающих при повышенных содержаниях углеводородов в жидком кислороде (выносные конденсаторы-испарители, азотные колонны, узлы получения первичного криптонового концентрата и т. п.), продолжительность кампании обычно ограничивается 3 мес, по истечении которых производится их отогрев без отогрева остальных аппаратов установки (так называемый частичный отогрев).

Удлинение рабочей кампании допускается только по согласованию с разработчиком установки, которое может быть получено только после анализа реальных условий эксплуатации установки, загрязненности жидкого кислорода опасными примесями, параметров работы элементов системы обеспечения взрывобезопасности.

Интервал времени между частичными отогревами может быть увеличен, если содержания опасных примесей в жидком кислороде значительно меньше нормативов.

Глава 6. Средства очистки технологических потоков от опасных примесей

6.1. Общие положения

Взрывобезопасные условия работы воздухоразделительных установок закладываются при их проектировании с учетом заданной загрязненности перерабатываемого воздуха.

В современных воздухоразделительных установках для осуществления взрывобезопасной работы выполняются следующие технологические мероприятия:

- очистка различных технологических потоков от взрывоопасных примесей;

- обеспечение постоянной прочности аппаратов, в которых возможно накопление взрывоопасных примесей;

- обеспечение работы конденсаторов-испарителей в режимах, исключающих опасное накопление углеводородов на теплоотдающих поверхностях;

- систематические отогревы аппаратов, работающих при повышенных содержаниях углеводородов;

- контроль содержаний углеводородов в конденсаторах-испарителях, последних по ходу жидкого кислорода.

Надежная работа установки возможна только в случае, если все перечисленные выше элементы системы обеспечения взрывобезопасности работают надлежащим образом в соответствии с указаниями руководства по эксплуатации установки.

Особенность обеспечения взрывобезопасности воздухоразделительных установок заключается в том, что она неразрывно связана с основным технологическим процессом. Поэтому в подавляющем числе случаев именно работа аппаратчиков, своевременность и точность выполнения ими указаний РЭ и технологических регламентов определяют уровень надежности и безопасности работы установок.

6.2. Цеолитовые блоки комплексной очистки воздуха

Как уже отмечалось, все выпускаемые в настоящее время воздухоразделительные установки оснащаются адсорбционными системами с применением синтетических цеолитов, предназначенными для комплексной очи-

стки воздуха от влаги, диоксида углерода и большинства взрывоопасных примесей, – так называемыми блоками комплексной очистки воздуха.

В БКО обычно входят две работающие попеременно секции, состоящие из одного или нескольких сосудов, заполненных адсорбентом, узла подогрева регенерирующего газа с использованием электро- или пароподогревателей и охладителя очищаемого воздуха.

Технологический цикл работы БКО включает следующие стадии, выполняемые последовательно в каждом адсорбере:

Полуцикл	Адсорбер 1	Адсорбер 2
1		Сброс давления. Регенерация адсорбента путем нагрева очищенным газом до 150 °С и выше. Охлаждение адсорбента очищенным газом. Повышение давления в адсорбере очищенным газом.
2	Очистка воздуха. Сброс давления. Регенерация адсорбента (и так далее)	Очистка воздуха.

Для нагрева воздуха экономически более выгодно использование пароподогревателей, чем электроподогревателей. Однако при применении пароподогревателей всегда имеется опасность увлажнения регенерирующего газа, что может приводить к недопустимому ухудшению эффективности очистки воздуха.

Для комплексной очистки воздуха применяются синтетические цеолиты. Цеолиты (молекулярные сита) – это алюмосиликатные кристаллы, в которых однородная регулярная пористая структура образуется в результате дегидратации. Цеолиты имеют очень тонкие поры, размеры которых соизмеримы с размерами молекул удаляемых примесей.

В БКО используются цеолиты типа NaX (13X), например отечественный цеолит NaX-БКО, выпускаемый ТД «Реал-Сорб» (Ярославль), адсорбционные характеристики которого находятся на уровне характеристик лучших зарубежных цеолитов.

Для снижения энергетических затрат на регенерацию и соответственно улучшения технико-экономических показателей установок адсорберы БКО, работающие при низких давлениях, выполняют двухслойными.

Для осушки воздуха в таких адсорберах обычно используется оксид алюминия.

Использование двухслойных адсорберов позволяет заметно снизить расход энергии на регенерацию цеолита, так как температура, необходимая для регенерации оксида алюминия от влаги, значительно ниже температуры, необходимой для регенерации от влаги цеолита.

На оксиде алюминия удаляются также некоторые содержащиеся в воздухе примеси, которые могут оказывать неблагоприятное влияние на цеолит. При использовании двухслойного адсорбера исключается попадание на цеолит капельной влаги, значительно снижающей прочность цеолита и срок его службы.

В связи с тем, что при проведении текущей регенерации БКО при пониженных температурах невозможно достаточно эффективно удалить из цеолита всю влагу, необходимо проведение при пуске установок так называемой высокотемпературной регенерации с температурой греющего газа на входе в адсорбер до 623 К.

Высокотемпературную регенерацию цеолита целесообразно также проводить периодически и в процессе эксплуатации БКО, так как при пониженных температурах текущих регенераций не обеспечивается достаточно полное удаление из цеолита тяжелых углеводородов, которые накапливаются в слое сорбента и могут начать вытесняться другими компонентами и проскакивать в очищенный воздух.

Оптимальная температура воздуха на входе в БКО находится на уровне 8–12 °С. Поэтому перед очисткой воздух охлаждают в специальных холодильных установках. При этом весьма важным является обеспечение надлежащей работы влагоотделителей, расположенных после охладителя воздуха. В противном случае может происходить вынос из отделителя капельной влаги и недопустимое повышение влажности воздуха, поступающего в БКО, нарушающее его нормальную работу.

На современных установках цикл работы БКО реализуется автоматически. Он предусматривает работу одной секции на стадии очистки воздуха в течение 2,5–3 ч (на небольших и средних установках до 8 ч) в зависимости от размеров адсорберов, затем секции переключаются, и в отключенной секции производится регенерация адсорбента.

На стадии регенерации осуществляется противоточная термическая десорбция адсорбированных примесей путем прогрева цеолита в потоке подогретого чистого газа, от температуры которого зависит эффективность восстановления поглотительной способности адсорбента.

Подогрев регенерирующего газа прекращается после достижения заданной температуры на выходе из слоя цеолита, однако и после этого температура на выходе продолжает некоторое время повышаться вследствие прохождения по адсорберу так называемой тепловой волны. Затем адсорбер должен быть охлажден до температуры, близкой к температуре очищаемого воздуха.

Продолжительность работы секций между регенерациями задается таким образом, чтобы к концу стадии очистки (перед переключением адсорберов) была обеспечена необходимая глубина очистки воздуха от диоксида углерода.

Порядок выхода из слоя цеолита примесей, содержащихся в очищаемом воздухе, следующий:

Цеолит 13X – $\text{CH}_4 - \text{C}_2\text{H}_6 - (\text{C}_2\text{H}_4 - \text{C}_3\text{H}_8) - \text{CO}_2 - \text{C}_2\text{H}_2 - \text{C}_3\text{H}_6 - \text{C}_4\text{H}_{10}$
(данные фирмы Линде);

Цеолит 13X [9] – $\text{CH}_4 - \text{C}_2\text{H}_6 - \text{N}_2\text{O} - \text{C}_2\text{H}_4 - \text{CO}_2 - \text{C}_3\text{H}_8 - \text{NO}_2 - \text{HCl} - \text{SO}_2 - \text{C}_2\text{H}_2 - \text{C}_4\text{H}_{10} - \text{H}_2\text{O}$;

Цеолит NaX (Россия) – $\text{CH}_4 - \text{C}_2\text{H}_6 - (\text{C}_2\text{H}_4 - \text{C}_3\text{H}_8) - \text{CO}_2 - \text{C}_4\text{H}_{10} - \text{C}_3\text{H}_6 - \text{C}_2\text{H}_2$.

Различия в порядке выхода бутана и ацетилена, по-видимому, связаны со структурными особенностями исследованных цеолитов и не имеют существенного практического значения.

Таким образом, при надлежащей очистке воздуха в БКО от диоксида углерода может быть обеспечена также достаточно эффективная очистка воздуха от ацетилена и углеводородов, содержащих четыре и более атома углерода.

Некоторые данные о средней эффективности очистки воздуха в БКО (%), работающих при давлении около 0,6 МПа, от различных углеводородов при их нормальных содержаниях в перерабатываемом воздухе приведены ниже:

Этилен	Этан	Пропан	Пропилен	Ацетилен	$\text{C}_4 - \text{C}_5$	N_2O
10	–	50–60	60–70	Более 98	более 95	–
50	0	67	100	100	100	30–70

Примечание. В верхней строке – обобщенные данные, в нижней – данные, приведенные в работе [9].

Эффективная очистка воздуха в БКО – одно из основных условий взрывобезопасной работы установок разделения воздуха.

Ключевым компонентом, по которому судят о надлежащей работе БКО, обычно является диоксид углерода, содержание которого после БКО необходимо регулярно проверять.

Даже небольшое систематическое повышение содержания CO_2 в воздухе после БКО по сравнению с нормальным уровнем, установленным изготовителем установки, свидетельствует об ухудшении эффективности работы адсорберов. Это может сопровождаться неудовлетворительной очисткой воздуха от взрывоопасных примесей и привести к опасным последствиям. В таких случаях необходимо сократить продолжительность работы адсорберов БКО между регенерациями, проверить и привести в соответствие с РЭ: температурный режим нагрева и охлаждения при регенерации, влажность газа, подаваемого в адсорберы при регенерации, температуру и влажность воздуха, поступающего в БКО, увеличить частоту анализов жидкого кислорода на углеводороды.

6.3. Адсорбционная очистка жидкого кислорода

Предложенные в конце 1950-х годов системы адсорбционной очистки жидкого кислорода в циркуляционном контуре (АОЦК) широко используются в крупных и средних воздуходелительных установках для не-

прерывной очистки жидкого кислорода в конденсаторах-испарителях от диоксида углерода, а также от углеводородов, взрывоопасных в жидком кислороде, и для предотвращения их опасного накопления.

Сущность способа заключается в том, что жидкий кислород, отобранный из конденсатора-испарителя, направляется в адсорбер, а затем возвращается в конденсатор (рис. 9).

Циркуляция кислорода через адсорбер может осуществляться путем использования специального центробежного насоса, насосов, подающих жидкий кислород из сборника верхней колонны в основные конденсаторы, парлифта, а также использования напора столба жидкости, находящейся на верхней трубной решетке конденсатора-испарителя.

По сравнению с применявшимися ранее адсорберами на потоке жидкого кислорода, поступавшего в выносные конденсаторы, описываемый способ очистки имеет ряд серьезных преимуществ: возможность ведения процесса очистки непрерывно, независимо от колебаний содержания примеси на входе в конденсатор; повышенную степень очистки в результате многократного прохождения жидкости через адсорбер; более полное использование адсорбционной емкости сорбента, достигаемое вследствие некоторого повышения концентрации примеси в жидком кислороде.

Исследования показали, что АОЦК обеспечивает достаточно эффективную очистку жидкого кислорода как от примесей, находящихся в жид-

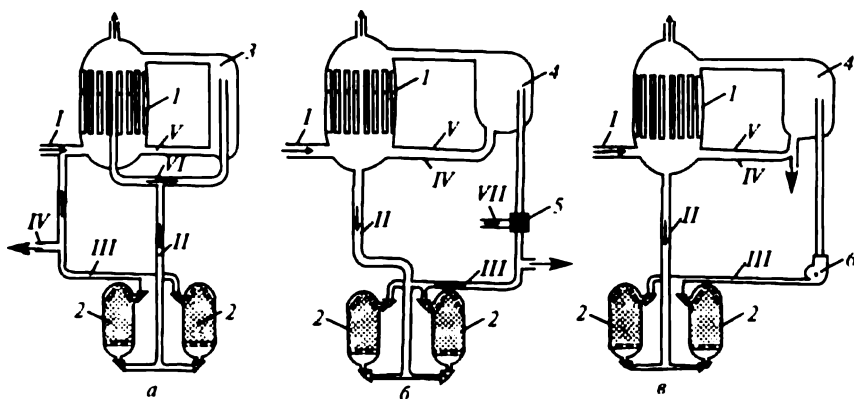


Рис. 9. Способы организации циркуляции жидкого кислорода через адсорберы:

а – с применением конденсатора-испарителя с напорной трубой; б – с применением парлифта; в – с применением центробежного насоса; 1 – конденсатор-испаритель; 2 – адсорберы; 3 – напорный сосуд; 4 – отделитель пара; 5 – смеситель парлифта; 6 – насос; I – вход жидкого кислорода; II – жидкий кислород на адсорбер; III – жидкий кислород из адсорбера; IV – жидкий кислород в последующие аппараты; V – жидкий кислород в конденсаторе; VI – жидкий кислород в напорный сосуд; VII – газ в смеситель парлифта

кости в растворенном виде, так и от примесей, находящихся в жидкости в виде кристаллов или адсорбированных на кристаллах других примесей.

В первом случае жидкость очищается в результате адсорбции примесей на сорбенте, а во втором – в результате фильтрования кристаллов в слое сорбента.

Преимущества применения АОЦК по сравнению с адсорберами, установленными перед конденсатором-испарителем, наиболее эффективно реализуются по примесям, растворенным в жидком кислороде.

Можно выделить следующие режимы работы систем АОЦК:

режим «опорожнение» – от момента включения в работу отрегенерированного адсорбера до наступления равновесного состояния, соответствующего работе адсорбера при постоянной проскоковой концентрации;

режим «стационарный», характеризующийся постоянной степенью очистки. Продолжительность этого режима определяется динамической емкостью сорбента;

режим «буферный», когда реализуется дополнительная адсорбционная емкость сорбента, появляющаяся в результате повышения содержания примеси в конденсаторе-испарителе и соответственно в потоке перед адсорбером.

Если адсорбер переключают для регенерации до насыщения сорбента рассматриваемой примесью, то система работает только в «стационарном режиме».

Если принять, что в конденсаторе-испарителе обеспечивается полное перемешивание жидкого кислорода, то изменение содержания примеси в нем при работе АОЦК при постоянной концентрации примеси на входе в контур может быть с достаточной точностью описано следующими зависимостями:

для режима «опорожнение»:

$$C = C'e^{-at} + C_k(1 - e^{-at}); \quad (1)$$

$$f = 1 - C'/C; \quad (2)$$

$$C_k = BC_v/(K_{\text{ж}} + fK_{\text{ц}}), \quad (3)$$

где C и C' – концентрации примесей до и после адсорбции соответственно; t – продолжительность процесса; B – расход воздуха; C_v – концентрация примеси на входе в узел ректификации; $K_{\text{ж}}$ и $K_{\text{ц}}$ – расход жидкого кислорода, выводимого из системы, и расход жидкого кислорода, циркулирующего через адсорбер соответственно; f – степень очистки в адсорбере;

$$a = (K_{\text{ж}} + K_{\text{ц}}f)/V_k, \quad (4)$$

где V_k – объем жидкости в конденсаторе;

для режима «стационарный»:

$$T_2 = G\Gamma/(fK_{\text{ц}}), \quad (5)$$

где T_2 – продолжительность стационарного режима; G – количество сорбента в адсорбере; Γ – динамический коэффициент адсорбции.

По данным Д.И. Масумова, при температуре 90 К и скорости потока $\alpha = 20$ см/мин значения Γ составляют:

для этилена 120, пропана 240, н-бутана 490, н-пентана 1260.

В режиме «буферный» емкость сорбента повышается по мере возрастания концентрации примеси в жидкости, поступающей в адсорбер.

Примем, что в этот период

$$K_{II}Cd\tau - K_{II}C'd\tau = Gda_g = G\Gamma dC, \quad (6)$$

где C и C' – концентрации примеси до и после адсорбера соответственно.

В этом случае изменение концентрации примеси в жидком кислороде конденсатора-испарителя описывается зависимостью

$$C = C_{K1}e^{-bt} + C_{K2}(1 - e^{-bt}), \quad (7)$$

$$\text{где } C_{K2} = (BC_n)/K_{ж}; \quad (8)$$

$$b = K_{ж}/(V + G\Gamma). \quad (9)$$

Исследования показали, что скорость повышения концентрации примесей в жидком кислороде конденсатора, оснащенного АОЦК, значительно ниже, чем при отсутствии такой системы, даже для примесей с небольшими значениями динамической емкости.

Необходимо отметить, что процесс включения в работу отрегенерированного адсорбера рассмотрен упрощенно, так как принято, что соответствующая стационарным условиям проскоковая концентрация за адсорбером устанавливается мгновенно.

Примем, что в период «опорожнение» проскоковая концентрация изменяется по уравнению

$$C'/C = 1 - e^{-dt}, \quad (10)$$

$$\text{где } d = \gamma/H; \quad (11)$$

$$\gamma = \alpha/\Gamma \quad (12)$$

представляет собой скорость перемещения фронта; α – скорость движения жидкости в адсорбере; H – высота слоя.

Таким образом, $f = e^{-dt}$, где f – степень очистки.

В этом случае дифференциальное уравнение, описывающее накопление примеси в конденсаторе-испарителе, следующее:

$$\frac{dc}{dt} + \frac{(K_{ж} + K_{с}e^{-dt})C}{V} - \frac{BC_n}{V} = 0. \quad (13)$$

Можно показать, что уравнение (13) имеет решение:

$$C = (Q \int_0^t \exp\{(K_{ж}t)/V + [1 - \exp(-dt)]K_{с}/(Vd)\}dt + C_0) \times \exp\{(-K_{ж}t)/V + [1 - \exp(-dt)]K_{с}/(Vd)\}, \quad (14)$$

где $Q = BC_n/V$; B – расход воздуха.

В уравнениях материального баланса, на основе которых получены приведенные выше уравнения, учитывались только материальные потоки

рассматриваемого контура. Однако примеси выводятся из контура и в результате их накопления на теплоотдающих поверхностях при испарении жидкого кислорода. Данные по накоплению диоксида углерода и углеводородов на теплоотдающих поверхностях позволяют учесть и эту составляющую в уравнениях материального баланса.

Проведенные расчеты показали, что это может быть оправданно, когда рассматривается контур, не оснащенный системой АОЦК, и проточность составляет менее 0,01 от количества перерабатываемого воздуха. В этом случае расчетные концентрации примесей в жидком кислороде с учетом их накопления на теплоотдающих поверхностях примерно на 25% меньше рассчитанных без учета такого накопления.

При работе АОЦК влияние накопления примесей на теплоотдающих поверхностях значительно меньше, чем без системы очистки, и не превышает 6%.

Исследования показали, что «степень очистки» в адсорберах на потоке жидкого кислорода непостоянна и может уменьшаться с возрастанием нагрузки на адсорбер. Не менее важно, что коэффициент динамической активности сорбентов возрастает по мере увеличения нагрузки.

В то же время в реальных условиях содержание примесей в перерабатываемом воздухе изменяется в достаточно широких пределах, в связи с чем происходит изменение и содержания примесей в жидком кислороде. При работе адсорберов в таких условиях нельзя исключать возможности определенного вымывания примесей из слоя адсорбента.

Уравнение (1) получено при постоянном содержании примеси в перерабатываемом воздухе. Для переменного содержания примеси в воздухе получены следующие зависимости:

$$C = \exp(-at) \left[\int_0^t \exp(at) Q(t) dt + C_0 \right], \quad (15)$$

где в режиме до насыщения адсорбера

$$a = (K_{\text{ж}} + fK_{\text{л}})/V; \quad (16)$$

$$Q(t) = C_{\text{в}}(t)B/V, \quad (17)$$

а в режиме после насыщения адсорбера

$$a = K_{\text{ж}}/(V + G\Gamma); \quad (18)$$

$$Q(t) = C_{\text{в}}(t)B/(V + G\Gamma). \quad (19)$$

Расчеты показали, что динамическая устойчивость системы конденсатор-испаритель – адсорбционный циркуляционный контур к колебаниям концентрации примесей в потоке поступающего жидкого кислорода, или, что то же самое, к колебаниям концентрации примесей в потоке до узла ректификации, весьма велика (она определяется величиной $G\Gamma$). Поэтому кратковременные изменения содержания примесей в потоке до конденсатора-испарителя должны оказывать небольшое влияние на содержание

примесей в жидком кислороде системы АОЦК, которое должно изменяться достаточно плавно.

Однако при рассмотрении концентраций углеводородов в жидком кислороде на промышленных установках, в том числе и оснащенных цеолитовыми блоками комплексной очистки воздуха, выявляется значительный разброс значений в течение суток (иногда до 5–10 раз). Это можно объяснить только тем, что результаты анализов не соответствуют среднему содержанию примесей во всем объеме жидкого кислорода, что может быть обусловлено присутствием примесей в жидком кислороде в виде кристаллов или в адсорбированном виде на кристаллах других примесей и неравномерным распределением этих кристаллов в жидком кислороде.

Как уже отмечалось, одним из решающих факторов, определяющих взрывобезопасность воздухоразделительных установок, является накопление опасных примесей на теплоотдающих поверхностях конденсаторов-испарителей. Интенсивность этого процесса пропорциональна концентрации примесей в испаряемом кислороде. Применение систем АОЦК позволяет значительно снизить концентрации опасных примесей в жидком кислороде и, следовательно, значительно повысить взрывобезопасность.

Расчеты показали, что эффективность применения АОЦК тем выше, чем меньше доля жидкого кислорода, выводимого из контура. При этом даже временная работа установки с отключенным АОЦК должна приводить к многократному возрастанию содержания примесей в жидком кислороде.

Продолжительность работы адсорберов АОЦК между регенерациями обычно устанавливается исходя из продолжительности защитного действия по CO_2 , который рассматривается как ключевой компонент, всегда присутствующий в жидком кислороде. В контуре АОЦК обычно предусматриваются два параллельно работающих адсорбера, включаемых в работу со сдвигом 1–2 сут. При отключении одного из адсорберов на регенерацию второй обеспечивает надлежащую очистку.

В некоторых случаях предусматривается только один адсорбер, на время регенерации которого должна обеспечиваться проточность, исключающая опасное накопление углеводородов. Необходимая величина проточности рассчитывается по приведенным выше зависимостям.

Скорость изменения концентрации примесей в жидком кислороде при отключении системы АОЦК определяется динамическими свойствами аппарата, где происходит накопление примесей, и характеризуется отношением расхода выводимой жидкости (P_p) к ее объему в аппарате (V):

$$a = P_p / V. \quad (20)$$

Если при работе АОЦК изменяются условия работы (изменяется проточность, расход циркулирующей жидкости или отключается адсорбер),

то система переходит в новое состояние. В этом случае изменение концентрации примеси в жидком кислороде описывается зависимостью

$$C = C_{\text{нач}} e^{-at} + C_{\text{кон}} (1 - e^{-at}), \quad (21)$$

где $C_{\text{нач}}$ – исходная концентрация примесей в аппарате; $C_{\text{кон}}$ – расчетная концентрация примесей в аппарате при изменении проточности или при отключении адсорбера; a – динамический коэффициент, $1/\text{ч}$; t – время, ч.

Расход жидкости, циркулирующей в системах АОЦК, – это один из наиболее существенных факторов, определяющих их эффективность. Проверка расхода должна производиться не реже 1–2 раз в смену.

6.4. Особенности эксплуатации жидкостных адсорберов

Эффективность и надежность работы жидкостных адсорберов воздуходелительных установок в значительной степени определяются качеством загруженного адсорбента.

Заполнение адсорберов производят перед пуском блока разделения после монтажа или ремонта.

Марка адсорбента должна быть подтверждена заводом-изготовителем. Независимо от этого перед использованием адсорбента необходимо произвести лабораторную проверку влагоемкости и насыпной плотности силикагеля по ГОСТ 3956–76. Образец загружаемого адсорбента и его сертификат должны храниться в течение всего времени его работы.

Для удаления пыли и мелких частиц адсорбент перед загрузкой должен быть просеян через сито с отверстиями размером 2,7 мм. В случаях, предусмотренных руководством по эксплуатации, допускается засыпка адсорбента с отдувкой пыли.

После просеивания адсорбент необходимо просушить. Силикагель сушат до постоянной насыпной массы либо в специальных печах, либо на противнях при температуре 463–493 К (180–220 °С), либо продувкой адсорбента азотом, подогретым до температуры 473–493 К (200–220 °С).

Такая сушка может быть заменена высокотемпературной регенерацией адсорбента непосредственно в адсорбере.

Высушенный адсорбент необходимо сразу же загрузить в адсорбер или хранить в условиях, исключающих его соприкосновение с атмосферным воздухом. Для предотвращения увлажнения адсорбента, загруженного в адсорбер, все вентили должны быть закрыты как во время засыпки, так и после заполнения адсорбера.

Для получения хорошо уплотненного слоя адсорбент следует засыпать небольшими порциями.

При засыпке адсорбента следует принимать меры, предотвращающие его измельчение. Засыпка адсорберов производится до полного заполнения насыпной трубы.

Для обеспечения эффективной очистки адсорбент периодически подвергают регенерации.

Различают высокотемпературную регенерацию, при которой из адсорбента удаляется влага, и регенерацию от других примесей, проводимую при более низких температурах.

Для регенерации адсорберов необходимо использовать азот или воздух, точка росы которых не превышает 233 К (-40°C), содержащие масло не более $0,05\text{ мг/м}^3$.

В тех случаях, когда подогрев регенерирующего газа производят паром или горячей водой, необходимо перед проведением регенерации проверить плотность подогревателя и продуть коммуникации во избежание подачи в адсорбер влажного газа при неплотностях подогревателя.

Направление потока регенерирующего газа при всех видах регенерации должно быть противоточным по отношению к очищаемому потоку. Это необходимо для обеспечения эффективного выноса примесей из адсорбента и сокращения требуемого для этого времени.

Расход регенерирующего газа должен соответствовать расходу, указанному в «Руководстве по эксплуатации». При более высоком расходе газа может происходить истирание адсорбента.

Высокотемпературная регенерация адсорбента осуществляется непосредственно в адсорбере в следующих случаях: перед первым пуском установки после монтажа; перед пуском установки после ее полного отогрева; в случае обнаруженного в процессе работы ухудшения адсорбционных свойств адсорбента, причиной которого может быть его увлажнение.

Нагрев газа, подаваемого в адсорбер в начальный период высокотемпературной регенерации силикагеля, до температуры на выходе из адсорбера 333 К (60°C) необходимо вести так, чтобы разность между температурами газа на входе и выходе не превышала 313–323 К ($40\text{--}50^{\circ}\text{C}$).

После повышения температуры до 333 К перепад температур не ограничивается.

Высокотемпературную регенерацию силикагеля в адсорберах, изготовленных из нержавеющей стали, проводят при температуре на входе в адсорбер 473–483 К ($200\text{--}210^{\circ}\text{C}$) и заканчивают при температуре газа на выходе 418–423 К ($145\text{--}150^{\circ}\text{C}$). При этом регенерацию считают законченной, если точка росы газа на выходе из адсорбера не превышает 243 К (-30°C) и она не возрастает в течение 1 ч. Если влагосодержание газа на выходе из адсорбера не определяют, регенерацию следует продолжать при указанных температурах не менее 2 ч.

После окончания высокотемпературной регенерации адсорбент необходимо охладить в потоке сухого газа до температуры, превышающей температуру на воздухе на входе в установку не более чем на $10\text{--}15^{\circ}\text{C}$, и отключить адсорбер от всех коммуникаций. Оставлять нагретый адсор-

бент для естественного остывания нельзя, так как это может привести к подсосыванию в аппарат влажного воздуха и увлажнению адсорбента.

Нормальную регенерацию адсорберов следует начинать сразу же после удаления из них жидкости.

В начальный период регенерации в адсорбер в течение 10–20 мин подают газ при температуре окружающей среды. Затем включают подогреватель регенерирующего газа, и температура на входе в адсорбер повышается до 403–423 К (130–150 °С) для адсорберов, выполненных из нержавеющей стали, и до 403 К для адсорберов, выполненных из алюминиевых сплавов. После достижения на выходе из адсорбера температуры 353–363 К (80–90 °С) должна быть обеспечена выдержка адсорбента при такой температуре в течение периода времени, указанного в «Руководстве по эксплуатации». Затем адсорбент охлаждают аналогично тому, как это описано выше для высокотемпературной регенерации.

Если после проведения любой регенерации адсорбер не предполагается сразу же включать в работу, то для предотвращения попадания в него влажного воздуха целесообразно поднять в адсорбере давление до рабочего и оставить аппарат под давлением.

Продолжительность работы адсорберов между регенерациями определяется «Руководством по эксплуатации».

При параллельной работе адсорберов их регенерация проводится друг за другом с разрывом не более 2–3 сут. Это делается для того, чтобы сопротивления адсорберов отличались как можно меньше. Для проведения регенерации адсорбер отключают, предварительно включив в работу второй адсорбер. Если они работают параллельно, то при регенерации одного из них весь поток жидкости переводят на второй адсорбер.

Данные о режиме регенерации адсорбента необходимо заносить в специальный журнал, в котором следует каждый час до охлаждения адсорбера регистрировать расход и температуру газа на входе в адсорбер и выходе из него, а по окончании регенерации – номера вентиляей, через которые производилась подача газа.

Глава 7. Особенности накопления взрывоопасных примесей в конденсаторах-испарителях

7.1. Общие положения

Как уже отмечалось, взрывоопасные примеси, поступая в воздухоразделительные установки с перерабатываемым воздухом, накапливаются в конденсаторах-испарителях.

По условиям, в которых протекает процесс испарения жидкого кислорода, испарители можно разделить на две группы: испарители, где теплоносителем является конденсирующийся криогенный продукт (азот или воздух) — так называемые конденсаторы-испарители, и испарители, в которых теплоноситель не меняет агрегатного состояния.

Для конденсаторов-испарителей характерна практически постоянная разность температур в зоне испарения жидкого кислорода и соответственно постоянный тепловой поток по длине теплоотдающей поверхности. В испарителях температура теплоносителя изменяется в достаточно широких пределах по длине парогенерирующего канала.

Накопление взрывоопасных примесей может происходить в различных формах:

а) в растворенном виде в жидком кислороде до содержаний, при которых устанавливается материальный баланс между количеством примеси, вводимой в аппарат и выводимой из него (гомогенное накопление);

б) в виде отложений на теплоотдающих поверхностях при испарении кислорода (гетерогенное накопление);

в) в виде молекулярных слоев на поверхностях аппаратов вследствие адсорбции. В последнем случае взрывоопасные условия не могут возникнуть. Поэтому эта форма накопления далее не рассматривается.

Интенсивное накопление большинства углеводородов в жидком кислороде при его испарении обуславливается их малой летучестью при низких температурах.

Со сравнительно небольшой погрешностью можно считать, что содержание подавляющего числа углеводородов в жидком кислороде повышается обратно пропорционально доле жидкости, выводимой из аппарата. Так, если из конденсатора-испарителя в жидком виде выводится 0,01 расхода испаряемой жидкости, то содержание углеводородов в жидком

кислороде, находящемся в этом аппарате, будет примерно в 100 раз выше, чем в жидкости, поступающей в конденсатор-испаритель. Исключение составляют метан и ацетилен, для которых при подобных расчетах необходимо учитывать вынос примеси с паром. Содержание ацетилена в рассмотренном выше случае повысится в 28 раз, а метана только в 3,3 раза.

Обеспечение проточности конденсаторов-испарителей (вывод из них кислорода в жидком виде) является наиболее эффективным средством уменьшения концентрирования в них взрывоопасных примесей.

На установках малой производительности проточность основного конденсатора-испарителя обычно обеспечивается путем вывода из него жидкого кислорода, подаваемого потребителю после испарения в виде газа высокого давления, а также в некоторых случаях путем слива жидкого кислорода в криогенные сосуды.

Предусмотренный руководством по эксплуатации слив жидкого кислорода должен обеспечиваться при любых условиях работы установки.

Технологические схемы современных воздухоразделительных установок строят таким образом, чтобы была обеспечена проточность всех аппаратов, где кипят кислород или жидкости, обогащенные кислородом.

Недопустимо работать по схемам, не обеспечивающим необходимую проточность, за исключением случаев, предусмотренных инструкцией. Например, во время отогрева выносных конденсаторов допускается временная работа основных конденсаторов с меньшей проточностью, чем предусмотрена для нормальных условий, путем слива жидкости в витой испаритель-конденсатор.

Жидкий кислород, сливаемый из аппаратов для обеспечения проточности, должен испаряться в предназначенных для этого испарителях, которые должны работать при температуре воды в ванне не менее 353 К (80 °С).

Запрещается эксплуатировать установки при неисправном приборе, определяющем расход сливаемой жидкости.

7.2. Гомогенное накопление примесей

Гомогенное накопление углеводородов, т. е. накопление во всем объеме жидкости, характеризуется их содержанием в жидком кислороде. При содержаниях примесей в жидком кислороде, превышающих растворимость, может происходить выделение примесей из раствора в виде новой твердой или жидкой фазы. (При существующих нормативах на содержания углеводородов в жидком кислороде кристаллизация примесей из раствора исключается.)

Взрывоопасные условия при гомогенном накоплении углеводородов в жидком кислороде могут возникнуть только тогда, когда суммарное содержание углеводородов (или содержание отдельной примеси) превысит ~5 % об. Реально содержания углеводородов могут достигать таких значе-

ний только в оборудовании для получения первичного криптонового концентрата, где принимают специальные меры для уменьшения выноса примесей с газообразным кислородом.

Содержание взрывоопасных примесей в жидком кислороде определяет в конечном счете интенсивность образования их отложений на теплоотдающих поверхностях при испарении жидкого кислорода.

7.3. Гетерогенное накопление примесей

Процесс образования отложений примесей при испарении жидкого кислорода принципиально не отличается от процессов образования отложений в парогенерирующем тракте котельных установок и в выпарных аппаратах.

Интенсивность образования отложений, т. е. скорость увеличения толщины их слоя, пропорциональна содержанию взрывоопасных примесей в жидком кислороде. Она в значительной степени зависит от особенностей конструкции конденсатора-испарителя, размеров парогенерирующих каналов, от теплового и гидродинамического режимов испарения жидкого кислорода.

Типы конденсаторов-испарителей

Рассмотрим наиболее распространенные типы конденсаторов-испарителей.

Длительное время в воздухоразделительных установках эксплуатируются *конденсаторы-испарители с межтрубным кипением*. В этих аппаратах жидкий кислород кипит в межтрубном пространстве, а пары азота конденсируются внутри трубок и стекают по их поверхности вниз. Такой конденсатор-испаритель представляет собой вертикальный прямотрубный аппарат (рис. 10), состоящий из верхней и нижней трубных решеток, трубок, крышек конденсатора и наружной обечайки. Число трубок составляет от 450 до 8000, длина трубок от 350 до 1500 мм, наружный диаметр трубок 9–12 мм.

В большинстве случаев конденсаторы-испарители этого типа

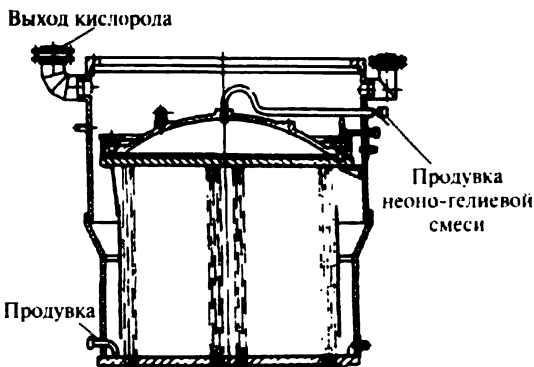


Рис. 10. Конденсатор-испаритель с межтрубным кипением

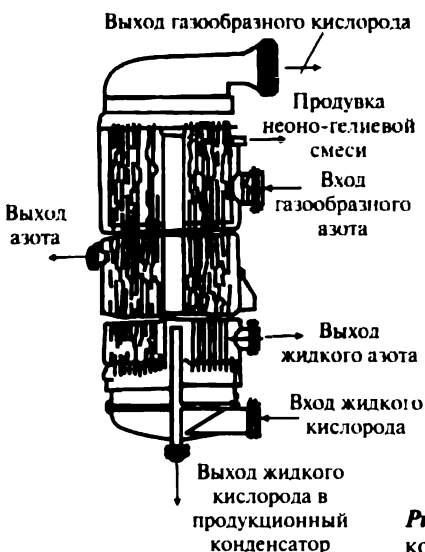
конструктивно объединяют с ректификационными колоннами и располагают между колоннами высокого и низкого давления.

В современных конденсаторах-испарителях этого типа на трубный пучок надевают тонкую обечайку, предназначенную для организации движения жидкого кислорода внутри аппарата. Жидкий кислород подают в пространство между наружной и внутренней обечайками, и он далее поступает к парогенерирующим трубкам. Образующаяся парожидкостная смесь поступает в верхнюю часть аппарата и переливается в пространство между обечайками. Такая циркуляция жидкости возможна только при достаточно больших относительных уровнях жидкого кислорода (более 0,6 расстояния между трубными решетками).

В *длиннотрубных конденсаторах-испарителях с внутритрубным кипением* жидкий кислород испаряется внутри трубок, а азот конденсируется на их наружной поверхности. В установках большой производительности такие конденсаторы объединяют в группы, состоящие из двух и более параллельно или последовательно работающих аппаратов.

Конденсатор-испаритель выполняется в виде вертикального прямотрубного аппарата (рис. 11), состоящего из трубных решеток, трубок, опускной трубы, наружной обечайки и крышек. Наиболее распространенными являются конденсаторы-испарители с длиной трубок около 3 м; внутренний диаметр трубок обычно равен 9 мм. Число трубок в одном конденсаторе составляет от 1000 до 15000.

Жидкий кислород подается в нижнюю часть аппарата, он поступает в



трубки, где частично испаряется. Пар вместе с жидкостью выходит на верхнюю трубную решетку, откуда жидкость по центральной (опускной) трубе возвращается в нижнюю часть конденсатора-испарителя. Таким образом, жидкость циркулирует в конденсаторе-испарителе, а ее расход при нормальной работе аппарата в шесть и более раз превышает расход образующегося пара. Вследствие циркуляции жидкости конденсаторы этого типа иногда называют конденсаторами-испарителями с естественной циркуляцией. Отношение расхода жидкости, поступающей в парогенери-

Рис. 11. Прямотрубный длиннотрубный конденсатор-испаритель

рующие трубки, к расходу образующегося пара называют *кратностью циркуляции*.

Работа конденсаторов указанного типа в режиме кипения с необходимой кратностью циркуляции обеспечивается соответствующим уровнем жидкого кислорода в опускной системе. Величина этого уровня зависит от условий работы конденсатора-испарителя (давления кислорода и азота и их концентраций).

При снижении уровня жидкого кислорода ниже определенной величины или уменьшении давления азота циркуляция жидкого кислорода может вообще прекратиться. В этом случае говорят, что конденсатор перешел в «сухой» режим кипения.

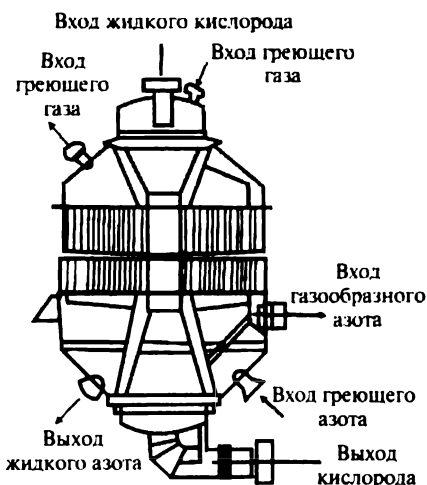
На ряде старых установок в качестве дополнительных (выносных) конденсаторов используются *витые конденсаторы-испарители с подачей жидкого кислорода сверху*.

Использование этих аппаратов позволяет существенно увеличить расход жидкого кислорода, выводимого из основных конденсаторов-испарителей, и значительно уменьшить накопление в них взрывоопасных примесей.

Конструктивно такой конденсатор (рис. 12) состоит из пучка витых трубок, впаянных в трубные доски и заключенных в обечайку. Жидкий кислород подается в верхнюю часть аппарата и испаряется внутри трубок, диаметр которых составляет 9 мм, длина до 14 м; число трубок от 100 до 1000. Для нормальной работы таких аппаратов необходимо обеспечить равномерное распределение жидкости по всем трубкам. Сделать это весьма сложно, так как пар стремится двигаться в направлении, противоположном движению жидкости (вверх) и, по-видимому, несмотря на принимаемые меры, жидкость не распределяется равномерно по трубкам. Поэтому то одни, то другие трубки работают в «сухом» режиме, при котором не вся их поверхность омывается жидкостью.

На современных установках средней и большой производительности для упаривания жидкого кислорода, содержащего наибольшее количество углеводородов, используют *конденсаторы-испарители витого типа с подачей жидкого кислорода снизу*.

Рис. 12. Витой длиннотрубный конденсатор



В этих аппаратах (рис. 13) жидкий кислород испаряется в 3–6 трубках диаметром 24 мм, длиной около 8 м, свернутых в змеевик. В верхней части аппарата находится отделитель пара, часть жидкости из которого выводится в теплый испаритель, а остальная возвращается на вход аппарата.

Конденсаторы-испарители *пластинчато-ребристого типа* (рис. 14) состоят из нескольких пакетов, размещаемых в цилиндрической емкости, служащей сборником жидкого кислорода. Каждый пакет представляет собой чередующиеся открытые вертикальные каналы шириной 6 мм, в которых кипит кислород, и закрытые каналы, в которых конденсируется азот. Закрытые каналы объединены коллекторами, по которым подводится газообразный азот и отводится жидкий. Внутри каналов находится насадка толщиной 0,2 мм, которая разделяет их на элементарные каналы сечением 6×3 мм. Изготавливаются такие аппараты из алюминиевых сплавов, причем пакеты после сборки подвергают пайке в специальных печах.

Аналогично прямотрубным конденсаторам-испарителям с внутритрубным кипением в пластинчато-ребристых конденсаторах-испарителях обеспечивается естественная циркуляция жидкого кислорода: жидкость входит в пакет, в нем частично испаряется и выбрасывается через верхнюю часть пакета в емкость.

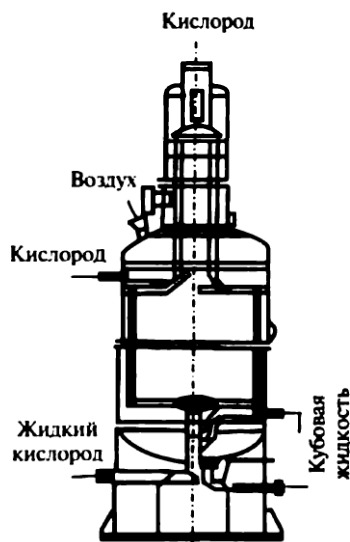
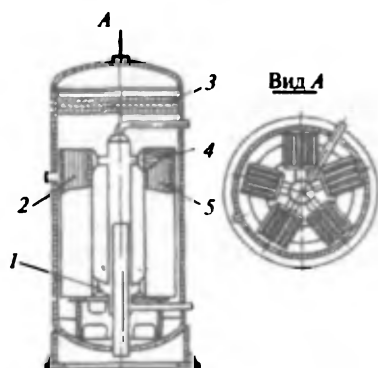


Рис. 13. Витой испаритель-конденсатор с подачей испаряемой жидкости снизу
Рис. 14. Пластинчато-ребристый конденсатор-испаритель:

1 – коллектор слива конденсата; 2 – каналы кипения; 3 – сепаратор; 4 – коллектор газообразного азота; 5 – каналы конденсации



В последние годы на отечественных воздухоразделительных установках нашли достаточно широкое применение *длиннотрубные конденсаторы-испарители с межтрубным кипением*, у которых на стороне кипения нанесено *капиллярно-пористое покрытие*, и конденсаторы-испарители, у которых на парогенерирующих трубках имеется *наружное поперечное оребрение*.



Рис. 15. Трубка с наружным поперечным оребрением

Конструктивно такие конденсаторы-испарители выполняются витого типа и представляют собой пучок парогенерирующих трубок, помещенный в резервуар с жидким кислородом.

Технологические и технико-экономические показатели таких аппаратов находятся на уровне, близком к уровню аналогичных показателей конденсаторов-испарителей пластинчато-ребристого типа.

Внешний вид трубки с наружным поперечным оребрением показан на рис. 15.

На современных воздухоразделительных установках большой и средней производительности в основном применяются конденсаторы-испарители пластинчато-ребристого типа.

7.4. Гидродинамические условия в парогенерирующих каналах и процесс образования отложений

Рассмотрим, как изменяется характер движения потока в канале, каким является, в частности, парогенерирующий канал (или парогенерирующая трубка) конденсатора-испарителя.

Характер движения потока изменяется по длине парогенерирующего канала. Если температура жидкости, поступающей в канал, ниже температуры кипения, в нижней части канала имеется так называемая *экономайзерная зона*, где жидкость подогревается. В этой зоне по каналу движется «светлая» жидкость, не содержащая пара. Затем на поверхности канала образуются отдельные центры парообразования. По мере передвижения парожидкостного потока вверх мелкие пузырьки объединяются в крупные, и течение потока приобретает «поршневой» характер.

При этом каждый «поршень» перемещает перед собой жидкостную пробку. Одновременно часть жидкости передвигается в виде тонкой пленки между «поршнем» и стенкой канала. Далее скорость потока возрастает, и жидкостные перегородки разрушаются. При этом структура потока переходит в «стержневую»: пар движется в средней части канала, увлекая за собой жидкость, которая поднимается по стенке в виде пленки. При условиях, типичных для конденсаторов-испарителей воздухоразделительных установок, область стержневого кипения в канале занимает примерно 60%

от его длины, толщина пленки жидкости на выходе из канала 0,4–0,6 мм, истинная скорость движения пленки жидкости 0,2–0,3 м/с.

В качестве показателя, характеризующего гидродинамический режим кипения кислорода в каналах, часто используют величину кратности циркуляции. Она зависит от удельного теплового потока, который определяется разностью температур между кипящим кислородом и конденсирующимся азотом, с одной стороны, и относительным уровнем жидкого кислорода в опускной системе с другой, т. е. отношением уровня жидкого кислорода в опускной системе к длине парогенерирующей части канала.

С уменьшением удельных тепловых нагрузок и относительного уровня кислорода кратность циркуляции также уменьшается. При этом в области малых тепловых нагрузок и относительных уровней наблюдают значительную неравномерность процесса кипения. Она выражается в периодических вскипаниях, происходящих со столь большими интервалами, что верхняя часть канала определенное время оказывается не смоченной жидким кислородом, хотя жидкость продолжает выбрасываться вместе с паром. Полное прекращение циркуляции происходит при относительных уровнях ниже 0,25.

Процесс образования отложений на парогенерирующих поверхностях зависит от того, в каком виде примеси находятся в жидком кислороде.

Отложения растворенных в кислороде примесей образуются в результате упаривания жидкости в центре парообразования в период роста пузырька пара.

Цикл работы центра парообразования, сопровождающийся формированием слоя отложений, схематично показан на рис. 16. В какой-то момент времени в одном из центров парообразования происходит зарождение пузырька пара. При росте пузырька вследствие испарения жидкости в паровой пузырек на границе раздела фаз увеличивается концентрация примесей, содержащихся в испаряемой жидкости, вплоть до насыщения, и начинается их кристаллизация. Это приводит к образованию под пузырьком слоя отложений, первоначально имеющего кольцевую форму.

В то же время в период «молчания» центра парообразования ранее образовавшиеся отложения могут растворяться в омывающей жидкости.

От момента отрыва пузырька и до начала роста следующего образовавшегося ранее отложения могут частично растворяться.

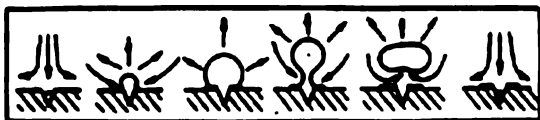


Рис. 16. Стадии работы центра парообразования и образования отложений

Отложения примесей, находящихся в жидком кислороде в виде кристаллов, образуются в результате адгезии (прилипания) кристаллов к парогенерирующей поверхности в ре-

зультате возникновения электростатических сил при движении кристаллов в жидком кислороде.

Отложения, образующиеся на теплоотдающих поверхностях при кипении жидкого кислорода, имеют, как правило, достаточно сложный состав и могут включать в себя:

а) кристаллы примесей, находящихся в жидком кислороде в растворенном виде. Эти отложения первично состоят из кристаллов отдельных примесей, на поверхности которых могут быть затем адсорбированы другие примеси, содержащиеся в жидком кислороде. К примесям, которые могут образовывать такие отложения, относятся диоксид углерода, углеводороды, содержащие три и более атомов углерода, и ацетилен;

б) кристаллы примесей и конгломераты кристаллов примесей, образовавшиеся при охлаждении воздуха в основном теплообменном узле. При образовании кристаллов и конгломератов может происходить захват других примесей, содержащихся в воздухе. На поверхности таких кристаллов могут быть адсорбированы и другие примеси;

в) кристаллы, состоящие из совместных гидратов азота, а иногда и других примесей, входящих в состав воздуха;

г) кристаллы примесей, образовавшиеся при разложении гидратов.

Отложения по пп. б, в, г образуются в результате адгезии кристаллов на теплоотдающих поверхностях.

Возможность образования указанных выше составляющих отложений и их соотношение определяются давлением, при котором охлаждается воздух до криогенных температур, его влажностью на входе в основной теплообменный узел и концентрациями примесей в воздухе.

В конденсаторах-испарителях установок низкого давления могут образовываться отложения только первых двух видов, так как образование гидратов в таких установках маловероятно.

Экспериментально показано, что количество образующихся отложений пропорционально содержанию примеси в испаряемой жидкости и в большой степени зависит от удельного теплового потока. Установлено также определяющее влияние гидродинамических условий на интенсивность образования отложений.

При малых кратностях циркуляции слой отложений углеводородов взрывоопасной толщины (более 25–50 мкм) может образоваться уже за 200–500 ч даже при сравнительно малых содержаниях углеводородов в жидком кислороде.

В то же время при благоприятных гидродинамических режимах, обеспечиваемых при условиях, рекомендованных инструкциями по эксплуатации установок, время, необходимое для образования взрывоопасного слоя углеводородов, превышает 2000 ч даже при содержаниях углеводородов на уровне нормативов. Таким образом, при соблюдении параметров работы конденсаторов-испарителей, заложенных в инструк-

ции, гарантируется надежная и безопасная работа конденсаторов-испарителей.

Сказанное выше справедливо только в случае, если все парогенерирующие каналы конденсатора-испарителя работают идентично. При нарушенной проходимости каналов (один или несколько каналов забиты посторонними частицами, деформированы или просто запаяны) гидродинамический режим работы становится крайне неблагоприятным и в каналах происходит интенсивное накопление примесей, содержащихся в испаряемом жидком кислороде, что приводит к разрушению каналов в результате микровзрывов. Поэтому, например, при ремонтах длиннотрубных конденсаторов-испарителей обязательной является прочистка шомполом каждой трубки или проверка их проходимости. В случаях обнаружения в конденсаторах трубок, имеющих переток из кислородной полости в азотную, должны быть заглушены не только дефектная трубка, но и трубки, расположенные вокруг нее.

В установках, оснащенных цеолитовыми блоками комплексной очистки воздуха, при надлежащей эффективности удаления диоксида углерода обеспечивается еще более эффективная очистка от углеводородов тяжелее пропана, и трудно представить себе условия, при которых в конденсаторах-испарителях таких установок могут накопиться взрывоопасные отложения, содержащие углеводороды тяжелее пропана.

По этану, этилену и пропану эффективность очистки воздуха в БКО сравнительно невелика. Однако при выполнении существующих нормативов на их содержание в перерабатываемом воздухе и жидком кислороде и существующих требований по проточности эти примеси, имеющие достаточно высокую растворимость в жидком кислороде, не могут образовывать самостоятельные отложения на теплоотдающих поверхностях. Но при бесконтрольном росте загрязненности воздуха такими углеводородами нельзя исключать возможность образования взрывоопасных условий и на установках с БКО.

Накопление диоксида углерода на теплоотдающих поверхностях при испарении жидкого кислорода может приводить к образованию невзрывоопасных отложений, которые увеличивают термическое сопротивление и могут в процессе длительной работы значительно ухудшать технико-экономические характеристики установки.

Количество взрывоопасных и других примесей, накапливающихся в конденсаторах-испарителях при неблагоприятных условиях, может быть достаточно большим. Например, ниже приведено количество примесей, извлеченных при отоплении продукционного конденсатора-испарителя кислородной установки производительностью 12,5 тыс. м³/ч, проработавшего без отопления 720 ч на одном из химических предприятий, г:

Этан + этилен	2,8	Бутадиен-1,2	13,7
Пропан	120	2-Метилбутен-2	0,8
Пропилен	15	Циклопропан	0,9
Н-Бутан	18,7	2,3-Диметилбутен-1	0,3
Бутен-2	5,9	Гексен	3,4
3-Метил-1-бутен	45,6	Другие углеводороды	3,4
Циклопропан	0,8	Диоксид углерода	9120
3,3-Диметилбутен-1	53,8		

Следует обратить внимание на то, что накопление опасных количеств взрывоопасных примесей на теплоотдающих поверхностях конденсаторов-испарителей невозможно как-либо обнаружить в процессе эксплуатации, так как они локализируются внутри аппаратов.

Накопление взрывоопасных примесей и диоксида углерода на теплоотдающих поверхностях конденсаторов-испарителей с капиллярно-пористым покрытием и с поперечным наружным оребрением происходит значительно медленнее, чем на гладких поверхностях. Это обусловлено особенностями процесса кипения в стесненных условиях, когда характерные размеры канала сопоставимы с диаметром пузырька кипящей жидкости в момент отрыва, а также интенсивным гидродинамическим режимом течения парожидкостной смеси в таких каналах.

Многолетний опыт эксплуатации конденсаторов-испарителей с капиллярно-пористым покрытием и с наружным поперечным оребрением показал их высокую эксплуатационную надежность и эффективность.

7.5. Первый слив жидкости

Для предупреждения засорения парогенерирующих каналов посторонними частицами и нежелательного накопления в них взрывоопасных примесей из первых порций жидкости, поступающей в конденсаторы-испарители в процессе пуска блока разделения после отогрева, целесообразно удалять эту жидкость из сборников колонн и конденсаторов испарителей (так называемый первый слив жидкости).

Необходимость этой операции обусловлена тем, что в процессе первичного накопления жидкости в сборниках колонн и конденсаторах-испарителях происходит значительное ее упаривание как непосредственно в них, так и в предыдущих по ходу жидкости аппаратах. Испарение этой жидкости обеспечивает в значительной степени охлаждение до рабочих температур аппаратов и изоляции. Наряду с этим именно первые порции жидкости, проходящей по аппаратуре, вымывают различную грязь, попавшую в оборудование при монтажных и ремонтных работах и накапливающуюся в сборниках колонн и в нижней части сборников конденсаторов-испарителей.

Особенно важным является выполнение такой операции на установках с БКО, так как на них отсутствуют адсорберы и фильтры на потоке

кубовой жидкости и грязная жидкость беспрепятственно поступает прямо в конденсаторы-испарители.

Обычно первый слив производится после накопления в сборниках жидкости примерно до 0,25–0,5 от нормального уровня, а в конденсаторах-испарителях – до уровня, несколько меньшего уровня, соответствующего нижнему обрезу трубной решетки или нижнему обрезу парогенерирующих каналов.

7.6. Особенности накопления примесей в испарителях жидкого кислорода

Особенность испарителей жидкого кислорода заключается в том, что в них теплоноситель не изменяет агрегатного состояния и поэтому его температура и соответственно разность между температурой теплоносителя и температурой испаряемого жидкого кислорода изменяются по длине парогенерирующего канала в достаточно широких пределах.

Такие испарители используются в установках «с внутренним сжатием», которые работают при повышенных давлениях испаряемого кислорода, и испарение кислорода происходит в них при повышенных температурах. При повышении температуры заметно увеличивается растворимость опасных примесей в жидком кислороде.

В указанных условиях во многих случаях практически по всей длине канала отсутствуют условия для пузырькового кипения и соответственно для образования отложений примесей.

Гидродинамический режим испарения жидкого кислорода в испарительных каналах характеризуется большой неравномерностью и большими колебаниями скоростей движения жидкости и пара по длине канала.

Таким образом, указанные испарители, а точнее испарительные каналы пластинчато-ребристых теплообменников, работают в безопасных условиях. В аналогичных условиях работают и высокотемпературные испарители жидкого кислорода, в которых в качестве теплоносителя используется водяной пар.

В то же время не следует допускать, чтобы жидкий кислород испарялся в каналах основных теплообменников с использованием в качестве теплоносителя конденсирующегося жидкого воздуха, так как режим работы таких каналов может ничем не отличаться от неблагоприятного режима работы конденсаторов-испарителей.

7.7. Теплые испарители

На многих установках испарение жидкого кислорода, выводимого для обеспечения проточности, и первичного криптонового концентрата производится в теплых испарителях, в которых жидкий кислород испаряется, попадая на подогреваемую горячей водой поверхность.

Визуальные наблюдения показали, что на указанной поверхности всегда находится определенное количество жидкого кислорода. При работе в расчетных условиях жидкий кислород присутствует на греющей поверхности в виде мелких, постоянно перемещающихся капель. С уменьшением температуры греющей воды количество жидкого кислорода в испарителе возрастает и он находится уже в виде крупных капель и конгломератов.

В таких условиях находящийся в испарителе жидкий кислород значительно обогащается взрывоопасными примесями, концентрации которых могут достигать пределов взрывоопасности. В то же время концентрации опасных примесей, измеряемые в газообразном кислороде, выходящем из испарителя, могут практически не изменяться и даже уменьшаться. Особенно опасные условия возникают, когда после работы при пониженной температуре теплоносителя ее вновь начинают повышать, что приводит к многократному повышению концентрации опасных примесей в выходящем кислороде.

Таким образом, работа испарителей при пониженной температуре теплоносителя может привести к взрывам с весьма тяжелыми последствиями.

Безопасная работа указанных испарителей возможна только при поддерживаемой постоянно температуре воды не менее 80–90 °С и расходе жидкого кислорода, не превышающем расчетный.

Глава 8. Системы обеспечения взрывобезопасности и принципы их расчета

Задача систем обеспечения взрывобезопасности, которые органично встраиваются в технологические схемы установок, — это исключение условий, при которых содержания опасных примесей в кислородсодержащих жидкостях могут превысить установленные нормативы. При этом одновременно решается и задача поддержания на надлежащем уровне содержания диоксида углерода, накопление которого может приводить к ухудшению технико-экономических показателей установки.

Технологические схемы воздухоразделительных установок в зависимости от набора получаемых продуктов предусматривают различное число последовательно расположенных ступеней испарения кислородсодержащих жидкостей. К ним относятся: основные конденсаторы-испарители, производственный конденсатор-испаритель, конденсаторы азотных колонн, конденсатор узла получения первичного криптонового концентрата.

Системы обеспечения взрывобезопасности современных воздухоразделительных установок предусматривают блок комплексной очистки воздуха, блок адсорбционной очистки жидкого кислорода в циркуляционном контуре и непрерывную проточность всех аппаратов, где испаряются кислородсодержащие жидкости.

Величина проточности в большинстве технологических аппаратов определяется обычно при расчете основного технологического процесса исходя из материального баланса по основным компонентам перерабатываемого воздуха, и только проточность аппаратов, последних по ходу жидкого кислорода, иногда корректируется по результатам расчета из условий обеспечения взрывобезопасности.

Расчет системы обеспечения взрывобезопасности проводится с целью определения содержания взрывоопасных примесей и диоксида углерода в технологических потоках рассматриваемой установки при заданной загрязненности перерабатываемого воздуха, сравнения результатов с нормативами, определения необходимого расхода жидкого кислорода, циркулирующего через адсорбер, и проточности.

Для установок, оснащенных цеолитовыми блоками комплексной очистки, расчет выполняется по следующим наиболее характерным взрывоопасным примесям: ацетилену (C_2H_2), углеводородам парафинового и олефинового рядов, содержащих 3–5 атомов углерода (кроме пропана), далее углеводородам группы C_4 – C_5 , а также диоксиду углерода (CO_2). Ес-

ли в перерабатываемом воздухе возможны повышенные содержания этилена (C_2H_4) и пропана (C_3H_8) (до 0,5 ppm и более), то проводится расчет и по этим примесям.

В табл. 9 приведены используемые при расчетах содержания примесей в перерабатываемом воздухе и максимально допустимые расчетные содержания примесей.

Расчет проводится путем решения уравнений материального баланса по рассматриваемой примеси, составленных для всех аппаратов, расположенных по ходу кубовой жидкости, жидкого кислорода и первичного криптонового концентрата.

При составлении уравнений материального баланса принимаются следующие допущения:

- а) содержание примеси в перерабатываемом воздухе постоянно;
- б) используемые средства очистки имеют эффективность, приведенную в табл. 9;
- в) во всех рассматриваемых потоках и аппаратах примесь находится в растворенном виде;
- г) в сборниках ректификационных колонн и в конденсаторах-испарителях происходит полное перемешивание жидкости, т. е. содержание примеси во всем объеме рассматриваемой жидкости постоянно и равно ее содержанию в потоке, выходящем из аппарата. Возможность использования этого допущения подтверждена специально выполненными исследованиями [3];

Таблица 9. Параметры, принимаемые при расчете систем обеспечения взрывобезопасности

Параметр	Содержание примеси, млн ⁻¹ (мг/м ³)				
	диоксид углерода (CO ₂)	ацетилен (C ₂ H ₂)	этилен (C ₂ H ₄)	пропан (C ₃ H ₈)	углеводороды группы C ₄ –C ₆
Содержание в воздухе до БКО	400 (800)	1 (1)	1 (1)	0,65(1)	0,8 (2)
Содержание в воздухе после БКО	0,02 (0,04)	0,005			0,01 (0,025)
Максимальное содержание в отогреваемом конденсаторе	0,13 (0,25)	0,05	20	6,5 (10)	0,06 (2)
Максимальное содержание в неотогреваемом конденсаторе	0,5 (1)	0,2	50	13 (20)	0,25 (0,5)
Степень очистки, %					
БКО	—	—	10	60	—
Адсорбер в циркуляционном контуре	95	98	30	40	98

д) при расчете константу фазового равновесия для ацетилена принимают равной 0,026, для остальных примесей ее принимают равной нулю;

е) в потоке воздуха после отмывочных тарелок колонн высокого давления, а также в потоках газообразного и жидкого азота рассматриваемые примеси отсутствуют;

ж) поток газообразного кислорода после отмывочных тарелок выносит рассматриваемые примеси только в виде капель;

з) массовая доля капель в паре на выходе из аппаратов принимается равной 0,001.

Система уравнений материального баланса составляется в виде:

$$\sum_{i=1}^n k_i c_i = \sum_{q=1}^m k_q c_q,$$

где k_i – расход технологического потока, поступающего в аппарат; c_i – содержание примеси в i -м входящем потоке; k_q – расход технологического потока, выводимого из аппарата; c_q – содержание примеси в q -том выходящем потоке; n, m – число технологических потоков, входящих и выходящих из аппаратов соответственно.

Содержание примеси C_{qt} в газовых потоках, выводимых из аппаратов, вычисляют по формуле

$$C_{qt} = C_{qж}(d + b),$$

где $C_{qж}$ – содержание примеси в жидком кислороде, выходящем из аппарата; d – массовая доля капель жидкого кислорода в паре, выходящем из аппарата; b – константа фазового равновесия.

Содержание примеси $C_{iж}$ в жидкостных потоках, поступающих в аппараты после средств очистки, вычисляют по формуле

$$C_{iж} = C_{qж}(1 - 0,01f),$$

где f – степень очистки.

Решив составленную систему уравнений материального баланса, определяют содержания примесей в аппаратах, которые сравниваются с нормативами, приведенными в табл. 9. Если расчетные содержания примесей превышают нормативы, то необходимо повторить расчет, увеличив расход кислорода, циркулирующего через адсорбер, или проточность.

Для предварительной оценки содержаний примесей в аппаратах, последних по ходу жидкого кислорода, на которых предусмотрен циркуляционный контур, можно использовать следующее уравнение:

$$C = \frac{BC'_в}{P_p + \Pi f_{у.а}},$$

где B – расход воздуха, подаваемого на разделение; $C'_в$ – содержание при-

меси в воздухе после БКО; P_p – расход жидкого кислорода, выводимого из циркуляционного контура; $Ц$ – расход жидкого кислорода, циркулирующего через адсорбер; $f_{ц.а}$ – степень очистки, обеспечиваемая циркуляционным адсорбером.

Если при максимально возможных проточности и расходе кислорода, циркулирующего через адсорбер, расчетное содержание примеси в каком-нибудь аппарате превысит нормативы для неотогреваемых аппаратов, этот аппарат необходимо выполнить отогреваемым.

Изменение во времени содержания примеси в конденсаторе-испарителе при изменении условий работы (отключение адсорбера, изменение проточности) можно рассчитать по зависимости

$$C_t = C_{нач}e^{-a} + C_{кон}(1 - e^{-at}),$$

где C_t – содержание примеси в момент времени t ; t – текущее время; $C_{нач}$ – содержание примеси при $t = 0$ (по расчету); $C_{кон}$ – содержание примеси в изменяющихся условиях, например при прекращении циркуляции через адсорбер;

$$a = Q_{ц}/V_a$$

$Q_{ц}$ – расход жидкого кислорода, выводимого из контура, м³/ч, при нормальных условиях; V_a – количество жидкости в конденсаторе, м³, при нормальных условиях.

Современные программы технологического расчета воздухоразделительных установок включают в себя и расчет содержаний взрывоопасных примесей в аппаратах установки.

Глава 9. Безопасность при эксплуатации оборудования для получения и очистки редких газов

9.1. Особенности обеспечения безопасности при получении криптонового концентрата и сырого криптона

Получение первичного криптонового концентрата и сырого криптона с последующим его разделением на криптон и ксенон связано с рядом специфических факторов, пренебрежение которыми крайне опасно.

Технологический процесс получения криптонового концентрата, а затем сырого криптона обеспечивает повышение концентрации криптона от $1,14 \cdot 10^{-6}$ мол. долей в атмосферном воздухе до 0,95 мол. долей и более в сыром криптоне. Таким образом, достигается обогащение почти в миллион раз.

Одновременно с концентрированием криптона в аппаратах происходит концентрирование и других высококипящих примесей, содержащихся в перерабатываемом воздухе, включая и метан.

В связи с этим при получении первичного криптонового концентрата и криптона необходимо особое внимание уделять обеспечению надлежащей очистки потоков от взрывоопасных примесей и предотвращению их опасного накопления в аппаратах.

9.1.1. Накопление метана

Метан практически не задерживается средствами очистки, которыми оснащены воздухоразделительные установки. Он имеет сравнительно высокую летучесть (более высокую, чем у криптона), и его значительное количество выносится с газообразными потоками. Тем не менее концентрация метана в первичном криптоновом концентрате в сотни раз выше, чем в воздухе, поступающем в установку.

Содержание метана в перерабатываемом воздухе изменяется в весьма широких пределах в зависимости от места расположения воздухоразделительной установки. Особенно опасными могут быть выбросы метана из разломов земной коры и из подземных сооружений. Как показывает статистическая обработка материалов, на основной массе кислородных производств содержание метана в первичном криптоновом концентрате превышает содержание криптона в 1,25–3,25 раза. На некоторых производствах указанное отношение не превышает 0,2. Доля метана в общем содержании углеводородов обычно составляет 90–95%.

На современных воздухоразделительных установках криптоновый концентрат получают из жидкого кислорода, отбираемого из основных конденсаторов-испарителей или из конденсаторов колонны технического кислорода, что обеспечивает достаточно высокий коэффициент извлечения криптона.

Характерно, что в эксплуатационных условиях коэффициент извлечения криптона наиболее просто оценивать по соотношению содержаний криптона и ксенона в криптоновом концентрате или, если это необходимо, в криптоно-ксеноновой смеси. Это возможно, так как содержание этих примесей в атмосферном воздухе постоянно, а потери ксенона во много раз меньше потерь криптона, и поэтому указанное отношение с достаточной точностью определяет потери криптона:

Отношение C_{Kr}/C_{Xe}	11	10	9	8,5	8	7	6
Потери криптона, % (не более)	16	24	31	35	39	46	52

При получении концентрата наиболее безопасно проводить двухступенчатое упаривание криптоносодержащей жидкости и окончательное упаривание первичного криптонового концентрата в испарителях-конденсаторах витого типа (см. рис. 13). Этим аппаратам присущи высокие скорости пара в трубках, а объем жидкости в верхней части испарителя-конденсатора, наиболее обогащенный метаном, весьма мал. В таких условиях стало возможным распространить существовавшие ранее нормы суммарного содержания углеводородов в первичном криптоновом концентрате на предельную концентрацию углеводородов в жидкости, поступающей в испаритель-конденсатор витого типа из конденсатора-испарителя криптоновой колонны, а концентрацию углеводородов в первичном криптоновом концентрате в этом случае не нормировать.

На некоторых кислородных производствах мощности оборудования по переработке криптонового концентрата значительно меньше имеющегося количества концентрата. В связи с этим появляется необходимость максимально возможного повышения содержания криптона в концентрате, что достигается уменьшением его расхода.

Расчеты показывают, что содержание криптона практически обратно пропорционально расходу концентрата. При этом переходный процесс установления содержания криптона, достаточно близко соответствующего новому значению расхода концентрата, продолжается несколько десятков часов.

Очевидно, что повышение содержания криптона в концентрате не может являться самоцелью, так как всегда сопровождается повышением потерь криптона, что весьма накладно. Следует также иметь в виду, что одновременно с повышением содержания криптона в концентрате и в других технологических потоках криптоновой колонны соответственно повышается содержание диоксида углерода, что может негативно сказаться на работе аппаратов.

В то же время возможность повышения содержания криптона в конкретных условиях в основном определяется условиями обеспечения взрывобезопасности.

Как уже отмечалось, взрывоопасные условия при накоплении метана и других углеводородов, растворенных в жидком кислороде, возникают, если концентрация этих примесей в сумме достигает 5% мол. Это соответствует концентрации 28600 мг/дм³ жидкости, или 23000 мг/дм³ жидкости в пересчете на углерод. При таких и более высоких концентрациях углеводородов взрывоопасной становится вся масса жидкости, находящейся в аппарате, и в случае взрыва последствия будут крайне тяжелыми.

Например, взрыв сосуда, в котором находится 50 дм³ жидкого кислорода, содержащего 5% мол. метана, эквивалентен взрыву примерно 36 кг тринитротолуола. Поэтому надо очень внимательно относиться к вопросам, связанным с накоплением метана в оборудовании, предназначенном для получения первичного криптоно-ксенонового концентрата и криптоно-ксеноновых смесей.

Несмотря на достаточно высокие значения предела взрываемости, предельное содержание метана в первичном криптоновом концентрате несколько десятилетий принималось на весьма низком уровне, составлявшем 1500 мг на 5 дм³ в пересчете на углерод. Это было связано в первую очередь с отсутствием надежных данных по пределу взрываемости рассматриваемых смесей и с тем, что анализы проводились не очень надежным титриметрическим методом.

Установленные в настоящее время нормативы на предельное содержание метана (суммы углеводородов) в кислородсодержащих средах допускают при непрерывном анализе повышать концентрацию метана до 6800 мг в литре жидкого концентрата в пересчете на углерод. При этом содержание метана в жидкости из конденсатора криптоновой колонны не лимитируется.

Содержание метана при уменьшении расхода концентрата повышается значительно медленнее, чем содержание криптона. Например, на установке КААр-32 при уменьшении расхода концентрата в 5 раз содержание метана при его постоянном содержании в перерабатываемом воздухе повышается примерно в 2 раза, а на установке КтК-35-3 – более чем в 3 раза, что связано с особенностями ее технологической схемы.

Расчеты динамики изменения содержания метана в аппаратах узлов получения криптонового концентрата отечественных установок при изменении содержания метана в перерабатываемом воздухе показывают, что кратковременное (до 2–8 ч) десятикратное повышение содержания метана в воздухе приводит к возрастанию содержания метана в концентрате не более чем в 2–3 раза.

Анализ данных по реальным содержаниям метана в воздухе и в аппаратах узлов получения криптонового концентрата и результаты расчетов показывают, что при работе установок по штатной схеме получения концентрата и

надлежащем непрерывном контроле за содержанием метана содержание криптона в концентрате может быть повышено до 0,6–0,8%, а часто и более.

Необходимо особо подчеркнуть, что работа с содержанием криптона в концентрате более 0,2% допустима только при двухступенчатом упаривании криптоносодержащей жидкости и при организации непрерывного контроля за содержанием метана в концентрате.

Учитывая, что дальнейшее повышение содержания криптона в концентрате ограничивается содержанием метана, на некоторых установках предусмотрены технологические возможности для уменьшения коэффициента извлечения метана в криптоновой колонне без заметного снижения коэффициента извлечения криптона. Это достигается снижением флегмового отношения в верхней части криптоновой колонны путем перераспределения поступающих в нее технологических потоков.

На указанных выше установках должна быть предусмотрена также возможность экстренного сброса пара, выходящего из конденсаторов-испарителей криптоновой колонны, минуя колонну. Это позволяет обеспечить безопасность в случаях резкого повышения содержания метана в воздухе и невозможности обычными методами удержать содержание метана в концентрате в пределах нормативов. На установках, где такой возможности нет, работа с повышенными содержаниями криптона требует особого внимания, и желательно, чтобы в нормальных условиях содержания метана в концентрате не превышало 3000–4000 мг/дм³.

Если по результатам анализов концентрация метана или сумма углеводов в первичном криптоновом концентрате превысила нормы, необходимо уменьшить концентрацию метана. С этой целью наиболее целесообразно уменьшить коэффициент извлечения метана, что может быть достигнуто уменьшением расхода жидкости, подаваемой в верхнюю часть криптоновой колонны, вплоть до полного его прекращения. Это приведет к уменьшению флегмового отношения в верхней части криптоновой колонны и соответственно к уменьшению коэффициента извлечения не только метана, но и криптона.

На установках с одним вводом жидкости в криптоновую колонну при повышенных концентрациях метана (суммы углеводов) необходимо сбросить в регенераторы пар, выходящий из конденсаторов криптоновой колонны.

Концентрация метана (суммы углеводов) в первичном криптоновом концентрате может быть резко снижена путем увеличения отбора первичного криптонового концентрата или слива достаточно большого количества жидкости из конденсатора криптоновой колонны. Последний способ, приводящий к большим потерям концентрата, рекомендован РЭ некоторых зарубежных установок в связи с тем, что в технологической схеме установки не предусмотрены другие возможности для уменьшения концентрирования метана в узле получения концентрата.

Испарение концентрата

Для безопасной работы испарителей первичного криптонового концентрата необходимо, чтобы температура воды в них не понижалась ниже 363–358 К (90–85 °С). При снижении температуры воды внутри испарителя накапливаются значительные количества жидкого кислорода, в котором бесконтрольно концентрируются углеводороды (концентрация углеводородов в газе, выходящем из испарителя, при этом снижается), что может привести к образованию в испарителе взрывоопасных смесей. Поэтому отключение подачи пара или горячей воды в испаритель допустимо только при одновременном прекращении подачи в него криптонового концентрата.

При выполнении указанных мер необходимо с целью уменьшения потерь криптона постоянно следить за изменением концентрации метана, и после ее уменьшения ниже нормативной немедленно перевести блок разделения воздуха на нормальную схему работы. Расчеты показывают, что продолжительность такой операции не более 2–3 ч.

Выжигание углеводородов

Процесс получения криптоно-ксеноновой смеси из концентрата предусматривает очистку смеси от метана и других углеводородов путем их окисления на катализаторе. На установках типа УСК-1 и УСК-1М выжигание углеводородов проводят на оксиде алюминия при температуре в печах выжигания 933–903 К (660–630 °С).

В НИИАП (г. Новомосковск) созданы катализаторы, использование которых позволило понизить температуру в реакторах выжигания метана до 400–450 °С. Эти катализаторы уже много лет применяются в установках УСК-0.45.

Очистку концентрата после печей выжигания от влаги и диоксида углерода, образовавшихся в результате сгорания углеводородов, осуществляют на современных установках в цеолитовых блоках очистки. Требования к процессу выжигания углеводородов весьма жесткие. Концентрация суммы углеводородов в первичном криптоновом концентрате за печами выжигания не должна превышать 12,5 мг/дм³ в пересчете на углерод.

Если концентрация суммы углеводородов после печей выжигания начала постепенно повышаться или превысила указанную величину, необходимо увеличить частоту отбора проб для анализа, выяснить причину повышенного проскока углеводородов и устранить ее. О принятых мерах должна быть сделана соответствующая запись в рабочем журнале.

Причинами повышенного проскока углеводородов за печи выжигания могут быть пониженная температура в печах, повышенный расход концентрата, переток газа минуя катализатор.

9.1.2. Радиационная безопасность

Общие сведения

Присутствие радона в перерабатываемом воздухе и его распад обуславливают так называемый радиационный фактор в производствах криптоно-ксеноновой смеси, который характеризуется определенной дозой гамма-излучения на поверхностях аппаратов, где находятся криптоно-ксеноновая смесь и некоторые другие технологические продукты.

Радон-222, образующийся при радиационном распаде радия-226 и являющийся частью цепи распада урана-236, — постоянная примесь атмосферного воздуха. Таким образом, любые вещества, содержащие радий или уран, например почва, минеральные породы и т. п., являются источником поступления радона в атмосферу.

Период полураспада радия-226 около 1600 лет. Поэтому его количество на земле во времени практически не меняется и он распадается, выделяя радон-222, с постоянной скоростью. Период полураспада радона-222 составляет 3,85 сут.

Наряду с радоном-222 атмосферный воздух содержит также торон-220, являющийся продуктом распада тория-232. Судя по литературным данным, вклад радона-222 в суммарную дозу облучения человека примерно в 20 раз выше, чем торона-220. Поэтому в дальнейшем будем рассматривать накопление в воздухоразделительных установках только радона-222, хотя не исключено, что в некоторых случаях роль торона-220 может быть достаточно заметной.

Радон-222, так же как и торон-220, инертный газ, аналогичный по химическим свойствам криптону и ксенону. Цепь его распада включает в себя ряд продуктов, имеющих очень короткие периоды полураспада, и завершается Pb-210, период полураспада которого 22,3 года.

Средние концентрации радона вблизи земной поверхности составляют $0,5\text{--}10\text{ Бк/м}^3$ [$(0,5\text{--}10) \cdot 10^{-13}\text{ Ки/дм}^3$] и очень зависят от местных условий — плотности почвы, структуры пород, ветра и удаленности от океана. Средняя объемная доля радона в воздухе находится на уровне $1 \cdot 10^{-14}\text{ млн}^{-1}$, что в 10^{14} раз меньше, чем доля криптона.

Температура кипения радона-222 значительно выше температуры кипения криптона и ксенона. Поэтому при низкотемпературном разделении воздуха радон концентрируется одновременно с криптоном и ксеноном, а при низкотемпературном разделении криптоно-ксеноновой смеси — вместе с ксеноном. Учитывая, что давление насыщенного пара радона значительно ниже, чем у ксенона, потери радона с газообразными продуктами меньше, чем криптона и ксенона.

Необходимо отметить, что все продукты распада радона находятся в воздухе и других газах в виде аэрозоля. Продукты распада радона легко оседают на поверхностях, соприкасающихся с газами, что определяет форму их (продуктов распада) существования и концентрации в конкрет-

ных условиях. Указывается также, что со стеклянных предметов осадок продуктов распада радона удаляется только растворами кислот, а с металлических поверхностей его счищают наждачной бумагой.

Таким образом, в ходе процесса низкотемпературного разделения воздуха и получения криптоно-ксеноновой смеси происходит распад радона. При этом изменение активности радона описывается уравнением

$$A = A_0 \exp(-bt),$$

где A_0 – исходная активность; b – постоянная распада; t – время, сутки.

Для радона $b = 0,181$ 1/сут.

В зависимости от времени пребывания радона в аппаратуре его активность, в долях от исходной, составляет:

T , сут.....	0	1	2	4
A/A_0 , %.....	100	84	70	48

Распад радона сопровождается гамма- и альфа-излучением. Наиболее стабильный продукт распада радона Рb-210 является альфа-излучателем.

В процессе получения криптоно-ксеноновой смеси концентрация криптона повышается примерно в $8,7 \cdot 10^5$ раз. При этом концентрация радона, с учетом его распада, повышается в 10^5 раз.

Впервые радиационная обстановка в производстве криптоно-ксеноновой смеси была проанализирована в 1964–65 годах сотрудниками Института гигиены труда и профзаболеваний под руководством Н.В. Вершинина. В результате обследования, при котором измерялись мощности гамма-излучения в различных местах участка производства криптоно-ксеноновой смеси завода «Запорожсталь», был сделан вывод о том, что уровни радиационных факторов на обследованном производстве не превышают ПДК для непрофессиональной категории облучения и что данное производство можно квалифицировать как радиационно безопасное. В то же время было отмечено, что при больших масштабах производства и хранения криптона уровни радиационных факторов могут достигнуть значений, близких и даже превышающих ПДК для профессиональной категории, если не принимать защитных мер.

В связи с тем, что в последующие десятилетия объемы производства криптоно-ксеноновой смеси значительно возросли и мощности производств на ряде предприятий превысили более чем в 5 раз мощность обследованного производства, в 1980–82 годах НПО «Криогенмаш» с привлечением Ленинградского НИИ радиационной гигиены, а также Радиевого института организовал обследование радиационной обстановки на подавляющем числе работающих производств криптоно-ксеноновой смеси.

В процессе этих работ измерялись мощность дозы гамма-излучения на поверхностях различного оборудования, а также индивидуальные дозы

облучения персонала производств. В результате обследования установлено следующее.

Мощность дозы на поверхности свеженаполненных баллонов на различных предприятиях значительно различалась и составляла от 0,003–0,078 Зв/ч (от 0,3 до 7,8 мР/ч). При этом наиболее высокие уровни дозы были зарегистрированы на производствах, расположенных на Украине, – Днепродзержинск, Макеевка, Енакиеве.

Мощность дозы на поверхности нижней части кожуха блока вторичного концентрирования составляла от 0,0002 до 0,014 Зв/ч (от 0,02 до 1,4 мР/ч).

Концентрация радона в свеженаполненном баллоне со смесью может достигать $1 \cdot 10^4$ Бк/дм³ ($1 \cdot 10^7$ Ки/дм³), что в сотни раз превышает допустимые концентрации радона в воздухе [22].

Индивидуальные дозы облучения аппаратчиков при самых неблагоприятных условиях не превышали 0,004 Зв/год (0,4 бэр/год), что составляет 0,8 от предельной нормы для лиц категории Б [22].

Указанные мощности дозы сравнительно невелики. Например, если человек в течение года постоянно весь рабочий день будет находиться в непосредственном контакте со свеженаполненными криптоно-ксеноновой смесью баллонами объемом 40 дм³, то при мощности дозы 0,01 Зв/ч (1 мР/ч) эквивалентная доза за год работы составит не более 0,042 Зв (4,2 бэр) при предельно допустимой дозе (ПДД) для персонала, равной 0,05 Зв (5 бэр). При равномерном воздействии такой дозы на организм в течение 50 лет она, по литературным данным, не причинит вреда здоровью.

На таких производствах, согласно «Основным санитарным правилам обеспечения радиационной безопасности» (ОСПБРБ–99) [21], не предъявляют каких-либо специальных требований к помещениям и размещению оборудования.

Согласно «Нормам радиационной безопасности» (НРБ–99) [22], персонал подразделяют на две группы в зависимости от индивидуальной дозы, обусловленной внешним и внутренним излучением:

1) лица, получающие дозу, превышающую 0,3 годовой ПДД, нуждаются в обязательном индивидуальном дозиметрическом контроле;

2) лица, получающие дозу, не превышающую 0,3 годовой ПДД, не нуждаются в обязательном индивидуальном дозиметрическом контроле.

Однако сохраняется контроль мощности дозы внешнего излучения и концентрации радиоактивных веществ (радионуклидов) в воздухе рабочих помещений. Оценку облучения персонала проводят по этим данным.

Учитывая, что концентрация радона в перерабатываемом воздухе может меняться в достаточно широких пределах в зависимости от места расположения кислородной станции, представляется необходимым систематическое радиационное обследование участков производства криптоно-ксеноновой смеси. На основе этих данных должен решаться вопрос о

том, к какой группе должен быть отнесен персонал данной станции, и определен объем необходимого дозиметрического контроля.

Наиболее серьезная опасность для персонала может возникать в том случае, если радон, находившийся вместе с криптоно-ксеноновой смесью в баллонах, в блоке вторичного концентрирования, в других аппаратах или коммуникациях, поступает в воздух производственных помещений или в зону дыхания персонала. В этом случае концентрация радона и продуктов его распада может достигнуть опасных значений. В связи с этим особо опасными могут являться операции по отбору проб криптоно-ксеноновой смеси на анализ, проверке герметичности вентилей баллонов, а также ситуации, возникающие при появлении утечек криптоно-ксеноновой смеси из систем.

Согласно нормам допустимая концентрация радона в воздухе рабочей зоны составляет 50 Бк/дм³ [22]. Максимально обнаруженная концентрация радона в воздухе, определенная при указанном выше обследовании участка получения криптоно-ксеноновой смеси, составила 0,5 Бк/дм³, т. е. оказалась в 100 раз меньше ПДД.

Очевидно, что уровень концентрации радона в помещениях будет зависеть от количества получаемой криптоно-ксеноновой смеси (мощности станции), технического состояния оборудования, уровня его обслуживания и ремонта.

Для предупреждения загрязнения производственных помещений радоном рекомендуется:

обеспечивать герметичность аппаратуры и коммуникаций и систематическую ее проверку;

не допускать попадание радона в помещение из коммуникаций при отборе для анализов проб криптоно-ксеноновой смеси;

обеспечивать надлежащую вентиляцию всех помещений, где находятся аппараты, перерабатывавшие первичный криптоновый концентрат, и баллоны с криптоно-ксеноновой смесью.

Для снижения индивидуальной дозы облучения аппаратчиков следует максимально уменьшать продолжительность работы со свеженаполненными баллонами.

Для этого необходимо: откатывать баллоны от рампы на специальных тележках, что ускорит эту работу и увеличит расстояние между рабочим и перемещаемым баллоном; выполнять все работы по обслуживанию наполненных баллонов (отбор проб на анализ, взвешивание и т. п.) после их выдержки в течение не менее 10 сут (за это время мощность дозы на поверхности баллонов снизится более чем в 10 раз); не производить какие-либо работы в помещении, где выдерживаются баллоны.

Оценка радиационной обстановки на производствах криптоно-ксеноновой смеси показала, что существующие нормативы радиационной безопасности на обследованных производствах не нарушались.

Удаление радона адсорбцией

Поступление радона в установку получения криптоно-ксеноновой смеси может быть уменьшено во много раз путем использования низкотемпературного адсорбера. Технология такой очистки отработана в ОАО «Криогенмаш».

Впервые указанными адсорберами была оснащена установка УСК-0,45. Длительный опыт эксплуатации этой установки показал, что при наличии низкотемпературного адсорбера мощность дозы на поверхности свежезаполненных баллонов многократно снизилась.

Особенность адсорбционного удаления радона заключается в том, что при низких температурах емкость сорбентов по радону достаточно велика и время прохождения адсорбционного фронта по слою значительно больше периода полураспада радона. В таких условиях реализуется так называемый режим «вечного адсорбера» [23], в связи с чем не требуется периодической регенерации сорбента для восстановления его адсорбционной емкости по радону. Это особенно важно в связи с неизбежными потерями криптона и ксенона при регенерации адсорбера.

Следует отметить, что эффективная адсорбция радона в адсорберах установок разделения воздуха и в установках концентрирования криптоно-ксеноновой смеси происходит только на заключительных этапах получения криптонового концентрата и криптоно-ксеноновой смеси. Это обусловлено крайне малой объемной долей радона в технологических потоках на начальных этапах процесса разделения воздуха.

Накопление продуктов распада радона в адсорбенте

Возможность адсорбции радона и его распада в адсорберах требует рассмотрения вопросов, связанных с накоплением в сорбенте радиоактивных продуктов распада радона и возникающих в связи с этим проблем безопасности обращения с сорбентом, извлекаемым из адсорберов при замене, а также экологических проблем, обусловленных необходимостью захоронения такого сорбента.

Как уже отмечалось, наиболее стабильный продукт распада радона Pb-210 является альфа-излучателем. Поэтому все адсорбенты, отработавшие сколь-нибудь долго в установках разделения воздуха, характеризуются определенным уровнем альфа-излучения. Количество Pb-210, накопившегося в сорбенте, зависит от концентрации радона в среде, проходившей через адсорбер, и продолжительности работы адсорбера между регенерациями. Если этот период меньше периода полураспада радона (3,85 сут), то подавляющая часть адсорбированного радона удаляется из адсорбера при регенерации. Количество Pb-210, накапливающегося в сорбенте, сравнительно невелико. К таким адсорберам относятся, например, блоки комплексной очистки воздуха.

В жидкостных адсорберах, у которых продолжительность работы между регенерациями более 14 сут. практически весь адсорбированный радон распадается до Рb-210.

Для оценки реальной радиационной обстановки при работе с адсорбентами, извлекаемыми из адсорберов при капитальных ремонтах установок, в Ленинградском НИИ радиационной гигиены по заданию НПО «Криогенмаш» была определена альфа-активность образцов силикагелей, отработавших по 8 календарных лет в различных адсорберах.

Согласно «Основным санитарным правилам обеспечения радиационной безопасности» (ОСПОРБ–99) [21], твердые отходы считаются радиоактивными, если для альфа-активных веществ удельная активность превышает 10 кБк/кг.

Радиоактивность проверенных образцов сорбента оказалась существенно меньше указанных норм, и соответственно был сделан вывод о том, что нет ограничений по условиям их ликвидации.

В то же время, согласно нормам радиационной безопасности НРБ–99, Рb-210 как потенциальный источник внутреннего облучения по степени опасности отнесен к группе А с минимально значимой активностью (МЗА) $0,4 \cdot 10^4$ Бк. При работах с такими материалами необходимо руководствоваться соответствующими указаниями «Основных санитарных правил» (ОСПОРБ–99) [21].

При любых работах с адсорбентами, извлекаемыми из адсорберов воздухоразделительных установок, необходимо исключать возможность попадания пыли адсорбентов в органы дыхания и зрения и поэтому следует выполнять такие работы только в респираторах и защитных очках.

В случаях расположения адсорберов на потоках с большими концентрациями радона, например на потоке первичного концентрата, удельная активность сорбента через несколько лет становится выше 0,2 мККи/кг. Учитывая значительные сложности обеспечения безопасности при работе с такими материалами, целесообразно при необходимости замены сорбента или проведения работ, связанных с его извлечением из адсорбера, заменять весь адсорбер. При этом демонтированный адсорбер необходимо герметизировать и передать в специализированную организацию для захоронения.

9.2. Обеспечение взрывобезопасности при очистке аргона от кислорода

Очистка сырого аргона от кислорода проводится на многих предприятиях методом каталитического гидрирования путем беспламенного сжигания подаваемого в очищаемый газ водорода на специально подобранных катализаторах. Обычно с этой целью использовались платиновые и палладиевые катализаторы. В последние годы начато применение в про-

мышленности не содержащих драгоценных металлов более термостойких катализаторов типа НКО, разработанных Новомосковским НИАП.

Процесс ведется при достаточно высоких температурах, так как реакция гидрирования кислорода протекает с выделением тепла: тепловой эффект реакции составляет около 485000 кДж/кмоль кислорода.

В связи с этим адиабатическое повышение температуры составляет 233 К на 1% кислорода. В то же время на поверхности катализатора повышение температуры может достигать 272 К на 1% кислорода.

В связи с проблемами обеспечения прочности металла реакторов в течение длительного времени работы температура в реакторах не должна превышать 550–600 °С. В таких условиях содержание кислорода в аргоне в одном реакторе может быть снижено только на 2–2,5%. Поэтому на установках очистки аргона обычно используют два работающих последовательно реактора. При одном реакторе предусматриваются средства, исключающие повышение содержания кислорода на входе более 2–2,5%.

Применение водорода обуславливает возможность появления серьезных опасностей при эксплуатации. Они могут возникнуть при утечках водорода из коммуникаций и аппаратов в помещения, а также при определенных концентрациях водорода в аргоне.

По литературным данным, минимальные содержания водорода, при которых может происходить распространение пламени в смесях некоторых газов и кислорода, составляют, % [13]:

Водород–воздух	4
Водород–кислород	4
Водород–азот–кислород	5
Водород–СО ₂ –кислород	5,9
Водород–аргон–кислород, не более	5,25–5,5.

Соответственно при больших содержаниях водорода смесь становится взрывоопасной. Поэтому указанные выше содержания водорода в газах принимаются исходными при разработке нормативов на содержание водорода.

В связи с возможностью образования взрывоопасных сред устройство и эксплуатация установок очистки сырого аргона от кислорода методом каталитического гидрирования должны соответствовать требованиям «Общих правил взрывобезопасности для химических, нефтехимических и нефтеперерабатывающих производств» (ПБ 09-540–03), утвержденных Госгортехнадзором.

Трубопроводы водорода на этих установках должны соответствовать «Правилам устройства и безопасной эксплуатации трубопроводов для горючих, токсичных и сжиженных газов», утвержденным Госгортехнадзором.

Реакторы установок очистки сырого аргона от кислорода должны размещаться вне зданий. Допускается установка реакторов в отдельных по-

мещениях при условии выполнения требований указанных выше «Правил взрывобезопасности» (ПБ 09-540–03).

Установки очистки сырого аргона от кислорода методом каталитического гидрирования должны быть оснащены блокировкой, отключающей подачу водорода при повышении температуры в реакторе выше допустимой, а также при содержании кислорода в аргоне, поступающем на очистку, более величин, указанных в инструкции по эксплуатации.

В технологическом процессе очистки сырого аргона от кислорода должна быть предусмотрена система автоматического измерения содержания кислорода в сыром аргоне, поступающем в реактор.

Во время пуска на входе в узел смешения реактора допускается повышение объемной доли кислорода в аргоне до 8%. При этом расход подаваемого водорода не должен превышать 2,5% от расхода поступающего аргона.

Объемная доля водорода в техническом аргоне, поступающем в воздухоразделительную установку на очистку от азота, не должна превышать 2,5%.

Установки очистки сырого аргона от кислорода и водородные коммуникации перед подачей в них водорода и после остановки должны продуваться сырым аргонem или азотом с объемной долей кислорода менее 4%.

Окончание продувки должно определяться анализом состава продувочного газа. При этом перед подачей водорода объемная доля кислорода в продувочном газе не должна превышать 4%, а в конце продувки после остановки водород в продувочном газе должен отсутствовать.

Любые ремонтные работы и техническое обслуживание на установке очистки сырого аргона от кислорода и водородных коммуникациях разрешаются только после надежного прекращения подачи водорода, исключающего попадание его в оборудование, и продувки газом, содержащим не более 4% кислорода, а затем воздухом. После окончания продувки водород в продувочном газе должен отсутствовать.

Вскрытие реакторов каталитического гидрирования допускается только после их остывания до температуры не более 50 °С.

Поиск мест неплотностей в аппаратах и коммуникациях следует проводить только с применением мыльной пены. Использование для этого открытого пламени и спичек категорически запрещается.

В случае обнаружения утечек аргона или водорода необходимо немедленно принять меры для их устранения.

Запрещается устранять под давлением обнаруженные неплотности.

При внезапном отключении электроэнергии необходимо немедленно проверить закрытие клапанов подачи в установку водорода и аргона и по возможности открыть клапан подачи в установку чистого азота.

При длительной остановке и при ремонтах необходимо принимать меры, исключающие возможность натекаания водорода и аргона из магистралей и действующих установок в оборудование и коммуникации.

Сырой аргон на катализаторы типа НКО может быть подан только после восстановления катализатора одновременно с необходимым количеством водорода. Наиболее удобно это выполняется при восстановлении катализатора смесью водорода с чистым азотом и последующей замене азота на сырой аргон.

Перед вскрытием реактора катализатор типа НКО необходимо охладить до комнатной температуры, а затем пассивировать, подавая сырой аргон или воздух.

Глава 10. Контроль содержания опасных примесей при работе ВРУ. Нормативы

10.1. Общие положения

Систематическое определение содержаний взрывоопасных примесей в технологических потоках проводят для того, чтобы, во-первых, оценить эффективность работы средств очистки, которыми оснащен блок разделения, и не допустить продолжительной работы в неисправном состоянии и, во-вторых, своевременно установить приближение опасных периодов при работе агрегата и принять необходимые меры.

Объем аналитического контроля, места отбора проб на анализ и периодичность отбора зависят от особенностей установки и приведены в инструкции по эксплуатации.

Содержание взрывоопасных примесей необходимо контролировать в жидком кислороде из конденсаторов-испарителей, последних по ходу жидкого кислорода, и из конденсаторов-испарителей криптоновых колонн.

При нормальном уровне содержаний углеводородов пробы для анализов отбираются два раза в смену (через 4 ч).

Анализы необходимо проводить по графику, предусматривающему равномерный отбор проб из аппаратов в течение смены независимо от времени проведения внеочередных анализов.

Обычно определяют содержание в жидком кислороде ацетилена и других углеводородов, сероуглерода и масла.

На установках небольшой производительности, оснащенных цеолитовыми блоками комплексной очистки воздуха, содержание указанных веществ в кубовой жидкости и жидком кислороде не определяют. Это объясняется высокой эффективностью очистки воздуха этим способом, а также тем, что неудовлетворительная работа блока очистки приводит в первую очередь к проскоку в аппараты значительных количеств диоксида углерода, что иногда своевременно обнаруживается аппаратчиками по забивке дроссельных вентилей.

Содержание сероуглерода в жидком кислороде определяют только в случае, если в районе станции или ее воздухозабора расположены промышленные источники сероуглерода или если при определении ацетилена обнаруживают желтое окрашивание поглотительного раствора.

10.2. Предельно допустимые содержания примесей в жидком кислороде

Одним из основных требований, обеспечивающих взрывобезопасную работу воздухоразделительных установок, является недопущение превышения предельных содержаний опасных примесей в контролируемых потоках.

Под предельно допустимым содержанием примеси (ПДС) понимается такое ее содержание в жидком кислороде, при превышении которого эксплуатация установки запрещается. Наряду с ПДС устанавливается оперативное предельное содержание (ОПДС), при достижении которого должны приниматься необходимые меры, предотвращающие дальнейшее повышение содержания рассматриваемой примеси в контролируемом потоке. Значения ОПДС устанавливаются в долях от ПДС.

Принятые в настоящее время ОАО «Криогенмаш» предельно допустимые содержания взрывоопасных примесей в жидком кислороде приведены в табл. 10.

Индивидуально ПДС установлены только для ацетилен и сероуглерода, имеющих наиболее неблагоприятные физико-химические свойства. Остальные углеводороды разделены на следующие группы, в которые входят примеси с достаточно близкими значениями их растворимости в жидком кислороде:

высшие ацетиленовые углеводороды;

предельные и непредельные углеводороды с малой растворимостью в жидком кислороде (группа C_5-C_6);

предельные и непредельные углеводороды со средней растворимостью в жидком кислороде (группа C_3-C_4), в нее входят пропилен, изобутан, бутен-1, н-бутан, изобутилен;

предельные и непредельные углеводороды с высокой растворимостью в жидком кислороде (группа C_1-C_2), в нее входят метан, этан, этилен и пропан.

Распределение углеводородов по группам осуществлено с учетом расположения на хроматограмме пика, соответствующего рассматриваемой примеси.

ПДС установлены на суммарное содержание углеводородов, входящих в каждую группу.

Недавно введены ПДС индивидуально для этана, этилена и пропана, содержание которых ранее нормировалось только в сумме с метаном.

10.3. Методы определения взрывоопасных примесей

Методы определения различных взрывоопасных примесей перечислены ниже:

Анализируемая примесь	Метод анализа
Ацетилен	Конденсационно-калориметрический, хроматографический
Предельные и непредельные углеводороды (индивидуально)	Хроматографический
Сероуглерод	Конденсационно-калориметрический
Масло	Флуоресцентный, нефелометрический
Метан	Хроматографический (непрерывный)

Раздельное определение в жидком кислороде углеводородов проводят хроматографическим методом. Суть этого метода заключается в том, что пробу анализируемого газа вводят в газ-носитель, проходящий по хроматографической колонке, представляющей собой металлическую трубку, заполненную твердой фазой, на которую нанесена специальная жидкость.

В связи с тем, что компоненты, содержащиеся в пробе анализируемого газа, неодинаково адсорбируются или растворяются в жидкости, нанесенной на твердую фазу, их продвижение по длине колонки происходит с разной скоростью. Поэтому на выходе из колонки первым проявляется наиболее плохо сорбирующийся компонент, а последним – наиболее хорошо сорбирующийся компонент.

Выход каждого компонента приводит к определенному изменению свойств газа, выходящего из колонки, что фиксируют специальным детектором. При этом по времени выхода на хроматограмме каждого пика определяют, какому он соответствует веществу, а по площади пика – его концентрацию. В хроматографах, используемых для определения углеводородов в жидком кислороде, в качестве твердой фазы применяют инертное вещество – сферохром (или инзенский кирпич), пропитанное диметилсульфаланом. В качестве газа-носителя используют азот.

В связи с тем, что при определении микроконцентраций углеводородов необходима очень высокая чувствительность, применяют пламенно-ионизационный детектор, действие которого основано на изменении электропроводности пламени водорода при сгорании в нем углеводородов, что фиксируют электронным устройством.

Наряду с этим для повышения чувствительности хроматографа предусматривается криогенное обогащение пробы газа, подаваемой в хроматограф. С этой целью анализируемый газ направляется в погруженный в жидкий кислород специальный концентратор, в котором накапливаются углеводороды, содержащиеся в анализируемом газе. Затем концентратор подсоединяют к хроматографической колонке и нагревают, погружая в воду, благодаря чему накопленные ранее углеводороды переносятся в хроматографическую колонку и разделяются. Описанный метод позволяет осуществить раздельное определение в криогенных продуктах предельных и непредельных

углеводородов (от C_2 до C_7) при чувствительности до $2 \cdot 10^{-11}$ мольных долей при объеме пробы газа 10 дм³.

Методика раздельного определения микроконцентраций углеводородов в криогенных продуктах может быть реализована на любом хроматографе с пламенно-ионизационным детектором.

Для сравнения с нормативами (табл. 11) полученные путем хроматографического анализа данные о содержаниях индивидуальных углеводородов суммируются для каждой группы, указанной в табл. 10.

На воздухоразделительных производствах применяют различные отечественные и зарубежные лабораторные хроматографы, в том числе оснащенные системами автоматической обработки хроматограмм.

На рис. 17 показана типичная хроматограмма пробы жидкого кислорода. Хроматографический метод требует весьма квалифицированного пер-

Таблица 10. Предельные нормы содержания взрывоопасных примесей в жидком кислороде

Наименование примеси или группы	Предельное содержание примеси, мг/дм ³ жидкого кислорода (в пересчете на углерод)
Ацетилен	0,22
Высшие ацетиленовые углеводороды	0,15
Группа C_3-C_6 и более тяжелые, в сумме	1
Группа C_3-C_4 : пропилен, изобутан, бутен-1, н-бутан, изобутилен, в сумме	11
Группа C_1-C_3 : метан, этан, этилен и пропан, в сумме:	
а) в жидком кислороде конденсаторов, последних по ходу жидкости, и в криптоновом концентрате при отборе проб на анализ не реже чем через 4 ч	430
б) в жидком кислороде конденсаторов, последних по ходу жидкости, и в криптоновом концентрате при отборе проб на анализ не реже чем через 2 ч	645
в) в первичном криптоновом концентрате после теплого испарителя при наличии испарителя-конденсатора витого типа и непрерывном контроле за содержанием:	
метан	6800
сумма углеводородов	7600
Этан	200
Этилен	25
Пропан	10
Сероуглерод	0,12 мг/дм ³
Масло	0,4 мг/дм ³
Примечание. При непрерывном контроле за содержанием метана (суммы углеводородов) в криптоновом концентрате содержание углеводородов по пп. а и б не нормируется.	

Таблица 11. Нормативы различных фирм на предельные содержания опасных примесей в жидком кислороде

Примесь	Нормы EIGA (dok 65/99 EFD), ppm [6]	Нормы «Air Liquide» (Standard GR/231.05-0), ppm [11]		Российские нормы, мг/дм ³ в пересчете на углерод
		Сигнал 1-й ступени	Сигнал 2-й ступени	
Метан	500	125	500	6800*
Этан	250	50	200	250
Этилен	200	10	40	25
Пропан	100	5	20	10
Сумма C ₁ —C ₃ (в пересчете на углерод)	—	—	—	430/7600*
Сумма C _n , без метана	500	—	—	Не нормируется
Сумма C ₃ —C ₄	—	—	—	11
Ацетилен	0,5	0,5	1	0,22
Пропилен	35	2	8	—
n-бутан	—	0,5	1	—
i-бутан	—	0,5	1	—
1-бутен	—	0,5	1	—
i-бутен	—	0,5	1	—
1,3-бутен	—	0,5	1	—
n-пентан	—	0,5	1	—
1-пентен	—	0,5	1	—
Сумма C ₄ —C ₅	5	—	—	1
Ацетон	—	0,15	0,3	—
Озон	—	0,01	0,02	—
N ₂ O	100	45	60	—
NO	—	1,5	2	—
NO ₂	—	1	4	—
CO ₂	4	1	2	—

* При двухступенчатом испарении концентрата и непрерывном контроле.

сонала, имеет сравнительно высокую трудоемкость и довольно сложно поддается автоматизации. Поэтому неоднократно делались попытки замены хроматографического метода отдельного определения содержаний в жидком кислороде углеводородов определением их суммарного содержания с использованием так называемых анализаторов общего содержания углеводородов. Например, определять только общее содержание углеводородов рекомендуется в работе [9].

С таким подходом нельзя согласиться, так как он не может надежно обеспечить безопасную работу конденсаторов-испарителей. Это обус-

ловлено тем, что нормы безопасных содержаний большинства углеводородов (см. табл. 11), в десятки раз меньше нормативов на суммарное содержание углеводородов. Поэтому при работе в условиях, когда суммарное содержание углеводородов в жидком кислороде даже значительно меньше нормативов, нельзя гарантировать, что содержания отдельных углеводородов не превышают норм.

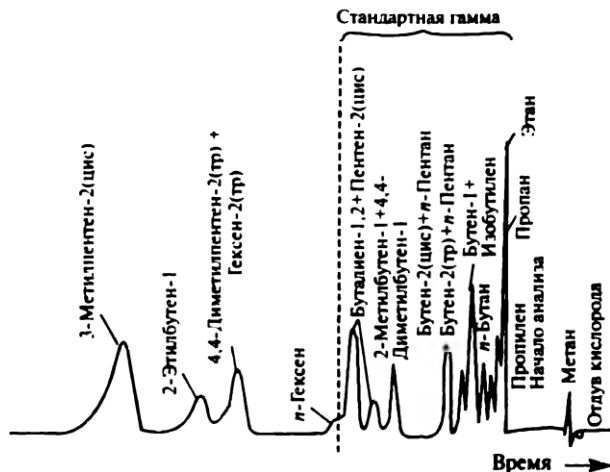


Рис. 17. Хроматограмма пробы жидкого кислорода

При определении концентрации масла в жидком кислороде пробу жидкости испаряют в колбе, на стенках которой остается масло. Затем внутреннюю поверхность колбы омывают растворителем и определяют содержание в нем масла нефелометрическим или флуоресцентным методом.

Для получения при анализах достоверных результатов весьма важное значение имеет правильный отбор проб жидкого кислорода.

На современных установках большой и средней производительности отбор проб из технологических потоков для определения концентрации взрывоопасных примесей осуществляют из специального пробоотборника. Конструкция его представлена на рис. 18. Пробоотборник обычно встраивается в трубопровод.

Анализируемая жидкость через металло-керамический фильтр и капилляр поступает в трубку, обогреваемую потоком воздуха. В результате жидкость полностью испаряется и образующийся газ, соответствующий по своему составу испаряемой жидкости, отбирают на анализ.

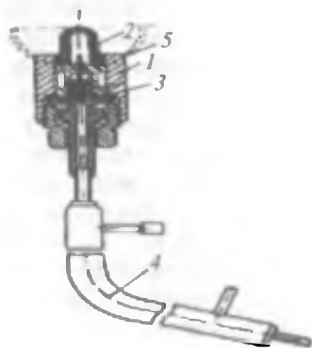


Рис. 18. Пробоотборник жидкого кислорода:

1 — корпус; 2 — фильтр; 3 — капилляр; 4 — фильтр; 5 — труба

Газ, выходящий из пробоотборника, соответствует по составу испаряемой жидкости только в случае, если его отбор производят постоянно, а в рубашку постоянно подают греющий газ. В противном случае концентрация примесей на выходе из пробоотборника может существенно отличаться от действительной концентрации примесей в испаряемой жидкости.

Поэтому расход газа на выходе из пробоотборника и расход греющего газа должны поддерживаться постоянными независимо от того, отбирается в данный момент проба газа на анализ или нет. Пробы газа из дублирующих пробоотборников следует отбирать не ранее чем через 2–3 ч после их включения в работу.

Наиболее целесообразно газ из пробоотборников подавать в лабораторию по трубам. Скорость подачи газа должна быть такой, чтобы время прохождения газа не превышало 5–10 мин.

Пробы газа могут быть доставлены в лабораторию в стеклянных пипетках емкостью 1–2 дм³, через которые пропускают не менее 3–4 объемов анализируемого газа.

На некоторых станциях считается удобным отбирать газ из пробоотборников сразу в концентраторы, погруженные в жидкий кислород.

Категорически запрещается отбирать пробы газа из пробоотборников в резиновые камеры, так как в этом случае возможно значительное загрязнение пробы газа углеводородами, выделяемыми резиной.

Отбор проб жидкого кислорода и жидкого воздуха на анализ должен проводиться в предварительно охлажденные металлические сосуды Дьюара, в специально изготовленные сосуды с легкой крышкой, имеющей отверстие, или в сосуды с узкой горловиной.

Допускается применение стеклянных колб, помещенных в ящик с охлажденной минеральной влагой.

Перед отбором пробы криогенной жидкости на анализ необходимо в специальный сосуд слить не менее трехкратного объема жидкости, находящейся в пробоотборной трубке до вентиля. Во избежание выплескивания жидкости из сосуда вентили следует открывать медленно. Криогенные жидкости, оставшиеся после промывки пробоотборной трубки и после проведения анализов, следует сливать только в специально отведенные места. Категорически запрещается сливать их на грунт и асфальт во избежание взрывов.

Отбирать жидкий кислород в переносные сосуды для анализа можно только из вентилях, указанных в руководстве по эксплуатации установки.

Слив жидкого кислорода в переносные сосуды из отделителей жидкости, расположенных после конденсаторов-испарителей витого типа, может представлять серьезную опасность, так как содержания взрывоопасных примесей в этой жидкости могут быть выше пределов взрываемости. Известен несчастный случай, произошедший с лаборантом, наливавшим для анализа такой жидкий кислород в колбу.

Переносить отобранные пробы в лабораторию необходимо в сосудах с закрытыми крышками, имеющими небольшое отверстие для выхода образующегося пара. В противном случае возможно попадание в пробу углеводородов, содержащихся в воздухе помещений, что приводит к существенному искажению результатов анализов. При переноске проб криогенных жидкостей в неизолированных сосудах происходит значительное упаривание жидкости. При этом концентрация примесей в жидкости повышается пропорционально отношению количества жидкости, залитой в сосуд, к количеству жидкости, оставшейся в нем к началу анализа. Чтобы исключить значительную погрешность анализа, необходимо, чтобы время между отбором пробы жидкости и ее анализом было минимальным.

Пробы криогенных жидкостей для первого анализа при пуске установки после полного отогрева отбирают после вторичного накопления жидкости в аппарате до уровня, заданного инструкцией, но не позднее чем через 3 ч после первого слива жидкости. Затем до накопления в аппарате нормального уровня жидкости пробы отбирают через 2 ч на установках низкого давления и через 4 ч на установках других типов.

После того как уровень жидкости в аппарате достигнет заданного инструкцией, пробы на анализ отбирают в соответствии с указаниями, приведенными в руководстве по эксплуатации.

Если из какой-либо пробоотборной точки отбирают пробы для определения концентрации углеводородов хроматографическим методом, то определять в этой же точке ацетилен химическим методом нет необходимости.

В зависимости от результатов анализов следует принимать меры, предусмотренные инструкцией по эксплуатации установки, которые зависят от особенностей ее технологической схемы.

Смысл мероприятий, проводимых при повышенных содержаниях взрывоопасных примесей в жидком кислороде, заключается в увеличении вывода примесей из аппарата путем повышения расхода выводимой из него жидкости, увеличении эффективности очистки (повышении расхода жидкости, циркулирующей через адсорбер), восстановлении работоспособности адсорберов (проведении досрочной регенерации адсорбента).

В жидком кислороде нормируется также суммарное содержание углеводородов (см. табл. 10), которое может быть получено либо непосредственно при анализе, либо путем суммирования содержания всех углеводородов, определенных хроматографическим методом, и метана.

На металлургических предприятиях обычно содержание метана в жидком кислороде составляет не менее 90% от суммарного содержания всех углеводородов. Поэтому если метан определяют индивидуально, то суммарное содержание углеводородов можно не определять.

Нормативы на суммарное содержание углеводородов установлены в зависимости от частоты отбора проб на анализ.

Если результаты анализа превышают нормативы для групп примесей, приведенных в табл. 10, должен быть проведен повторный анализ, тогда как при превышении нормативов на суммарное содержание углеводородов (или метана) должны быть немедленно приняты меры по их снижению. С этой целью прекращают подачу верхней флегмы на криптоновую колонну или газ из конденсатора криптоновой колонны сбрасывают непосредственно в регенераторы.

Необходимость в этом случае принятия экстренных мер обусловлена тем, что нормативы на суммарное содержание углеводородов связаны с пределом взрываемости гомогенной смеси углеводородов с жидким кислородом. При достижении этого предела смесь становится взрывоопасной.

Для возникновения взрывоопасных условий при превышении нормативов по другим группам углеводородов, приведенных в табл. 10, требуется определенное время. В таких ситуациях не требуется принятия экстренных мер, а допускается принимать решение исходя из результатов повторного анализа.

При рассмотрении результатов определения содержаний углеводородов в жидком кислороде необходимо учитывать не только результаты текущих анализов, которые в совокупности характеризуют эффективность работы средств очистки воздуха и жидкого кислорода, но и среднее содержание примесей в жидком кислороде за весь период работы аппарата после отогрева. При равных промежутках времени между анализами среднее содержание примесей может быть рассчитано как сумма результатов анализов, деленная на число анализов.

Если среднее значение содержаний углеводородов приближается к нормативам, то это значит, что условия работы установки приближаются к опасной зоне и необходимо наряду с мерами, направленными на повышение эффективности работы средств очистки и на устранение источников загрязнения воздуха, провести отогрев конденсатора-испарителя или всей установки.

Глава 11. Обезжиривание оборудования

Необходимость проведения тщательной очистки поверхностей оборудования, соприкасающихся с кислородом, от масла и жира связана со взрывоопасностью системы кислород – масло.

Очистку поверхностей оборудования от масла и жира (обезжиривание) проводят при изготовлении изделий, после их сборки или монтажа.

Обезжиривание проводят также периодически во время эксплуатации оборудования, если на его поверхностях, находящихся в контакте с кислородом, возможно отложение масляных загрязнений.

Технология обезжиривания деталей и изделий, работающих в среде кислорода, регламентирована стандартом «Оборудование криогенное. Методы обезжиривания» (СТП 2082-594–2004) [17].

11.1. Вещества, применяемые для обезжиривания оборудования

Для обезжиривания применяют различные моющие составы, которые в зависимости от механизма их действия могут быть разделены на две группы:

1) органические растворители (в дальнейшем растворители), механизм действия которых заключается в растворении масла и жиров;

2) водные моющие растворы, механизм действия которых заключается в нарушении связи масла с металлической поверхностью и последующем эмульгировании масла [18].

Преимущества органических растворителей: большая скорость удаления загрязнений, высокая степень очистки, возможность проведения обезжиривания при низких температурах и быстрого удаления с деталей и изделий остатка растворителя, возможность использования для обезжиривания способа конденсации растворителя на очищаемой поверхности.

Недостатки органических растворителей: относительно высокая стоимость, токсичность, необходимость использования в ряде случаев достаточно сложного вспомогательного оборудования, трудность удаления отходов растворителей.

Многие из органических растворителей взрывоопасны и токсичны. При применении таких растворителей, даже при нормальной температуре, могут образовываться области с опасными концентрациями паров.

Опасность применения органических растворителей связана также с возможностью образования в этих жидкостях зарядов статического электричества, потенциал которого может достигать значительных величин.

Преимущества водных моющих растворов: экономичность процесса обезжиривания, безопасность работы, возможность полного удаления моющего раствора из оборудования промывкой его водой, многообразие составов и возможность их выбора для конкретных условий.

Недостатки водных моющих растворов: необходимость проведения очистки при повышенных температурах, большая длительность процесса очистки, чем при обезжиривании растворителями, трудность удаления остатков моющего раствора из оборудования и необходимость применения при этом воды и последующей сушки, необходимость механического воздействия (перемешивания).

Применение некоторых рецептур водных моющих растворов связано с необходимостью слива в канализацию достаточно больших количеств отходов, иногда содержащих экологически вредные примеси. В то же время в ОАО «Криогенмаш» подобраны составы и отработана технология обезжиривания водными моющими растворами, исключая негативное влияние на природу.

Выбор того или иного моющего состава определяется конкретными особенностями изделия, подлежащего обезжириванию, и условиями его работы.

Рекомендуемые условия применения растворителей и водных моющих растворов в зависимости от давления и температуры кислорода, при которых работает изделие, приведены в СТП 2082-594–2004.

11.2. Органические растворители

Органические растворители подразделяются на две группы. К первой группе относятся органические растворители, не являющиеся взрывопожароопасными. Эти растворители могут использоваться для обезжиривания как отдельных деталей, так и собранных изделий.

Взрывопожароопасные растворители, относящиеся ко второй группе, используются только на заводах-изготовителях для обезжиривания деталей и узлов изделий при условии обеспечения последующего полного удаления растворителя из внутренних полостей обезжириваемых деталей.

Наиболее пожаробезопасными органическими растворителями являются хлорированные углеводороды и фторированные растворители, такие как хлористый метилен, Хладон 122а и Хладон 141.

Физико-химические свойства некоторых растворителей приведены в табл. 12.

Применение для обезжиривания четыреххлористого углерода запрещено органами санитарного надзора.

Таблица 12. Физико-химические свойства хлорированных углеводородов

Растворитель	Температура кипения –100 кПа, К (°С)	Плотность жидкости при 293 К, кг/м ³
Хладон 122a	346 (73,0)	1,55
Хладон 141	305 (32)	1,24
Метиленхлорид	313 (40)	1,34
Forane 141b	305 (32)	1,24

В последние годы приняты международные соглашения, направленные на предупреждение разрушения озонового слоя атмосферы. Согласно этим соглашениям, предусмотрено прекращение с 1999 года применения в технических целях фреона 113. Учитывая, что этот растворитель достаточно широко применялся для обезжиривания, были разработаны и выпускаются новые озонобезопасные растворители Хладон 122, Хладон 141 и FORANE 141b (хладон 141b).

Наименее токсичный из хлорированных углеводородов хлористый метилен весьма сложно применять для обезжиривания вследствие его большой летучести.

При обезжиривании хлорированными углеводородами обеспечивается весьма высокая степень очистки от жировых загрязнений – остаточное содержание не превышает 20 мг/м².

При выборе растворителя для обезжиривания необходимо обращать внимание на его совместимость с материалами, которые использованы в обезжириваемом изделии. Соответствующие рекомендации содержатся в СТП 2082–594–2004 [17].

При обработке поверхностей бензинами также может быть достигнута достаточно высокая степень удаления жировых загрязнений (остаточное содержание 100 мг/м²). Однако ввиду значительной пожароопасности применение бензина и других подобных растворителей допускается только на машиностроительных заводах для обезжиривания отдельных деталей с соблюдением всех требований пожарной безопасности при работе с огнеопасными материалами. Применение бензина для обезжиривания изделий в сборе запрещается.

11.3. Водные моющие растворы

В состав водных моющих растворов обычно входят электролиты (едкий натр, жидкое стекло, тринатрийфосфат) в количестве 10–20 г/дм³ и поверхностно-активные вещества, действующие как смачиватели и эмульгаторы. В водных моющих растворах, используемых для обезжиривания, нашли применение в качестве поверхностно-активного вещества препараты ОП-7, ОП-10 и др. Некоторые рекомендуемые составы вод-

ных моющих растворов в зависимости от металла обезжириваемого изделия приведены в СТП 2082-594–2004 [17].

В качестве моющего вещества, добавляемого в рекомендуемые составы, можно применять любое из следующих: эмульгаторы ОП-7 или ОП-10 (ГОСТ 8433–57); синтанол ДС10 (ТУ 614313–68); средства бытовой химии.

Наиболее эффективна очистка деталей в водных моющих растворах при температуре 60–80 °С. Дальнейшее повышение температуры недопустимо в связи с возможным разрушением эмульгаторов.

Использование водных моющих растворов является предпочтительным при обезжиривании деталей, арматуры, труб, баллонов и других изделий в тех случаях, когда имеется возможность полного слива моющего раствора и удаления его остатков промывкой водой. Для приготовления растворов должна использоваться вода из хозяйственно-питьевого водопровода, часто объединяемого с пожарным. Применение воды из системы оборотного водоснабжения не допускается.

Для предупреждения коррозии при обезжиривании рекомендуется использовать следующие ингибиторы:

при обезжиривании четыреххлористым углеродом: на 1 дм³ (л) четыреххлористого углерода 1,34 г фенола и 0,96 г бензойной кислоты;

при составлении водных моющих растворов: на 1 дм³ (л) воды 1 г калия двуххромовокислого или 2 г натрия азотнокислого. Этот ингибитор непригоден при обезжиривании изделий из цветных металлов.

Водные моющие растворы значительно менее опасны, чем растворители. Однако при обращении с ними необходимо соблюдать также ряд правил. Учитывая достаточно высокую температуру, при которой используются водные моющие растворы, при работе с ними следует принимать необходимые меры, исключающие ожоги. Погружать детали в ванны надо медленно, не допуская выплескивания моющего раствора.

Все работы, связанные с загрузкой и выгрузкой деталей из ванн, следует проводить в защитной спецодежде и очках. При случайном попадании моющего раствора на тело обожженное место следует промыть большим количеством воды.

Особое внимание должно быть обращено на приготовление моющих растворов, в состав которых входит *каустическая сода*.

Поскольку при растворении и разведении каустической соды выделяется значительное количество тепла, при приготовлении раствора сначала в емкость заливают необходимое количество воды, а потом добавляют щелочь. Выделяющееся при этом тепло распределяется в значительном количестве воды. Если к щелочи добавлять воду, то первые порции воды могут нагреться до кипения, что приведет к разбрызгиванию раствора. По этой же причине не рекомендуется растворять щелочь в горячей воде.

Серьезную опасность может представлять работа с каустической содой и ее водными растворами, используемыми на некоторых установках при

очистке воздуха от диоксида углерода. Особо опасным является попадание едкой щелочи в глаза и на кожные покровы. Поэтому персонал, работающий на аппаратах для химической очистки воздуха от диоксида углерода и занимающийся приготовлением растворов едкой щелочи и отбором проб для анализов, должен знать и безусловно выполнять правила безопасности.

Допускается работа только на исправных аппаратах и насосах, оснащенных всеми необходимыми контрольно-измерительными приборами.

Все разъемные соединения аппаратов и трубопроводов должны быть плотными, сальники щелочных насосов и анализные вентили не должны пропускать раствор.

Все операции по уходу за щелочным оборудованием (в том числе пуск и остановку насосов) следует производить в резиновых перчатках и защитных очках. Приготовление щелочного раствора и отбор проб на анализ необходимо производить в резиновых сапогах, фартуках, защитных очках, перчатках и шлеме. Концы рукавов спецодежды должны плотно прилегать к телу, а брюки должны быть выпущены поверх сапог.

В помещении, где работают с каустической содой, в легкодоступных местах должен постоянно находиться 2%-ный раствор лимонной или борной кислоты, которым следует смачивать пораженные щелочью поверхности кожи и глаз, благодаря чему обеспечивается быстрая и полная нейтрализация щелочи. Если этих растворов под рукой нет, то при попадании щелочи на кожные покровы или в глаза ее необходимо как можно скорее смыть обильной струей воды, а затем смазать поврежденные места вазелином и обратиться к врачу.

11.4. Технология и правила проведения обезжиривания

Перед обезжириванием следует прежде всего убедиться, что качество растворителя полностью удовлетворяет требованиям стандартов или технических условий, что должно быть подтверждено паспортом (сертификатом) завода-изготовителя.

Растворители, поступающие для обезжиривания в виде «технических продуктов», перед использованием необходимо проверять на соответствие ГОСТу по внешнему виду и цвету, по содержанию нелетучего остатка и реакции среды. Кроме того, непосредственно перед началом обезжиривания растворитель следует проверять на содержание масла.

Для обезжиривания может быть использован растворитель, содержание масла в котором не превышает 50 мг/дм^3 . При выполнении этого требования допускается также и повторное использование растворителя. Растворитель, содержащий большее количество масла, но не более 500 мг/дм^3 , может быть использован для первичного обезжиривания сильно загрязненных изделий с обязательным последующим обезжириванием этих изделий чистым растворителем.

Очистка растворителя, загрязненного маслом (регенерация), осуществляется способом перегонки в специальных установках. Такая установка состоит из холодильника-конденсатора и перегонного куба, помещенного в водяную баню, подогрев которой производится электронагревателями. Пары растворителя из перегонного куба направляются в охлаждаемый водой холодильник-конденсатор, из которого чистый растворитель стекает в бак. При ведении процесса регенерации следует постоянно следить за температурой растворителя в перегонном кубе. При этом необходимо учитывать, что температура кипения растворителя повышается по мере увеличения загрязненности. Регенерацию следует вести до тех пор, пока температура растворителя в перегонном кубе не станет примерно на 12 °С выше температуры кипения чистого растворителя.

Обезжиривание растворителями осуществляется следующими методами: погружением деталей в растворитель или заполнением обезжириваемых изделий, циркуляцией растворителя в обезжириваемых изделиях, конденсацией паров растворителя на обезжириваемых поверхностях, струйной очисткой, протиркой загрязненных мест и ультразвуковым способом.

Обезжиривание закрытых аппаратов осуществляется в два этапа. Сначала производится собственно обезжиривание, а затем контрольное обезжиривание. При контрольном обезжиривании применяют чистый растворитель в количестве не менее 50% используемого при основном обезжиривании.

Обезжиривание считается удовлетворительным, если содержание масла в растворителе, сливаемом после контрольного обезжиривания, не превышает более чем на 20 мг/дм³ содержание масла в растворителе, используемом для контрольного обезжиривания. В противном случае обезжиривание повторяют.

При обезжиривании погружением или заполнением изделие необходимо выдержать в растворителе в течение 15–20 мин, при этом желательно проводить барботаж воздуха через растворитель. Обезжиривание изделий, имеющих значительную вместимость, может осуществляться путем их частичного заполнения растворителем с последующим покачиванием, обеспечивающим омывание всей внутренней поверхности.

При обезжиривании циркуляцией применяется специальное оборудование. Для получения хороших результатов следует обеспечить омывание растворителем всех поверхностей, подлежащих обезжириванию. При невозможности выполнить это условие обезжиривание должно проводиться путем заполнения. Длительность циркуляции растворителя составляет обычно 25–30 мин. Количество циркулирующего растворителя должно быть не менее двукратного объема изделия. Количество циркулирующего растворителя при контрольном обезжиривании составляет 20–30% от количества растворителя при первичном обезжиривании.

Обезжиривание методом конденсации паров растворителя на обезжириваемых поверхностях осуществляется подачей паров растворителя в полости оборудования, подлежащие обезжириванию. Для получения паров растворителя используются бачки, подогреваемые в водяной бане. При соприкосновении паров растворителя с холодными стенками изделия пары конденсируются и конденсат стекает в нижнюю часть промываемого оборудования, откуда он периодически удаляется.

При обезжиривании емкостей пары растворителя подают в предварительно нагретую емкость через вентиль заполнения-опорожнения, воздух вытесняют из емкости периодически через вентиль газосброса. Конденсат, стекающий в нижнюю часть емкости, отводят периодически через трубопровод подачи жидкости в испарители. Анализ на содержание масла в сливаемом растворителе проводят при каждом сливе.

Обезжиривание заканчивают после того, как содержание масла в сливаемом растворителе станет менее 20 мг/дм^3 . Расход растворителя на обезжиривание в любом случае должен быть не менее $5 \text{ дм}^3/\text{м}^2$. Если в емкости поднимается давление, это свидетельствует о том, что ее стенки нагрелись до температуры, близкой к температуре кипения растворителя. В этом случае емкость следует охладить продувкой холодным воздухом.

В последние годы находит широкое применение ультразвуковой метод обезжиривания. Этот метод позволяет значительно увеличить скорость процесса обезжиривания, улучшить его качество. Использование ультразвука дает возможность эффективно обезжиривать изделия, имеющие сложную конфигурацию. Обработка деталей ультразвуком производится в заполненной рабочим раствором ванне, к которой подключен источник ультразвука.

Выбор способа обезжиривания определяется конструктивными особенностями обезжириваемого изделия. Основным условием эффективного проведения процесса обезжиривания является обеспечение омывания растворителем всей поверхности изделия.

Различные способы обезжиривания целесообразно применять для следующих видов изделий: погружение — для мелких изделий, заполнение — для аппаратуры небольшой емкости, циркуляцию — для трубопроводов, коммуникаций, внутритрубных поверхностей теплообменников и т. п., конденсацию паров растворителя — для крупных емкостей. Следует отметить, что последний способ обеспечивает достаточно высокую чистоту поверхности при малом расходе растворителя.

Остатки растворителя после обезжиривания удаляют продувкой изделия нагретым до $50\text{--}60^\circ\text{C}$ воздухом или азотом, не содержащими масла. Длительность продувки зависит от особенностей изделия. Содержание паров растворителя в газе после продувки не должно превышать 10 мг/дм^3 .

Растворители иногда применяют для обезжиривания поверхностей протиркой салфетками и щетками, а также для стирки фильтрующих

элементов. Необходимо отметить, что в этих случаях применение растворителей совершенно неоправданно и создает очень серьезные опасности для персонала. В указанных случаях, так же как и для обезжиривания деталей погружением, следует применять водные моющие растворы.

Для обезжиривания водными моющими растворами используются следующие способы.

1. Погружение деталей последовательно в две ванны с горячим водным моющим раствором с промежуточной промывкой и окончательной двукратной промывкой в горячей воде. Длительность выдержки деталей в ваннах с водным моющим раствором около 15–20 мин, в ваннах с водой 5–10 мин.

2. Двукратное заполнение изделий моющим раствором с промежуточной и окончательной промывкой изделий горячей водой.

3. Протирание изделий салфетками или щетками, смоченными горячим моющим раствором, с последующим тщательным протиранием салфетками, смоченными водой.

4. Подача горячего моющего раствора сильной струей через специальные насадки на обезжириваемые поверхности. Этот способ может быть применен для обезжиривания крупных емкостей для жидкого кислорода. Насадка должна обеспечивать подачу сильной струи моющего раствора на всю внутреннюю поверхность емкости. Количество горячего моющего раствора, подаваемого на обезжириваемую поверхность, должно быть не менее $25 \text{ дм}^3/\text{м}^2$. Обезжиривание следует проводить два раза с промежуточной и окончательной промывкой горячей водой.

5. Циркуляция горячего моющего раствора в обезжириваемой системе. Количество циркулирующего раствора должно быть не менее двукратного объема изделия. Рекомендуется двукратная циркуляция с промежуточной и окончательной промывкой в горячей воде. Скорость циркуляции может изменяться в пределах 0,5–1,5 м/с.

6. Ультразвуковой метод.

Перед обезжириванием изделий, покрытых консервационными смазками, основной слой смазки должен быть удален обработкой поверхности горячей водой, нагревом или механическим снятием. Вода, используемая для промывки изделий, после обезжиривания не должна содержать масла, поэтому недопустимо применение для этих целей воды из системы оборотного водоснабжения. После обезжиривания деталей или узлов в водных моющих растворах производится их сушка обдувом подогретым сухим сжатым воздухом. Применяемый для этого воздух не должен содержать масла. Сушка ведется до полного высыхания изделий.

11.5. Качество обезжиривания

Качество обезжиривания может быть проверено следующими способами:

1) определением содержания масла в растворителе, слитом из изделия после проведения контрольного обезжиривания; качество обезжиривания считается удовлетворительным, если содержание масла в слитом растворителе не превышает более чем на 20 мг/дм^3 содержание масла в исходном растворителе;

2) путем определения содержания масла на салфетке из стекловолокна после протирки участка очищенной поверхности; перед протиркой салфетка тщательно обезжиривается и смачивается чистым растворителем;

3) осмотром открытых очищенных поверхностей с помощью люминесцентных приборов.

Определение содержания масла в растворителе обычно основывается на способности минеральных масел флюоресцировать при воздействии ультрафиолетового излучения.

Для проведения анализа может использоваться фотоэлектрический флюориметр типа ФЛЮМ, а также люминесцентный компаратор ЛК1.

В последние годы для определения массовой концентрации масел в растворителях достаточно широко применяется анализатор Флюорат 02-3М, выпускаемый НПФ «Люмекс» (С.-Петербург). Это современный прибор, имеющий многочисленные преимущества по сравнению с упомянутыми выше приборами.

Содержание масла на салфетках можно определить наблюдением флюоресценции салфеток при их облучении ультрафиолетовыми лучами с использованием аппарата для анализа витаминов в растворах или определением содержания масла в растворителе, которым обрабатывается салфетка.

Обезжиривание считается удовлетворительным, если при осмотре салфетки на приборе на ней не зафиксировано следов масла.

Технологию обезжиривания отдельных видов оборудования разрабатывают заводы-изготовители на основе СТП 2082-594—2004 [17].

11.6. Периодичность обезжиривания

В жидком кислороде, который транспортируют или хранят в емкостях, может содержаться масло. Сроки проведения обезжиривания этих емкостей определяются содержанием масла в жидком кислороде. Если содержание масла в жидком кислороде систематически превышает $0,01 \text{ мг/дм}^3$, то емкость должна обезжириваться, когда количество масла на 1 м^2 поверхности, соприкасающейся с кислородом, достигнет 500 мг:

$$\sum_1^n VC / F = 500,$$

где n – число заполнений емкости; F – внутренняя поверхность емкости, м²; V – объем жидкого кислорода, заливаемого в емкость, дм³; C – содержание масла в жидком кислороде, мг/дм³.

При содержании масла в жидком кислороде меньше 0,01 мг/дм³ обезжиривание емкостей проводят только после их освидетельствования.

Кислородные баллоны и емкости жидкого кислорода подлежат обезжириванию после их ремонта, а также после гидравлических испытаний и освидетельствований.

Насосы жидкого кислорода обезжиривают в те же сроки, что и оборудование, в состав которого они входят. Кроме того, детали насосов обезжиривают перед сборкой после ремонта.

Емкости, входящие в состав газификационных установок, обезжиривают в сроки, указанные для сосудов и емкостей жидкого кислорода.

Испарители газификационных установок, в которых при полном испарении жидкого кислорода происходит отложение почти всего масла, содержащегося в жидком кислороде, обезжиривают не реже чем через 1000 ч их работы. Насосы и трубопроводы жидкого кислорода, входящие в состав газификационных установок, обезжиривают одновременно с обезжириванием емкостей.

Трубопроводы жидкого кислорода и шланги обезжиривают не реже одного раза в год, если содержание масла в жидком кислороде превышает 0,01 мг/дм³. Кроме того, трубопроводы жидкого кислорода, шланги и кислородопроводы обезжиривают после ремонтов.

Кислородные компрессоры (поршневые и центробежные) обезжиривают после ремонтов, во время которых их внутренние поверхности могли быть загрязнены.

11.7. Обеспечение безопасности при обезжиривании

Пары всех хлорированных углеводородов, применяемых при обезжиривании, ядовиты и относятся к сильнодействующим веществам. При вдыхании воздуха с большой их концентрацией даже в течение короткого времени или с малой концентрацией в течение длительного времени наступает отравление.

Последствия отравления могут быть временными и исчезать после пребывания в течение нескольких часов на свежем воздухе. При длительном и систематическом пребывании в атмосфере, загрязненной хлорированными углеводородами, могут быть серьезные поражения печени и почек.

Предельно допустимые концентрации некоторых хлорированных углеводородов и других растворителей в воздухе рабочих помещений при восьмичасовом рабочем дне, установленные санитарными нормами про-

ектирования промышленных предприятий (СанПиН) и ГОСТ 12.01.005, характеризуются следующими величинами, мг/м³:

Хлористый метилен	50
Хладон 122а	3000
Хладон 141	1000
FORANE 141b	1000
Бензин Б70	100*
Керосин	300

* В пересчете на углерод.

Отравление растворителями возможно не только при вдыхании их паров, но и при длительном соприкосновении жидких растворителей с кожным покровом. Чрезвычайно опасно также попадание хлорированных углеводородов в организм человека.

К работе с хлорированными углеводородами допускают лиц не моложе 18 лет, прошедших медицинский осмотр. Все систематически работающие с хлорированными углеводородами должны один раз в год проходить профилактический медицинский осмотр.

Обезжиривание надо проводить по утвержденной руководством предприятия специальной инструкции, составленной на основе инструкции завода-изготовителя с учетом местных производственных условий.

Перед работой с растворителями работающие должны быть тщательно проинструктированы об опасных моментах работы и мерах предосторожности, которые следует соблюдать. Знание работающими правил безопасной работы должно быть проверено и удостоверено подписью ответственного лица.

Все работы по подготовке оборудования к обезжириванию, его проведению и удалению остатков растворителя должны проводиться под руководством и надзором ответственного инженерно-технического работника, назначенного приказом по предприятию.

Рабочие помещения, где проводят работы с растворителями, следует оборудовать приточно-вытяжной вентиляцией, которая обеспечит максимальное удаление паров растворителей, с тем, чтобы их содержание в воздухе не превышало приведенных выше санитарных норм. На слухках растворителей в атмосферу должны быть установлены специальные уловители.

Помещения, где работы с растворителями проводят очень редко, обычно на время проведения этих работ оснащают дополнительной вентиляцией. Все рабочие, находящиеся в помещении, где проводят обезжиривание растворителями, должны быть обеспечены противогазами с патронами марки А. Кроме этого, в помещении необходимо оборудовать аварийный шкаф с противогазами.

Рабочие, непосредственно проводящие обезжиривание и работающие с растворителями, должны быть обеспечены спецодеждой: брезентовыми фартуками, брезентовыми рукавицами и кожаной обувью, которые должны храниться в специальном проветриваемом помещении отдельно от другой спецодежды.

Хлорированные углеводороды при соприкосновении с открытым пламенем или нагретыми предметами разлагаются с выделением фосгена – отравляющего вещества. Поэтому в помещениях, где проводят работы с растворителями, категорически запрещаются работы с огнем и курение.

С целью исключения возможности попадания растворителя в полости оборудования, не подлежащие обезжириванию, а также в изоляционное пространство перед проведением обезжиривания оборудование опрессовывают и устраняют обнаруженные неплотности.

Безопасность работ при проведении обезжиривания растворителями обеспечивается максимальным сокращением попадания паров растворителей в помещение, где проводят работы. Это достигается применением специального герметичного оборудования для подачи растворителя в промываемые агрегаты и слива его, исключением заливки растворителя ведрами, герметичностью подающих и сливных коммуникаций. Кроме того, организуют тщательный учет количества растворителя, подаваемого на оборудование и сливаемого из него.

Обезжиривание деталей методом погружения можно проводить только в специальных ваннах с бортовыми отсосами или вытяжных шкафах, исключающих поступление паров растворителя в помещение.

В помещениях, где проводят обезжиривание, в непосредственной близости от промываемых агрегатов следует не реже одного раза в смену брать анализ воздуха на содержание паров растворителя.

При продувке и сушке оборудования после обезжиривания воздух, содержащий пары растворителя, выводят за пределы помещения по специальным шлангам в места, откуда исключается его попадание в рабочие помещения. Более эффективна установка на концах шлангов специальных поглотителей. Категорически запрещается выбрасывать воздух или азот, содержащие пары растворителя, в помещение цеха.

Перед входом в помещение, где проводят обезжиривание, вывешивают предупреждающие плакаты с надписями: «Хлорированные углеводороды. Яд. Смертельно!», «Посторонним вход воспрещен», «Не курить!».

При хранении растворителей и обращении с ними следует соблюдать ряд специальных правил. Хранить растворитель следует в темном, сухом, прохладном и специально отведенном помещении, оборудованном приточно-вытяжной вентиляцией, в герметично закрывающейся таре. Допускается применение стеклянной тары. При этом должны быть приняты меры, исключающие возможность ее повреждения. Доступ в помещение,

где хранится растворитель, разрешается только лицам, допущенным к работе с ним. Все операции, связанные с переливанием растворителя из одной емкости в другую, должны проводиться в помещении или на открытом воздухе с обязательным использованием средств личной защиты (противогаз, спецодежда).

Необходимо принимать меры, исключающие проливы растворителя на пол. Пролитый растворитель следует немедленно убирать сухим методом — засыпкой древесными опилками, песком и т. п. Последние необходимо захоранивать в месте, согласованном с санэпидстанцией.

Тару из-под растворителя следует хранить плотно закрытой в специальном помещении или на открытом воздухе.

При обезжиривании деталей бензином и другими огнеопасными растворителями особое внимание должно уделяться пожарной безопасности.

При работе с легколетучими растворителями, например типа Хладон 122, возможно состояние удушья от недостатка кислорода при высоком содержании паров растворителя в воздухе.

Поэтому при отсутствии специальной вентиляции количество таких растворителей, заливаемых в обезжириваемые системы или во вспомогательное оборудование, не должно превышать 0,3 кг на 1 м³ помещения.

11.8. Этиловый спирт

Спирт этиловый (гидролизный и ректифицированный из пищевого сырья) исключен из растворителей, рекомендуемых для обезжиривания оборудования, работающего в среде кислорода, как не обеспечивающий необходимой степени очистки. Установлено, что после погружения изделий в этиловый спирт удаляется не более 50 % начального количества масла, а толщина оставшейся пленки масла достигает нескольких десятков микрометров [16].

Из практики эксплуатации кислородного оборудования известны многочисленные случаи взрывов и загораний, происходивших после обезжиривания оборудования этиловым спиртом.

Например, в г. Фастове после обезжиривания газификатора не было обеспечено полное удаление спирта из сосуда, насоса жидкого кислорода и коммуникаций путем продувки их горячим азотом. В результате этого после заполнения газификатора жидким кислородом произошел взрыв с последующим загоранием оборудования, что привело к гибели двух человек.

К еще более тяжелым последствиям привел взрыв в кислородной установке в г. Николаеве, произошедший в результате попадания в изоляционное пространство спирта, а затем жидкого кислорода.

Этиловый спирт непригоден для обезжиривания, так как экспериментально установлено, что он практически не растворяет жировые загрязнения.

ния. Кроме этого, учитывая взрыво- и пожароопасность спирта в контакте с кислородом, его не рекомендуется использовать при обезжиривании кислородного оборудования. Однако до настоящего времени некоторые организации (медицинские учреждения, организации министерства обороны и некоторые другие) иногда используют спирт для обезжиривания кислородного оборудования. Это является грубым нарушением правил безопасности и требований нормативно-технической документации.

В последние годы вновь появляются многочисленные обращения с просьбами разрешить применение этилового спирта для обезжиривания кислородного оборудования. Как правило, это связывается с тем, что по экономическим и санитарно-гигиеническим соображениям запрещается применение четыреххлористого углерода, фреона 113 и ряда других растворителей.

Точка зрения автора неоднократно сообщалась и остается неизменной. Этиловый спирт не может быть использован для обезжиривания кислородного оборудования, так как не обеспечивает необходимой степени удаления жировых загрязнений. Кроме того, его применение может создавать серьезные опасности при контакте с жидким и газообразным кислородом.

Глава 12. Обеспечение безопасности при обращении с аппаратами и сосудами, работающими под давлением

12.1. Общие положения

Аппараты и сосуды, заполненные газом, находящимся под давлением, могут представлять значительную опасность. Это объясняется тем, что энергия, заключенная в сосуде, где находится газ под давлением, весьма значительна. В случае разрушения стенки сосуда эта энергия практически мгновенно реализуется в волну давления, которая может вызвать весьма серьезные последствия.

Известны многочисленные серьезные аварии и несчастные случаи, вызванные разрушениями сосудов, работавших под давлением газа. Поэтому устройство и эксплуатация сосудов, работающих под давлением, регламентированы специальными правилами, обязательными для выполнения на всех предприятиях и в организациях страны независимо от их ведомственного подчинения. Эти «Правила устройства и безопасной эксплуатации сосудов, работающих под давлением» (ПБ 03-576—03) утверждены Ростехнадзором, который осуществляет контроль за их выполнением.

Указанные правила определяют требования к устройству, изготовлению, монтажу, ремонту и эксплуатации сосудов, работающих под давлением. Они распространяются: на сосуды, работающие под избыточным давлением выше 0,07 МПа ($0,7 \text{ кгс/см}^2$); цистерны и бочки для перевозки сжиженных газов, давление паров которых при температуре 323 К (50°C) превышает 0,07 МПа, к ним относятся все криогенные жидкости (кислород, азот, аргон и др.); баллоны, предназначенные для перевозки и хранения сжатых, сжиженных и растворенных газов под давлением более 0,07 МПа.

Сосуды, работающие под давлением, могут быть изготовлены только на предприятиях, которым Ростехнадзор предоставляет такое право.

К сварке сосудов и их элементов допускаются только сварщики, имеющие специальную квалификацию.

Для управления работой и обеспечения нормальных условий эксплуатации сосуды должны быть оснащены приборами для измерения давления и температуры среды, предохранительными устройствами, запорной арматурой, указателями уровня жидкости, приспособлениями для удаления среды и образующегося конденсата.

Каждый сосуд должен быть снабжен манометром. Класс точности манометров не менее 2,5. Рабочее давление на шкале манометра должно находиться во второй трети шкалы, а красная черта — на делении, соответствующем разрешенному рабочему давлению в сосуде.

Манометр не допускается к применению, если отсутствует пломба или клеймо, просрочен срок проверки, стрелка манометра при его выключении не возвращается на нулевую отметку шкалы, разбито стекло или имеются другие повреждения, которые могут отразиться на правильности показаний.

Проверку манометров и их опломбирование производят не реже одного раза в год; через шесть месяцев должна производиться дополнительная проверка рабочих манометров контрольными.

12.2. Предохранительные клапаны

Число предохранительных клапанов, их размеры и пропускную способность должны выбирать по расчету, чтобы в сосуде не могло образоваться давление, превышающее рабочее более чем на 0,05 МПа (0,5 кгс/см²) для сосудов с давлением до 0,3 МПа (3 кгс/см²) включительно, на 15% для сосудов с давлением от 0,3 до 6 МПа (60 кгс/см²) и на 10% для сосудов с давлением выше 6 МПа.

Рабочую среду, выходящую из предохранительного клапана, необходимо отводить в безопасное место.

Особенность предохранительных клапанов, устанавливаемых на аппаратах с низкотемпературными жидкостями и газами, заключается в необходимости обеспечения их полной герметичности. Это обусловлено тем, что даже при очень небольшой неплотности предохранительного клапана происходит намораживание на нем значительных количеств льда и снега, исключающих возможность нормальной работы клапанов.

Известно несколько аварий, вызванных разрушением ректификационных колонн вследствие превышения в них давления, при котором предохранительные клапаны не сработали, так как были покрыты слоем льда. Для предупреждения обмерзания предохранительные клапаны поршневых детандеров рекомендуется обдувать сухим газом.

12.3. Техническое освидетельствование и срок службы

Все сосуды, работающие под давлением, регулярно подвергают техническому освидетельствованию, которое проводится после монтажа, до пуска в работу и периодически в процессе эксплуатации, а в необходимых случаях и внеочередному.

Техническое освидетельствование сосудов, регистрируемых в органах Росгортехнадзора, проводится специалистами организации, имеющей

лицензию Ростгортехнадзора на проведение экспертизы промышленной безопасности технических устройств.

Техническое освидетельствование сосудов, не регистрируемых в органах Ростгортехнадзора, проводится лицом, ответственным за осуществление производственного контроля за соблюдением требований промышленной безопасности при эксплуатации сосудов, работающих под давлением.

Возможность продления срока службы для сосудов, отработавших расчетный (установленный) срок службы, определяется по результатам технического диагностирования и определения остаточного ресурса, выполненного специализированной организацией или организациями, имеющими лицензию Ростехнадзора на проведение экспертизы промышленной безопасности сосудов.

Объем, методы и периодичность технических освидетельствований сосудов (за исключением баллонов) должны быть определены изготовителем и указаны в руководстве по эксплуатации.

Сосуды, находящиеся в эксплуатации, подвергаются следующим видам технического освидетельствования: внутреннему и наружному осмотрам для оценки состояния соответствующих поверхностей и влияния среды на стенки сосуда, проводимым не реже одного раза в четыре года; гидравлическому испытанию с предварительным внутренним осмотром, проводимым не реже одного раза в восемь лет.

Техническое освидетельствование регистрируемых в органах Ростехнадзора сосудов производится специалистом организации, имеющей лицензию Ростехнадзора на проведение экспертизы промышленной безопасности технических устройств (сосудов).

При невозможности по конструктивным особенностям сосудов проведения внутренних осмотров их заменяют гидравлическим испытанием и осмотром в доступных местах.

В случаях, когда проведение гидравлических испытаний невозможно (недопустимые напряжения от массы воды в фундаменте, в межэтажных перекрытиях или в самом сосуде, наличие в сосуде футеровки или заполнителя, препятствующего его заполнению водой), разрешается заменять его пневматическим испытанием (воздухом или инертным газом). Этот вид испытания допускается при условии контроля сосуда методом акустической эмиссии или другим методом, согласованным с Ростехнадзором.

Пневматические испытания сосудов являются весьма ответственной операцией. Нарушение правил их проведения может привести к аварии с крайне тяжелыми последствиями. Поэтому пневматические испытания сосудов на плотность и прочность при проведении технического освидетельствования должны проводиться при строгом соблюдении инструкций и правил по технике безопасности.

При проведении испытаний особое внимание должно быть обращено на следующее:

а) до начала испытаний сосудов пробным давлением необходимо проверить состояние кожуха установки и убедиться, что он полностью собран, а отдельные царги стянуты между собой на все болты, за исключением крыши кожуха и люков, через которые предусматриваются выход воздуха и осмотр испытываемых сосудов;

б) если при испытании рабочим или пробным давлением в сосуде обнаружены неплотности, необходимо сбросить давление в сосуде до атмосферного, убедиться в отсутствии давления и только после этого устранить неплотности;

в) пневматические испытания сосудов на прочность пробным давлением должны проводиться минимальным числом рабочих (посторонних лиц в зоне испытаний быть не должно);

г) персонал цеха, обслуживающий расположенное рядом действующее оборудование, на время пневматических испытаний сосудов на прочность должен быть удален в безопасное место;

д) зона проведения испытаний должна быть огорожена, а в местах возможного появления посторонних должны быть вывешены предупредительные надписи.

12.4. Требования к персоналу, обслуживающему сосуды

Обслуживание сосудов, работающих под давлением, может быть поручено лицам, достигшим 18-летнего возраста и прошедшим производственное обучение, в том числе и инструктаж по безопасному обслуживанию сосудов, и аттестацию в квалификационной комиссии.

Лицам, прошедшим аттестацию, выдается специальное удостоверение. Периодически, но не реже чем через 12 мес. должна осуществляться проверка знаний персоналом правил безопасной эксплуатации сосудов, результаты которой оформляются протоколом.

Обслуживающий персонал обязан строго выполнять инструкцию по режиму эксплуатации сосудов и безопасному их обслуживанию, а также своевременно проверять исправность действия арматуры, контрольно-измерительных приборов и предохранительных устройств.

Производить ремонт сосуда или его элементов в период работы сосуда запрещается.

Правила предусматривают следующие случаи, когда эксплуатация сосуда должна быть прекращена:

а) при повышении давления в сосуде более разрешенного, несмотря на выполнение всех требований инструкции;

б) при неисправности предохранительных клапанов;

в) при обнаружении в основных элементах сосуда трещин, пропусков

и потения в сварных швах, течи в заклепочных и болтовых соединениях, разрыва прокладок;

г) при неисправности манометра и невозможности определить давление по другим приборам;

д) при неисправности или неполном числе крепежных деталей крышек и люков;

е) при возникновении пожара, непосредственно угрожающего сосуду под давлением;

ж) при неисправности (отсутствии) контрольно-измерительных приборов и средств автоматики, предусмотренных проектом.

12.5. Баллоны

Для хранения и перевозки продуктов разделения воздуха (кислорода, азота, аргона и др.) под высоким давлением применяют баллоны.

Газ, находящийся в баллоне, обладает достаточно большой энергией, поэтому при неправильной эксплуатации баллонов возможны очень серьезные аварии. Если случайно сломать ventиль баллона, то газ, находящийся в баллоне, будет истекать из отверстия с критической скоростью. Возникающая при истечении реактивная сила может достигать 20 кН и более.

Известен случай, когда несколько газовых баллонов вместимостью каждый около 400 дм³ при аварии были выброшены реактивной силой на расстояние более 100 м.

Взрыв баллона также может привести к очень тяжелым последствиям. При этом следует различать взрыв баллона и его разрыв, внешне протекающий, как взрыв. В последнем случае это разрушение баллона от внутреннего давления газа в результате недостаточной прочности металла корпуса баллона. Такие разрушения иногда происходили при толчках, ударах, падении наполненных баллонов. Например, на одном предприятии двое рабочих, нарушая правила безопасности,несли баллон на плечах и уронили его. Баллон ударился о рельс железнодорожного пути и разорвался.

Происходящие иногда взрывы баллонов с кислородом обусловлены случайным попаданием в них горючих жидкостей или газов, причем количество этих горючих веществ, которые могут привести к взрыву баллона, должно быть не таким уж малым. Подсчитано, что взрыв кислородного баллона вследствие сгорания внутри него какого-либо органического вещества может произойти, если количество этого вещества составит 300—400 г. Такое количество горючего вещества не может оказаться в баллоне случайно, а может попасть в него только в результате грубейших нарушений правил эксплуатации, главным образом при использовании баллонов не по назначению.

Очень опасно загрязнение кислородных баллонов горючими газами. Оценочные расчеты показывают, что для взрыва кислородного баллона

достаточно небольшого его загрязнения горючими газами. Например, при загрязнении метаном его парциальное давление должно составлять 0,45 МПа (4,5 кгс/см²), а ацетоном 0,14 МПа (1,4 кгс/см²).

Горючая смесь в кислородном баллоне может образоваться при незначительных отклонениях от правил проведения газопламенных работ. При нормальном ведении этих работ горючий газ не может перетекать в кислородный баллон. Однако при недопустимо высоком давлении горючего газа и небольшом давлении кислорода не исключено загрязнение его горючим газом до опасных концентраций за небольшое время, если мунштук горелки закрыт. Это обстоятельство было подтверждено опытным путем.

Загрязнение кислородных баллонов горючим газом при ведении газопламенных работ можно избежать, если прекращать пользоваться кислородным баллоном при давлении в нем не ниже, чем давление горючего газа после редуктора, т. е. около 0,25 МПа (2,5 кгс/см²).

Учитывая сказанное, эксплуатация баллонов должна вестись в строгом соответствии с правилами устройства и безопасной эксплуатации сосудов, работающих под давлением.

Безопасность эксплуатации баллонов обеспечивается: 1) исключением возможности наполнения горючими газами баллонов, предназначенных для негорючих газов, и кислородом баллонов, предназначенных для горючих газов; 2) необходимой механической прочностью баллонов и надлежащим контролем за их состоянием; 3) соблюдением правил их наполнения, транспортирования и использования.

Для исключения возможности ошибочного наполнения кислородом баллонов с горючими газами вентили кислородных баллонов выполняют с правой резьбой, в то время как вентили баллонов для горючих газов выполняют с левой резьбой.

Кроме этого, окраска и маркировка баллонов для различных газов строго регламентированы правилами безопасности (ПБ 03-576—03) (табл. 13).

В верхней части баллона выбивают клеймо, в котором указывают знак завода-изготовителя, номер баллона, массу в килограммах, даты изготовления и следующего испытания, рабочее и пробное давление, емкость.

Баллоны, находящиеся в эксплуатации, регулярно подвергают техническому освидетельствованию (не реже чем через пять лет), которое, как правило, проводят на заводах, наполняющих баллоны, или других предприятиях, имеющих разрешение инспекции Росгортехнадзора.

Освидетельствование баллонов проводят в соответствии со специальными методическими указаниями Росгортехнадзора. Баллоны осматривают для выяснения состояния их стенок, наличия коррозии, трещин, вмятин и т. п. При этом оценивают возможности дальнейшей эксплуатации. Измерение массы и емкости баллона проводят для оценки возможного утонения его стенок вследствие коррозии и других явлений. При по-

Таблица 13. Цвета окраски баллонов и надписей

Газ	Цвет окраски баллона	Надписи		Цвет полосы
		текст	цвет	
Азот	Черный	Азот	Желтый	Коричневый
Аргон сырой	•	Аргон	Белый	Белый
Аргон технический	•	Аргон технический	Синий	Синий
Аргон чистый	Серый	Аргон чистый	Зеленый	Зеленый
Водород	Темно-зеленый	Водород	Красный	—
Воздух	Черный	Сжатый воздух	Белый	—
Гелий	Коричневый	Гелий	Белый	—
Кислород	Голубой	Кислород	Черный	—
Кислород медицинский	•	Кислород медицинский	•	—
Ацетилен	Белый	Ацетилен	Красный	—
Углекислота	Черный	Углекислота	Желтый	—

тере массы более чем на 5% и увеличении емкости более чем на 1,5% баллоны используют при сниженном давлении. При потере массы более чем на 20% или увеличении емкости более чем на 30% баллоны не допускают к дальнейшей эксплуатации.

Гидравлическое испытание баллонов проводится при давлении, в 1,5 раза превышающем рабочее. Время выдержки под давлением не менее 1 мин.

Весь комплекс работ, проводимых при освидетельствовании баллонов вместимостью 40 дм³, может быть выполнен при использовании специального оборудования, выпускаемого различными предприятиями. С помощью приспособления выполняют вывертывание и ввертывание баллонных вентилей, гидравлические испытания, перевертывание баллона для удаления воды, осмотр состояния внутренней поверхности, перемещение баллона для взвешивания.

Обезжиривание кислородных баллонов осуществляют растворителями или горячим водным моющим раствором. Применение спирта для обезжиривания баллонов категорически запрещается.

При наполнении баллонов возможны утечки различных газов в помещение. Поэтому помещение, где расположены наполнительные ramпы, должно тщательно проветриваться и в них должен быть организован регулярный контроль содержания в воздухе кислорода.

Эти помещения должны быть оснащены ваннами с водой или душевыми кабинами.

Лица, соприкасающиеся с кислородными баллонами, должны всегда иметь чистые руки, спецодежду и инструмент.

Запрещается вносить в помещение спички, огонь, промасленную ветошь.

Перед присоединением к рампе баллон осматривают для оценки пригодности его к работе. Особое внимание обращают на чистоту поверхностей вентиля и баллона и сроки освидетельствования, а также наличие в баллоне остаточного давления.

При отсутствии остаточного давления наполнение баллонов кислородом запрещается.

Баллоны, признанные пригодными к наполнению, устанавливают и прикрепляют к рампе. После этого их резко продувают и присоединяют к дополнительному устройству.

Серьезные опасности возникают в связи с утечками газов при наполнении баллонов. При этом значительные утечки вызываются, как правило, неудачной конструкцией или неудовлетворительным состоянием узлов подсоединения баллонов к дополнительной рампе или неудовлетворительным состоянием вентиля баллонов. Такие утечки кислорода, с одной стороны, значительно повышают пожароопасность в дополнительной рампе и, а другой — создают реальные возможности возгораний рукавиц у наполнителя.

Неоднократно для уменьшения трудоемкости подсоединения баллонов вместо накидных гаек предлагались различные устройства. Наибольшей эксплуатационной надежностью и безопасностью характеризуется быстросъемный зажим, разработанный Балашихинским кислородным заводом.

В этом зажиме используются прокладки и манжеты из специальных кислородостойких материалов, обеспечивающих безопасность и надлежащее уплотнение в течение длительного времени.

Номера присоединенных баллонов записывают в специальный журнал.

Для исключения возможности взрыва в случае, если к рампе подсоединен баллон, в котором был горючий газ, необходимо перед наполнением кислородом полностью выпустить из баллона находившийся в нем газ.

При наполнении баллоны нагреваются, так как происходит сжатие находящегося в них газа. После наполнения баллон охлаждается до температуры окружающей среды, при этом соответственно снижается и давление в нем кислорода. Наполнение баллона производится до давления, которое должно быть при 20 °С равно 14,7 МПа (~150 кгс/см²). В связи с этим наполнение баллонов следует производить до определенных давлений в зависимости от температуры кислорода в баллоне в конце наполнения (табл. 14).

При наполнении баллона проверяют его нагрев. Если стенка баллона нагревается настолько, что к ней нельзя прикоснуться, то необходимо немедленно прекратить наполнение баллона и отсоединить баллон от рампы.

Таблица 14. Давление наполнения баллонов

Температура, К (°C)	Давление, МПа	Температура, К (°C)	Давление, МПа
313 (40)	16,2	278 (5)	13,6
308 (35)	15,8	273 (0)	13,2
303 (30)	15,4	268 (-5)	12,9
298 (25)	15,1	263 (-10)	12,6
293 (20)	14,7	258 (-15)	12,3
288 (15)	14,3	253 (-10)	11,9
283 (10)	14,0		

При наполнении баллонов возможны разрывы трубок, которыми баллоны подсоединяют к рампе. Причиной разрыва является наличие на трубках трещин и других дефектов. Поэтому трубки перед подсоединением следует внимательно осмотреть и при обнаружении дефектов заменить.

В случае обнаружения пропусков в узле подсоединения баллона к рампе необходимо отключить трубку от рампы и от баллона и только после этого подтянуть гайку.

Устранять утечки под давлением категорически запрещается.

Для подсоединения баллонов к наполнительным рампам желательно использовать полуавтоматические зажимы, разработанные Гипроокислородом.

При перемещении баллонов не следует допускать удары их друг о друга и падение. Надо учитывать, что центр тяжести баллона находится достаточно высоко, поэтому возможно падение баллонов при установке их на неровном месте.

Для исключения травматизма, связанного с падением баллонов, хранить их надо в закрытых ячейках, а при наполнении газом прикреплять к стойке.

Необходимо отметить, что травматизм, связанный с падением баллонов, доминирует в несчастных случаях при их наполнении и использовании.

Иногда происходят вспышки и загорания в вентилях кислородных баллонов и в запорных вентилях наполнительных рамп.

Загорания вентилях кислородных баллонов чаще всего происходили в момент их закрытия или при подтяжке сальниковой гайки под давлением для устранения появившейся утечки, а также при использовании вместо фибровых прокладок других материалов — кожи, плохо обезжиренного паронита, а в запорном клапане — эбонита и резины.

В ряде случаев загорание вентилях баллонов происходило вследствие наматывания пеньки между маховичком и сальниковой гайкой для устранения утечки.

Загорание рамповых вентилях также обычно происходило при их открытии или закрытии.

К возможным причинам загорания этих вентилях относят: неудовлетворительное их обезжиривание перед сборкой или загрязнение при сборке, использование в качестве сальниковой набивки горючих материалов — резины и пропарафиненного асбестового шнура.

Известны случаи загорания вентилях баллонов, обусловленные попаданием масла на маховик вентиля и его протеканием по штоку в область уплотнительной прокладки.

Загорание вентилях наблюдалось и при использовании фибры в качестве прокладочного материала. Причиной этого могло быть применение загрязненной маслом фибры. Кроме того, при нерегулярной замене фибровых прокладок они изнашиваются и на их поверхности появляются мелкие волокна и ворсинки, для зажигания которых необходимо небольшое количество тепла.

Следует иметь в виду, что загоранию прокладки в вентиле иногда предшествует характерный треск, появляющийся при проворачивании шпинделя вентиля.

При отсутствии в вентиле стальных деталей обычно сгорает только прокладка. Стальные детали (шпиндель, клапан), если они есть, при воспламенении прокладки также загораются. Поэтому правилами запрещается использовать в баллонах и рамповых вентилях детали из нержавеющей стали.

При загорании в кислородных вентилях надо возможно быстрее перекрыть доступ кислорода к загоревшемуся вентилю, снизить давление на рампе до атмосферного, после чего принять меры к тушению огня.

Не менее опасным является и использование грязных рукавиц при работе с кислородными баллонами: загрязнения, легко воспламеняясь в среде кислорода, вытекающего из неплотного вентиля баллона, приводят в возгоранию рукавиц и сильным ожогам.

Баллоны со сжатыми газами относятся к опасным грузам. Классификация их по степеням опасности, согласно ГОСТ 19433—81 «Грузы опасные», и особенности их транспортировки изложены в «Правилах перевозки автомобилейным транспортом инертных газов и кислорода сжатых и жидких».

Перевозить наполненные баллоны нужно на рессорном транспорте или автокарах в горизонтальном положении с обязательными прокладками между ними.

Перевозка баллонов в вертикальном положении допускается только в специальных приспособлениях, исключающих удары и падения.

При перевозке и при погрузо-разгрузочных работах должны быть исключены удары баллонов друг о друга, их падение и повреждения.

При перевозке на баллоны должны быть надеты предохранительные колпаки.

12.6. Организация безопасной эксплуатации сосудов

Разрешение на ввод в эксплуатацию сосуда, подлежащего регистрации в органах Росгортехнадзора, выдается инспектором после регистрации сосуда на основе технического освидетельствования и проверки организации обслуживания и надзора.

Разрешение на ввод в эксплуатацию сосуда, не подлежащего регистрации в органах Росгортехнадзора, выдается лицом, назначенным приказом по организации для осуществления производственного контроля за соблюдением требований промышленной безопасности при эксплуатации сосудов, работающих под давлением.

Надзор за исправным состоянием и безопасными условиями работы сосудов, работающих под давлением, в организациях и на предприятиях возлагается на назначенных приказом ответственных за исправное состояние и безопасное действие сосудов, работающих под давлением, и на ответственных за осуществление производственного контроля за соблюдением требований промышленной безопасности при эксплуатации сосудов, работающих под давлением.

Глава 13. Обеспечение безопасности при эксплуатации машинного оборудования

13.1. Общие положения

Машинное оборудование (нагнетатели, детандеры и жидкостные насосы) является неотъемлемой частью воздухоразделительных установок. В некоторых случаях при использовании продуктов разделения воздуха для повышения давления применяют компрессоры, а иногда и насосы, перекачивающие жидкие криогенные продукты (кислород, азот, аргон).

Общим для всего машинного оборудования является наличие в нем движущихся частей. Поэтому многие требования безопасности распространяются на все машины.

Весьма опасным фактором при эксплуатации машин может являться шум. По санитарным нормам допустимая величина уровня звукового давления широкополосного шума на постоянных рабочих местах и в рабочих зонах производственных помещений составляет в зависимости от частоты 74– 90 дБ.

Даже кратковременное воздействие шума большой интенсивности может резко влиять на слуховой орган человека. Так, для восстановления слуха после воздействия шума с звуковым давлением 120 дБ в течение 1 ч требуется около 5 ч.

Длительное пребывание людей при шуме интенсивностью более 100 дБ может травмировать органы слуха и приводить к возникновению тугоухости. Поэтому работы в помещениях, где интенсивность шума превышает 95 дБ, в первую очередь в помещениях, где расположены турбокомпрессоры и турбодетандеры, необходимо выполнять с применением средств защиты органов слуха. К ним относятся вставляемые в ушной канал «Беруши», представляющие собой вкладыши из ткани Петрянова, и противושумные вкладыши (антифоны), а также специальные наушники и каски.

Решающее условие безопасной и надежной эксплуатации машинного оборудования заключается в знании обслуживающим персоналом устройства оборудования, инструкций по его эксплуатации и безусловное выполнение требований этих инструкций.

При приемке смены обслуживающий персонал должен осмотреть машинное оборудование, прослушать работу машин, осмотреть контрольно-измерительные приборы и убедиться в их исправности. Если оборудо-

вание находится в резерве, необходимо уточнить его состояние и возможность его пуска по записям в вахтенном журнале. Следует обратить внимание на состояние полов, перекрытий, проемов и траншей, лестниц и площадок, которые должны быть чистыми и сухими. Съёмные перекрытия должны находиться на своих местах и быть надёжно закреплены.

Необходимо помнить, что грязь, смазка на полу, случайно оставленный инструмент могут привести к несчастному случаю.

Все движущиеся детали машины должны быть надёжно ограждены, а сами ограждения надёжно закреплены.

Все предохранительные устройства и предохранительные клапаны должны находиться в исправном состоянии и проверяться в соответствии с указаниями инструкции по эксплуатации.

Контрольно-измерительные приборы, установленные на машинном оборудовании, должны быть исправны, опломбированы и иметь клеймо с указанием даты проверки.

Работа на машинном оборудовании с неисправными контрольно-измерительными приборами запрещается, так как это может привести к тяжёлым авариям и несчастным случаям.

На шкале контрольно-измерительных приборов должна быть нанесена четкая отметка (красная черта или красная стрелка), определяющая предельно допустимое значение измеряемой величины. Работать при параметрах, превышающих значения, отмеченные на шкале прибора, запрещается.

Все органы управления машинным оборудованием (задвижки, вентили, клапаны и др.) должны приводиться в действие без значительных физических усилий.

Открывать или закрывать арматуру, накладывая на маховики и рукоятки удлинительные рога́тки, трубы или ломы, запрещается.

Перед пуском после ремонта или длительной остановки вал машины следует провернуть. Это необходимо для выявления возможных дефектов сборки машины и подачи смазки ко всем трущимся поверхностям. Проворачивание следует осуществлять специальным приспособлением или вручную в соответствии с указаниями завода – изготовителя машины. Применять для этих целей подручные средства или становиться на спицы маховиков весьма опасно.

Машинное оборудование должно быть немедленно остановлено в случаях:

а) если температура каких-либо частей машины непрерывно повышается и превышает допустимую;

б) если давление по ступеням машины или на ее выходе выше допустимого;

в) при появлении стуков и ударов в машине или двигателе и появлении повышенной вибрации;

г) при падении давления в системе смазки ниже допустимого;

д) при превышении предельной нагрузки электродвигателей и электрогенераторов;

е) при появлении неисправностей в контрольно-измерительных приборах и защитных устройствах;

ж) при отсутствии освещения;

з) при пожаре в помещении станции.

Особое внимание должно быть обращено на исправное состояние и работу системы охлаждения машин. Недостаточное охлаждение поршневых компрессоров может привести к повышению температуры в цилиндрах и, как следствие, к заклиниванию поршней, обрыву шатунных болтов, поломке коленчатого вала. Недостаточное охлаждение центробежных компрессоров может привести к опасному перегреву всей машины, появлению повышенной вибрации корпуса и подшипников.

При прекращении подачи охлаждающей воды машину следует немедленно остановить и закрыть арматуру на входе воды в машину. Подача воды и соответственно пуск машины могут быть осуществлены только после того, как машины охладятся. Невыполнение этого требования может привести к вскипанию первых порций воды и разрушению охладителей и некоторых других узлов.

Спецодежда персонала, обслуживающего машинное оборудование, должна быть аккуратно заправлена и не должна иметь деталей, которые могут попасть во вращающиеся части машин и послужить причиной несчастного случая.

13.2. Поршневые компрессоры для сжатия воздуха и инертных газов (азот, аргон, криптон, ксенон)

Основные опасности, возникающие при эксплуатации поршневых компрессоров, связаны с возможностью образования гетерогенных нагро-масляных взрывчатых систем в клапанных коробках компрессоров, межступенчатых трубопроводах, промежуточных и конечных охладителях, а также с высоким давлением сжимаемого газа.

Взрывы в поршневых компрессорах и в газопроводах происходили неоднократно и особенно часто при компримировании воздуха. Такие взрывы, как правило, приводят к разрушениям компрессоров, газосборников и участков трубопроводов. Иногда происходит только местный разогрев стенок трубопроводов до температуры вплоть до красного каления, и все завершается, в лучшем случае, только обгоранием слоя краски в районе возгорания.

Во многих случаях последствия таких возгораний и связанных с ними взрывов имели трагический характер и сопровождалась поражением персонала и разрушениями не только компрессора, но и помещения станции.

Полных данных о числе происшедших взрывов и загораний в компрессорах и воздухопроводах нет. Однако, например, в Англии за 10 лет на 1000 работающих компрессорных установок было зарегистрировано 25 загора-

ний и взрывов. При одном из наиболее сильных взрывов на воздушной компрессорной установке во Франции погибло 16 и ранено 30 человек.

Анализ условий возникновения взрывов и загораний в воздушных компрессорных установках показывает, что они всегда связаны с накоплением в газовом тракте или в трубопроводах нагаро-масляных отложений.

Минеральное масло — это смесь различных предельных и непредельных углеводородов. В газовом тракте компрессора масло подвергается сложным видоизменениям. Это окисление компонентов при температурах 150 °С и более и повышающемся парциальном давлении кислорода.

Процесс окисления в значительной мере активизируется благодаря тому, что масло находится в газовом тракте в виде тонких пленок и аэрозоля, обеспечивающих большую площадь контакта масла с воздухом.

Наряду с этим процессы окисления интенсифицируются в результате каталитического воздействия оксидов металлов и частиц атмосферной пыли, содержащихся в сжимаемом воздухе.

В процессе первичного окисления углеводородов их полного окисления не происходит и образуются различные неустойчивые соединения (перекиси и гидроперекиси углеводородов).

При повышенных температурах наряду с окислением может происходить разрушение молекул углеводородов и образование углеродистых соединений нагара.

Скорость образования нагара в решающей степени зависит от вида масла, давления и температуры сжатия воздуха. По некоторым данным, при температурах ниже 150–160 °С образование нагара практически исключается, а при более высоких температурах скорость образования нагара пропорциональна квадрату повышения температуры. Поэтому понижение в максимально возможной степени температур сжатия — одна из основных задач в борьбе с нагарообразованием.

Нагар пропитывается находящимися в газовом тракте маслом и продуктами неполного окисления масел и откладывается в виде нагаро-масляных отложений на клапанах, в клапанных коробках, межступенчатых коммуникациях и трубопроводах. Частицы нагара и масляный аэрозоль выносятся воздухом из компрессора на значительные расстояния. Иногда нагаро-масляные отложения обнаруживают в сотнях метров от компрессора.

Слои нагаро-масляных отложений представляют собой весьма пористую массу, имеющую малую теплопроводность. Процессы окисления происходят с выделением тепла. Поэтому окисление входящих в отложение компонентов сопровождается повышением температуры, что способствует интенсивности процесса окисления. Возрастание толщины слоя отложений ухудшает условия отвода тепла из внутренних слоев, что способствует дальнейшему разогреву.

Это в конечном счете и приводит к интенсивному окислению углеводородов, их самовоспламенению и распространению горения по всему

слою отложений. Воспламенение нагара может инициировать воспламенение паро-капельной фазы масла, находящейся в потоке воздуха, проходящего в зоне отложений.

Наряду с нагаро-масляными отложениями в коммуникациях компрессоров может находиться достаточно много масла, выносимого в виде аэрозоля из последних ступеней, работающих, как правило, при сравнительно низких температурах, и затем накапливающегося на стенках трубопровода в виде пленки, т. е. в трубопроводах обычно существует гетерогенная система горючая пленка – газообразный окислитель.

Процесс детонации таких систем исследовался рядом авторов. М.В. Гордеев с соавторами показал возможность перехода медленного горения пленки масла в детонационное горение с увеличением скорости распространения пламени до 1800–3000 м/с. При этом создаются условия для распространения горения, возникшего в одном месте, на все масло, находящееся в трубопроводе.

Установлено, что для возбуждения детонации в таких системах необходимы мощные инициаторы.

В работах З.Д. Басырова с соавторами и Б.А. Иванова с соавторами определены пределы давления и детонации систем пленки различных масел – газообразный кислород или азото-кислородные смеси. По данным этих исследований, предельная толщина слоя масел, по которому может распространяться детонация, составляет от 4 до 20 мкм в зависимости от сорта масел, давления и температуры.

Результаты этих работ с приемлемой погрешностью можно распространить и на гетерогенные системы воздух – пленки масел, принимая в качестве параметра парциальное давление кислорода (примерно 0,2 общего давления).

К сожалению, во всех известных работах пределы распространения горения и детонации по пленкам масел получены при исследованиях свежих масел, тогда как пленки в реальных машинах представляют собой масла, подвергнувшиеся достаточно длительному воздействию высоких температур при высоких парциальных давлениях кислорода и содержащие в своем составе активные продукты неполного окисления. Очевидно, что пределы горения пленок таких масел могут отличаться от показателей, полученных для свежих масел.

Таким образом, накопление нагаро-масляных отложений и замасливание коммуникаций компрессоров и воздухопроводов создают потенциальные возможности взрывов и загораний большой мощности.

Для предотвращения таких взрывов и загораний необходимо:

максимально возможно снижать температуру сжатия, что достигается путем рационального распределения степени сжатия по ступеням компрессора, не допускать работы с неисправными клапанами, повышать эффективность межступенчатого охлаждения;

применять смазочные масла, исключаящие нагарообразование;
предотвращать попадание в цилиндры масла из картера;
обеспечивать надлежащую очистку от пыли компримируемого воздуха;
подавать в цилиндры минимально необходимое количество масла;
систематически контролировать интенсивность нагарообразования в компрессорах и трубопроводах и своевременно проводить их очистку.

Правилами устройства и безопасной эксплуатации стационарных компрессорных установок, воздухопроводов и газопроводов (ПБ 03-581-03) регламентировано, что температура после каждой ступени сжатия в нагнетательных патрубках не должна превышать максимальных значений, указанных в инструкции завода-изготовителя, но не выше 170 °С для компрессоров общепромышленного назначения и 180 °С для компрессоров технологического назначения.

При подборе смазочных компрессорных масел показатели склонности к нагарообразованию являются одними из основных показателей.

Наименьшее нагарообразование наблюдалось при использовании масла П28, изготовленного из сураханской и карачурской нефтей. Именно это масло длительное время рекомендовалось применять для компрессоров воздухоразделительных установок, работающих в достаточно тяжелых температурных условиях.

Однако в настоящее время выпуск этого масла практически прекращен, и уже с конца 1960-х годов было рекомендовано использовать для таких компрессоров масло К28, изготавливавшееся Волгоградским НПЗ. Проводившиеся в последние годы работы по подбору и испытаниям новых компрессорных масел дали весьма обнадеживающие результаты, однако они так и не были завершены. Многолетний положительный опыт применения новых масел имеет Балашихинский кислородный завод.

Были также попытки применения в компрессорах импортных масел, используемых в прокатных станах (например, Энергол). Оказалось, что при применении таких масел наблюдается сильное нагарообразование.

Необходимо подчеркнуть, что опыт эксплуатации свидетельствует о значительном влиянии запыленности воздуха на скорость образования нагара. Известны неоднократные случаи, когда реконструкция воздушных фильтров или обеспечение их эффективной работы приводили к прекращению нагарообразования в компрессорах.

В тех случаях, когда не удастся исключить образование нагара, необходимо регулярно очищать от него газовый тракт компрессора и межступенчатые коммуникации, а иногда и внешние трубопроводы.

Осмотр клапанных коробок газовых компрессоров необходимо проводить в соответствии с правилами не реже одного раза в месяц.

Наряду с традиционными механическими способами удаления нагара в последние годы все шире начинают применяться способы химической очистки. При этом характерно, что если раньше применялось пропарива-

ние острым паром в комплексе с воздействием каустика, что иногда приводило к вспышкам, происходившим сразу же после очистки, то в настоящее время в газовый тракт компрессора и трубопроводы подают различные поверхностно-активные вещества, обеспечивающие весьма эффективное удаление нагаро-масляных отложений.

Нагарообразование необходимо предотвращать не только на воздушных компрессорах, но и на компрессорах, предназначенных для компримирования азота, аргона, криптона, ксенона и неона. Особенность таких машин состоит в том, что они работают при сравнительно невысоких содержаниях кислорода в компримируемом газе ($100-1000 \text{ млн}^{-1}$).

В таких машинах нагаро-масляные отложения содержат в основном пропитанные маслом углеродистые соединения, образующиеся при воздействии на масло высоких температур. При длительном пребывании в среде с малым содержанием кислорода нагаро-масляные отложения обескислороживаются и становятся пирофорными. В случаях резкого возрастания парциального давления кислорода начинается быстрый разогрев слоя, носящий иногда взрывной характер.

Наиболее сильный взрыв на азотных компрессорах произошел несколько лет назад на одном химическом предприятии, в результате которого был практически разрушен весь цех. Причиной взрыва была крайне неудовлетворительная эксплуатация компрессоров, что привело к накоплению в азотных компрессорах, азотопроводах и маслоотделителях большого количества нагара, который воспламенился при резком повышении содержания кислорода в компримируемом азоте.

Наряду со сказанным работа компрессора при температуре газа в конце сжатия выше 160°C приводит к значительному загрязнению компримируемого газа продуктами разложения смазочного масла.

Для смазки поршневой группы газовых компрессоров следует использовать только рекомендованные заводом-изготовителем масла, обладающие высокой термической стабильностью.

Совершенно недопустимо применять для смазки поршневой группы компрессоров масло, извлеченное из масловлагоотделителей. Масло, поступившее в цех, должно иметь сертификат завода-изготовителя. Кроме того, из каждой емкости масла должна быть отобрана проба для анализа. Использование масла допускается только после подтверждения, что оно соответствует требованиям ГОСТов или ТУ. Масло, используемое для смазки поршневой группы, должно храниться в специальной таре с соответствующими подписями.

Заливают масло в машины только с помощью масленок, предназначенных для соответствующего сорта масла.

Для каждого компрессора должны быть установлены нормативы расхода масла на каждую точку смазки. Эти нормативы устанавливаются исходя из указаний завода-изготовителя и корректируются по опыту работы.

Расход масла, подаваемого на каждую ступень компрессора, необходимо проверять не реже одного раза в месяц весовым методом и ежемесячно по числу капель в контрольных глазках.

Очистка клапанных коробок компрессоров от масляных отложений и нагара должна проводиться не реже одного раза в месяц. При обнаружении нагара необходимо выяснить причины его образования.

Очистку от масляных отложений газосборников, масловлагоотделителей, промежуточных и конечных охладителей, а также нагнетательных трубопроводов следует проводить через шесть месяцев работы.

Важной характеристикой состояния компрессора является распределение давлений по ступеням. Отклонение распределения давлений от указанного в инструкции свидетельствует о неисправности машины.

Опасность работы при ненормальном распределении давлений заключается в том, что в этом случае одна или несколько ступеней компрессора работают при повышенной степени сжатия, что приводит к значительному повышению температуры в цилиндрах.

Наиболее часто изменение распределения давлений вызвано неисправностью клапанов. При этом степень сжатия (т. е. отношение давления нагнетания к давлению всасывания) в ступени, где неисправен клапан, уменьшается, а в предыдущей ступени степень сжатия повышается.

Распределение давлений в случае неисправности клапанов изменяется весьма резко в отличие от постепенного изменения, свидетельствующего о появлении перепуска в поршневых кольцах. При замене клапанов следует быть очень внимательным, так как установка всасывающего клапана вместо нагнетательного может привести к аварии.

В компрессорах могут происходить гидравлические удары при попадании воды в цилиндры в результате появления неплотностей в охладителях и рубашках цилиндров. Признаком появления таких неплотностей в системе охлаждения является вспенивание воды в контрольных воронках. Пуск машины в таких условиях весьма опасен и может привести к разрушению компрессора.

Предохранительные клапаны — это одно из наиболее важных устройств, обеспечивающих безопасную работу компрессора. Регулируются предохранительные клапаны таким образом, чтобы они открывались при давлении, на 10–15% превышающем давление в конце сжатия ступени, где установлен клапан. Ежемесячно необходимо проверять исправность клапанов их подрыванием с помощью специального приспособления.

Тарировка предохранительных клапанов на стендах производится один раз в год.

К крайне серьезным авариям на компрессорах могут приводить обрывы шатунных болтов или разворачивание крепления штока с поршнем, а также поломки шатунов.

Причина этих аварий, как правило, заключается в усталостном разрушении, возникающем в результате резкого уменьшения прочности металла из-за появления усталостных трещин.

Снижению усталостной прочности шатунов и шатунных болтов способствует работа машин с недостаточно затянутыми шатунными болтами, при больших зазорах в подшипниках, при ослабленном креплении штока с поршнем. Во всех этих случаях работа машины сопровождается сильным стуком.

Эксплуатационный контроль состояния шатунных болтов проводят для своевременного обнаружения дефектов, которые могут привести к их обрыву. Такой контроль должен предусматривать проверку при каждом ремонте затяжки шатунных болтов и исправности устройств стопорения их гаек. Не реже одного раза в год необходимо проверять шатунные болты на наличие усталостных трещин.

Следует также уделять внимание регулировке зазоров в подшипниках и качеству прилегания к ним опорных поверхностей. В случае появления при работе машины сильного стука она должна быть немедленно остановлена.

13.3. Кислородные поршневые компрессоры

При эксплуатации кислородных поршневых компрессоров возникает ряд опасностей, обусловленных работой с газообразным кислородом, находящимся под давлением.

Так как большинство материалов горят в среде кислорода, особое значение при создании кислородных компрессоров придается правильному подбору конструкционных уплотнительных и других материалов. Замена материала любых деталей, работающих в среде кислорода, допустима только по согласованию с заводом – изготовителем машины.

Не менее важное значение имеет предотвращение возможности попадания каких-либо посторонних предметов или горючих материалов в полости, где находится кислород. Это достигается аккуратной сборкой машины при ее ремонте и обезжириванием всех деталей, соприкасающихся с кислородом. В эксплуатации сейчас находятся как кислородные компрессоры, смазка поршневой группы которых осуществляется дистиллированной водой (или специальными эмульсиями), так и компрессоры с несмазываемыми поршневыми уплотнениями.

Режим подачи смазочной жидкости в цилиндры определяет надежность работы поршневого кислородного компрессора. При недостатке смазки или полном прекращении ее подачи может произойти загорание поршневого уплотнения. Подача излишнего количества смазочной жидкости может привести к гидроудару в цилиндре и разрушению машины. Поэтому подача смазки в цилиндр компрессора должна производиться непосредственно перед его пуском, а ее расход должен регулироваться согласно инструкции.

Отложения в трубопроводах и во внутренних полостях цилиндров, образующиеся при смазке кислородных компрессоров мыльными эмульсиями, необходимо регулярно удалять механическим способом.

Для хранения дистиллированной воды и мыльной эмульсии следует использовать бачки из нержавеющей металлов, снабженные плотно закрывающимися крышками во избежание попадания в смазку посторонних предметов и грязи.

Манжеты смазываемых кислородных компрессоров должны изготавливаться только из материалов, рекомендуемых заводом-изготовителем. Хранить эти материалы и готовые манжеты необходимо в условиях, исключающих их загрязнение.

Серьезную опасность может представлять попадание масла из кривошипно-шатунного механизма в цилиндры. Это происходит при неудовлетворительной работе маслослизывающих колец сальников картера. В этом случае возможно также попадание воды или эмульсии в картер, что может привести к оплавлению подшипников.

При работе кислородных компрессоров необходимо постоянно контролировать положение колокола металлического газгольдера (или степень наполнения резиновых газгольдеров). Работа компрессора при опускании колокола ниже предельной отметки может привести к подсосыванию воды в цилиндры компрессора и гидравлическому удару.

Если произошло загорание компрессора, необходимо перекрыть поступление кислорода в машину, отсечь ее от нагнетательных коммуникаций и остановить электродвигатель.

13.4. Воздушные и азотные центробежные компрессоры

Длительная надежная и безопасная работа центробежных компрессоров возможна только при исправном состоянии системы автоматического регулирования, системы охлаждения и системы смазки. Работа этих систем должна регулярно проверяться в соответствии с указаниями завода-изготовителя. Эксплуатация компрессора с отключенными системами блокировки и защиты запрещается.

Центробежные компрессоры обычно оснащены системой автоматического поддержания постоянного расхода воздуха и системой противопожарной защиты. Последняя предназначена для предотвращения работы компрессора в неустойчивом режиме (*помпаже*). Такой режим работы компрессора возникает при следующих обстоятельствах. Как известно, с повышением давления нагнетания производительность центробежного компрессора уменьшается, причем устойчивая работа машины возможна только до определенного давления. Если давление продолжает повышаться, то возникает неустойчивый режим работы (*помпаж*), при котором поток воздуха периодически меняет направление и течет через машину от нагнетательного патрубка к всасываемому.

Помпаж сопровождается сильными толчками, изменением звука работы машины и колебаниями давления нагнетания. Длительная работа в таком режиме может привести к разрушению машины. Давление, при котором начинается помпаж, зависит от конструкции компрессора. Это давление тем ниже, чем ниже давление во всасывающем патрубке компрессора или чем меньше открыта заслонка на входе газа в компрессор. Автоматическая защита от помпажа не допускает работу компрессора при определенных давлениях воздуха на нагнетании путем сброса в атмосферу части воздуха из нагнетательного патрубка. Давление, при котором срабатывает эта защита, автоматически корректируется противопомпажным устройством таким образом, чтобы оно срабатывало при давлении, на 10–15% меньшем давления начала помпажа.

При работе центробежных компрессоров на коллектор обязательным является наличие обратного клапана на нагнетательном патрубке каждой машины. При отсутствии обратного клапана возможно самопроизвольное вращение ротора остановленного компрессора в обратном направлении вследствие пропуска воздуха в задвижке на нагнетании, что может привести к аварии. Исправность обратного клапана следует проверять не реже двух раз в год. Работа машины с неисправным обратным клапаном недопустима.

Серьезные опасности, связанные с возможностью засасывания, могут возникать при выполнении каких-либо работ в камере фильтров при работающем компрессоре. Поэтому работы в «чистой» полости камеры фильтров (со стороны всасывающего патрубка компрессора) должны, как правило, выполняться при остановленной машине. В случае необходимости проведения работ при работающем компрессоре они должны выполняться бригадой, состоящей не менее чем из двух человек. Во избежание засасывания в компрессор грязи, пыли и посторонних предметов двери всасывающей камеры при работе компрессора должны быть надежно закрыты.

13.5. Кислородные центробежные компрессоры

Конструктивно эти машины не отличаются от воздушных и азотных центробежных компрессоров. Поэтому к кислородным компрессорам полностью относится все сказанное по отношению к воздушным и азотным центробежным компрессорам.

Специфической опасностью кислородных центробежных компрессоров является возможность их загорания, что неоднократно происходило при эксплуатации компрессоров типа КТК 12,5/35. Для загорания компрессора необходим локальный нагрев его деталей до весьма высоких температур, которые зависят от давления и скорости движения кислорода.

Высокие скорости вращения роторов кислородных центробежных компрессоров (до 230 с^{-1}) обуславливают мгновенный нагрев деталей при их соприкосновении. Температура нагрева определяется длительностью сопри-

косновения деталей и может превышать температуру воспламенения. Случайное кратковременное трение деталей не всегда приводит к загоранию.

Известны случаи, когда при ревизиях кислородных турбокомпрессоров на деталях обнаруживали следы трения (цвета побежалости, канавки), но загорания не происходило. Это объясняется, по-видимому, тем, что смятие или разрушение трущихся поверхностей происходило до достижения температур, необходимых для воспламенения металла.

Турбокомпрессор сконструирован так, чтобы при его работе исключалось трение деталей в проточной части, а между подвижными и неподвижными деталями был гарантированный зазор. Наименьший зазор, составляющий 0,2–0,4 мм, предусматривается между лабиринтными кольцами и вращающимися гребнями лабиринтов. При работе машин эти зазоры могут уменьшаться из-за различных дефектов изготовления и монтажа. Причинами уменьшения зазоров могут быть некачественная чеканка гребней в пазах, биение роторов, коробление втулок и т. д.

Одной из причин загорания кислородных компрессоров, возможно, является вырыв лабиринтов вместе с проволокой, применяемой для их зачеканки. Попадая в зазор между ротором и лабиринтной втулкой, вырванные лабиринты и проволока могут заклиниваться, разогреваться до очень высоких температур и разогревать до температуры воспламенения тонкие гребни лабиринтных втулок и закладных деталей.

Некачественная динамическая отладка машин может привести к значительным вибрациям и соприкосновению движущихся деталей с неподвижными.

Опасным является попадание сварочного грата или каких-либо металлических предметов в проточную часть машины. Загрязнение потока кислорода, движущегося со скоростью 30–80 м/с, прокатной окалиной и сварочным графом может приводить к загоранию изогнутых участков кислородопроводов. Учитывая, что в проточной части кислородных турбокомпрессоров скорость потока значительно больше, чем в трубопроводах, необходимо внимательнее относиться к очистке кислорода от механических примесей перед сжатием, к удалению из коммуникаций компрессора сварочного грата и наплывов металла, исключению коррозии трубопроводов компрессора и т. п.

Некоторые специалисты считают, что основной причиной загораний кислородных компрессоров является попадание на детали, находящиеся в проточной части, масла или других органических материалов, которые являются как бы сенситизатором, вызывающим загорание металла. Безусловно, наличие на металлических деталях пленки масла является крайне опасным. Это подтверждается экспериментами, при которых воспламенение масла, нанесенного на поверхность стальных деталей, при давлениях кислорода 1–3 МПа (10–30 кг/см²) приводило к загоранию этих деталей. Наличие в проточной части компрессора деталей, загрязненных маслом, возможно при некачественном обезжиривании компрессора. Кроме того,

масло может попадать в проточную часть и накапливаться на деталях компрессора во время его эксплуатации в том случае, если оно содержится в азоте, используемом при пуске компрессора, или в сжимаемом кислороде.

Масло может содержаться в азоте и кислороде, поступающих в компрессор из регенераторов установок, в том случае, если очистка воздуха, перерабатываемого установками, осуществляется в масляных фильтрах. Поэтому решено отказаться от оснащения воздухоразделительных агрегатов воздушными масляными фильтрами.

Следует отметить исключительно важное значение строгого выполнения указаний завода-изготовителя при пуске компрессора. Пуск компрессора осуществляется на азоте. После того как компрессор разогреется, его постепенно переводят на кислород. При этом особенно большое значение имеет темп нарастания концентрации кислорода, который должен быть достаточно медленным, чтобы постепенно окислить органические вещества, случайно попавшие в проточную часть машины.

При работе кислородного компрессора надо следить за постоянной подачей азота на концевые уплотнения, температурой кислорода после концевых охладителей, давлением охлаждающей воды и вибрацией машины. Пуск, остановка и контроль за работой машины могут осуществляться автоматически или дистанционно. Перевод компрессора на ручное управление может быть допущен только в виде исключения по специальному разрешению.

В концевые лабиринты неработающего кислородного компрессора надо подавать азот (под давлением не ниже 0,11 МПа (1,1 кгс/см²) для предотвращения засасывания в компрессор загрязненного маслом воздуха из машинного зала.

Ремонт кислородного турбокомпрессора осуществляется только после надежного отсоединения машины от находящихся под давлением кислородо- и азотопроводов и постановки заглушек с хвостовиками. Последние можно не устанавливать только в том случае, если машина отсоединяется от трубопровода двумя последовательно расположенными задвижками, между которыми имеется продувочный вентиль.

При ремонте и сборке компрессора следует обеспечить необходимую чистоту всех трубопроводов, проточной части компрессора, а также исключить возможность попадания в последнюю каких-либо предметов.

Перед установкой в машину все детали должны быть обезжирены. Кроме того, следует производить обезжиривание машины и после ее сборки в соответствии с указаниями завода-изготовителя. Контроль за состоянием фильтра на входе газа в компрессор должен осуществляться при ревизиях машины, а также при увеличении сопротивления фильтра.

Глава 14. Обеспечение безопасности при ремонте оборудования

При ремонте оборудования воздухоразделительных установок могут проявляться различные опасности, приводящие к несчастным случаям. Опыт показывает, что в решающей степени безопасность ремонтных работ определяется их правильной организацией. В то же время, по литературным данным, более 50% несчастных случаев происходит при выполнении ремонтных работ, причем их возникновение объясняется либо незнанием правил безопасности проведения ремонтных работ, либо просто их игнорированием.

Плановые ремонтные работы на выводимом в ремонт оборудовании, внутренние осмотры аппаратов, а также аварийные ремонтные работы могут быть начаты только после выполнения всех требований, предусмотренных нарядом-допуском на выполнение работ. Выполнение мер безопасности, предусмотренных нарядом-допуском, должно быть обеспечено в течение всего периода проведения ремонтных работ.

Остановку оборудования и его подготовку к ремонту проводит сменный обслуживающий персонал под наблюдением руководителя смены (начальника смены или сменного мастера). Подготовленное к ремонту оборудование принимает руководитель ремонтных работ. При этом составляется акт, в котором указываются сведения обо всех мероприятиях, выполненных для обеспечения безопасных условий ремонтных работ.

С момента приемки оборудования в ремонт и до его сдачи в эксплуатацию полную ответственность за безопасное проведение ремонтных работ несет руководитель ремонта. Выполнение технологическим персоналом любых операций на оборудовании, выведенном в ремонт, допускается только по письменному указанию руководителя ремонта.

Осмотр и ремонт отдельных агрегатов на воздухоразделительной установке, находящейся в работе, сменным персоналом или другими лицами могут проводиться только на основе специального разрешения (допуска), выдаваемого в соответствии с порядком, установленным на предприятии.

Допуск можно не оформлять на выполнение следующих работ: периодические проверки и осмотр приборов и оборудования, проводимые по графику при наличии письменного разрешения руководителя технологического участка; осмотр и проверку приборов и оборудования, выполня-

смые по указанию руководителя технологического участка, если при этом не проводится разборка коммуникаций и не требуется доступ в опасные места.

Доступ персонала во внутриблочное пространство, колодцы, закрытые траншеи и другие места, где возможно повышенное или пониженное содержание кислорода, разрешается только после проверки там состава воздуха и оформления письменного разрешения с указанием мер, обеспечивающих безопасность. Работа в этих местах без каких-либо предосторожностей допускается только при концентрации кислорода в пределах 19–23%.

Перечень мест, где выполнение каких-либо работ допускается только после оформления разрешения, должен быть доведен до сведения сменного персонала и вывешен на видном месте.

Перед входом в такие места должна быть предупреждающая надпись: «Опасно! Входить только после проверки состава воздуха».

Ремонт оборудования может начинаться только после проведения подготовительных работ.

Перед проведением ремонтных работ на действующем оборудовании необходимо:

а) снизить давление во всех аппаратах и трубопроводах до атмосферного и слить из них жидкие криогенные продукты;

б) отсоединить подлежащее ремонту оборудование или участок трубопровода заглушками от всех трубопроводов, аппаратов и машин, находящихся под давлением или в работе, а также от аппаратов, где находятся жидкие криогенные продукты. Заглушки можно не устанавливать, если подлежащие ремонту аппараты или трубопроводы отключены от оборудования и трубопроводов, находящихся под давлением или заполненных жидкими криогенными продуктами, не менее чем двумя последовательно расположенными запорными клапанами (в том числе клапанами принудительного действия) и при наличии между ними открытой арматуры, соединенной с атмосферой;

в) снять напряжение с электрооборудования приводов арматуры и машин и на пусковых устройствах вывесить плакат: «Не включать, работают люди!»;

г) отогреть оборудование, подлежащее ремонту.

Ремонт или осмотр оборудования, в котором содержался или мог содержаться кислород (или азот), разрешается проводить только после его тщательной продувки до содержания кислорода в отходящем газе в пределах 19–23%. Продувка должна проводиться воздухом, не содержащим масло, анализ – через 5 мин после окончания продувки. Отборная трубка газоанализатора должна вводиться в дальнюю часть аппарата и прокачиванием освобождаться от воздуха, содержавшегося в ней до анализа.

Перед ремонтом внутри кожуха блока необходимо проверить состав воздуха в месте проведения работ. К ремонту разрешается приступать

в том случае, когда содержание кислорода в анализируемом воздухе будет составлять 19–23%. В первые сутки ремонтных работ определение содержания кислорода в воздухе проверяют 1–2 раза в час, далее через 8 ч.

При отключении оборудования между фланцами трубопроводов устанавливают стальные пластины (заглушки), препятствующие проникновению опасных газов и жидкостей в ремонтируемый аппарат через неплотности запорных устройств или в результате их случайного открытия. Все заглушки должны быть пронумерованы, иметь хвостовики и быть рассчитаны на требуемое давление. Номер и давление, на которое рассчитана заглушка, выбиваются на ее хвостовике. Установка и снятие заглушек производятся в присутствии ответственного лица, назначенного администрацией, и отмечаются в журнале за подписью лица, установившего или снявшего заглушку.

Особую опасность представляют: ремонты арматуры, расположенной на теплом и холодном концах регенераторов и реверсивных теплообменников, проводимые без слива из аппаратов жидких криогенных продуктов; ремонты арматуры, расположенной на теплом и холодном концах регенераторов, принудительных клапанов переключения регенераторов с вскрытием крышек клапанов, трехходовых заслонок и трубопроводов после азотных регенераторов; работы внутри опорных обечаек регенераторов и в клапанных коробках.

На весь период проведения таких работ аппаратчиком должно быть обеспечено безусловное выполнение всех требований безопасности, изложенных в наряде-допуске. В течение всего этого времени арматура на сбросе в атмосферу кислорода из блока разделения должна быть открыта.

Во время ремонта вся остальная арматура должна быть закрыта и поджата вручную. Электрическая схема управления приводом арматуры должна быть разобрана.

При выполнении работ внутри сосудов, трубопроводов и на арматуре, расположенной на теплом и холодном концах регенераторов, в период остановок блоков разделения воздуха без слива жидкости целесообразно организовывать непрерывный контроль за объемной долей кислорода в месте проведения работ. Для этого, например, могут использоваться стационарные газоанализаторы типа МН, размещаемые на переносной раме. Очень удобными являются карманные сигнализаторы содержания кислорода, выпускаемые многими отечественными и зарубежными фирмами.

После завершения подготовительных работ оформляется акт сдачи оборудования в ремонт.

Непосредственно перед началом работ руководитель должен провести инструктаж рабочих о безопасных методах ведения работ, обратив внимание на особенности ремонтируемого оборудования.

Весь ремонтный персонал, а также работники эксплуатации должны постоянно носить защитные каски.

Запрещается проведение ремонтных работ на аппаратах и коммуникациях, находящихся под давлением, заполненных газами или жидкостями, а также на машинах, роторы которых продолжают вращаться.

Разбалчивание соединений трубопроводов или аппаратов, работающих под давлением, следует выполнять постоянным отпуском противоположно расположенных болтов до полного спуска давления. Гайки со шпилек или болтов можно снимать только после того, как рабочий убедится, что давление в аппарате или коммуникации отсутствует.

Удаление минеральной ваты осуществляют в предназначенной для этого спецодежде, застегнутом наглухо комбинезоне, рукавицах, респираторе и защитных очках.

Складывать минеральную вату следует в специально отведенных местах, не допуская разбрасывания по цеху.

Вынимать минеральную вату для обеспечения доступа к жидкостным адсорберам и фильтрам детандерного воздуха нужно только после отогрева этих аппаратов и близлежащей изоляции до положительных температур.

Следует помнить, что попадание перлита в органы дыхания может привести к тяжелым несчастным случаям.

Адсорберы перед вскрытием для замены или проверки состояния адсорбента должны быть отогреты до 25–30 °С и непосредственно перед вскрытием продуты в течение 20–30 мин азотом или воздухом, не содержащими масла.

При извлечении цеолита из адсорберов БКО и силикагеля из адсорберов жидкого кислорода, а также и при других работах с этими адсорбентами необходимо исключать возможность попадания пыли адсорбентов в органы дыхания и зрения и поэтому выполнять такие работы следует только в респираторах и защитных очках.

При необходимости выполнения ремонтных работ внутри адсорберов БКО, из которых не полностью удален цеолит, следует иметь в виду, что цеолит адсорбирует значительные количества азота, который может выделяться и существенно понижать концентрацию кислорода в газе над адсорбентом. Поэтому указанные работы необходимо выполнять с соблюдением всех требований к работам, выполняемым в закрытых сосудах, и оформлением соответствующего наряда-допуска.

Все операции, связанные с разборкой и ремонтом узлов и аппаратов, работающих в среде кислорода, должны проводиться чистыми руками и в незамазанной спецодежде. При этом должен применяться обезжиренный инструмент.

Перед сборкой все детали, соприкасающиеся с кислородом, должны быть обезжирены и просушены.

Работы на высоте относятся к категории повышенной опасности и их выполняют только по наряду-допуску с соблюдением специальных тре-

бований. Работать на высоте разрешается только с лесов и подмостей, выполненных по специальным правилам. При невозможности устройства лесов рабочие должны быть снабжены предохранительными поясами и должны быть определены места безопасного закрепления этих поясов. Работающие на высоте должны быть снабжены ящиками или сумками для хранения и переноски инструмента и деталей. Приставные лестницы могут применяться только для выполнения кратковременных работ, не требующих значительных усилий. Лестницы должны быть высотой не более 5 м и иметь упоры на нижних концах.

Работы, проводимые внутри аппаратов и кожухов блоков разделения, представляют особую опасность и должны выполняться в соответствии с инструкцией по работе в закрытых сосудах и резервуарах.

Следует отметить, что работы внутри кожуха блока не относятся к работам, выполняемым в сосудах или резервуарах, если их проводят при отогретом блоке разделения и при этом открыто не менее 75% люков, соединяющих отсек с атмосферой. В этом случае работы должны проводиться по специальной местной инструкции, обеспечивающей безопасность работы.

Небезопасной является работа внутри блоков с одностенным кожухом в случае неполной выемки изоляции. Последняя может упасть на работающего. Для предотвращения этого применяют специальные щиты.

В соответствии с правилами безопасности ремонтные работы в отсеках, заполненных вспученным перлитом, а также в перлитохранилищах, как правило, должны проводиться только после полного удаления перлита. При этом допускается проводить ремонтные работы при выгрузке перлита ниже отметки выполнения работ на 500 мм только после создания безопасных временных рабочих мест и проходов к ним (огражденные настилы, площадки, леса).

Работы, выполняемые при неполной выгрузке перлита, могут представлять серьезную опасность.

Крайне опасно попадание перлита в органы дыхания. Поэтому при выполнении работ в таких условиях, независимо от числа открытых люков, каждый работающий должен иметь при себе шланговый противогаз, предохранительный пояс и сигнальные веревки, привязанные к поясам.

Свободные концы шлангового противогаза должны быть выведены и закреплены в зоне чистого воздуха. На все время проведения работ у люка, ближайшего к месту проведения работ, должен находиться наблюдающий, который должен держать в руках сигнальную веревку и наблюдать за работающим, а также следить за состоянием заборного шланга противогаза, не допуская его перегибов.

Следует иметь в виду, что, обладая большой поверхностью, перлит способен, особенно при низкой температуре, адсорбировать достаточно большое количество кислорода, который при нагреве выделяется из пер-

лита. Насыщение перлита кислородом может быть обусловлено утечками кислорода во внутриблочное пространство. Учитывая относительно высокую газоплотность перлита, освобождение слоя порошка от кислорода происходит сравнительно медленно и может значительно ускоряться при нарушении спокойного состояния порошка в результате падения на него каких-либо предметов.

Поэтому перед выполнением работ при неполном удалении перлита необходимо оборудование полностью отогреть. Отсеки, где выполняются работы, должны постоянно вентилироваться, например подачей непосредственно к месту работ сжатого воздуха. В местах выполнения работ необходимо организовать непрерывный контроль за содержанием кислорода в воздухе. Если содержание кислорода выходит за безопасные пределы, кратность вентиляции должна быть увеличена, а рабочие из отсека удалены до нормализации состава воздуха.

Все работы при частичной выгрузке перлита должны выполняться только при безусловном соблюдении мер безопасности, указанных в наряде-допуске.

При отыскании утечек внутри кожуха блока разделения, что можно делать без отогрева блока разделения в районе любых аппаратов, кроме адсорберов, детандерных фильтров и их коммуникаций, следует систематически проверять содержание кислорода и азота в воздухе по мере выемки изоляции. При содержании кислорода более 22 и менее 19% проведение работ запрещается.

Опрессовку аппаратов для определения утечек допускается проводить только воздухом.

При всех ремонтах блоков разделения с частичным или полным удалением из блока изоляции следует тщательно осмотреть состояние опор и крепежных деталей у аппаратов и коммуникаций, к которым имеется доступ. Результаты осмотра заносят в агрегатный журнал блока разделения воздуха. Особенно внимательно необходимо проверять целостность металлического покрытия фундаментных плит. При обнаружении трещин и разрушений их следует устранить.

После окончания ремонтных работ все леса, лестницы и другие предметы должны быть извлечены из внутриблочного пространства.

Руководитель работ должен осмотреть места проведения работ и убедиться в отсутствии в них горячих, тлеющих и обугливающих материалов. После этого люки блока закрывают и составляют акт осмотра внутриблочного пространства.

Иногда при работе блоков разделения необходимо для устранения мелких утечек произвести сварочные работы без отогрева всего блока разделения. Перед проведением таких работ следует снизить до атмосферного давление во всех аппаратах блока разделения, надежно отключить ремонтируемый аппарат от остальных аппаратов и коммуникаций, удалить из ремон-

тируемого аппарата жидкие криогенные продукты и отогреть его полностью или частично (адсорберы и детандерные фильтры должны быть отогреты полностью), продуть подлежащий ремонту аппарат азотом, удалить изоляцию в месте проведения огневых работ, постелить негорючие коврики, определить содержание кислорода и паров растворителя в воздухе.

Проведение работ может быть разрешено, если содержание кислорода составляет не более 22 и не менее 19%, а содержание растворителя не превышает санитарных норм. Указанные работы должны выполняться под личным наблюдением начальника цеха или его заместителя.

Ремонт блока разделения, как правило, должен проводиться перед обезжириванием. Однако возможны обстоятельства, когда появляется необходимость проведения каких-либо работ непосредственно после обезжиривания блока, например, если при пуске блока обнаружены утечки, которые необходимо устранить. В этом случае ремонт может быть проведен только после тщательной продувки блока разделения до полного исчезновения запаха растворителя в воздухе, выходящем из аппаратов, и при условии, что содержание растворителя в воздухе в месте проведения работ не превышает санитарных норм.

Если при подготовке к такому ремонту будет обнаружено, что в изоляцию попал растворитель, то ее следует заменить.

При проверке аппаратуры блока на герметичность следует принимать меры, исключающие возможность повышения давления в других аппаратах вследствие возможного перетока газа через неплотности внутри аппарата или в арматуре.

Ремонт любого оборудования, использовавшегося для хранения или транспортировки кислорода или азота (газгольдеры, газопроводы, емкости жидкого кислорода и т. п.), следует проводить только после тщательной продувки этого оборудования воздухом и постановки заглушек на трубопроводы, соединяющие ремонтируемое оборудование с оборудованием, находящимся в работе.

Непосредственно перед началом работ должно быть проверено содержание кислорода в газе внутри оборудования, подлежащего ремонту.

Работы могут проводиться только в случае, если содержание кислорода составляет не более 22 и не менее 19%. Следует также иметь в виду, что кислород может застаиваться в траншеях и каналах, поэтому огневые работы в таких местах надо проводить только после их тщательного проветривания и продувки траншей воздухом.

Все огневые работы должны выполняться с соблюдением требований инструкции о мерах пожарной безопасности при проведении огневых работ.

На оборудовании, находящемся в ремонте, на все время ремонта должны вывешиваться предупредительные плакаты. Снимать их можно только с разрешения начальника цеха или другого ответственного лица.

Нельзя включать оборудование, не сняв предупредительный плакат.

Глава 15. Организационные основы обеспечения безопасности

15.1. Общие положения

В последние годы полностью изменился комплект нормативных документов, регламентирующих требования, направленные на предупреждение аварий и случаев производственного травматизма на опасных производственных объектах, к которым относится оборудование, на котором получают и используют продукты разделения воздуха.

Наряду с основополагающим руководящим материалом – «Правилами безопасности при производстве и потреблении продуктов разделения воздуха» (ПБ 11-544–03) на рассматриваемое оборудование распространяются требования «Общих правил промышленной безопасности для организаций, осуществляющих деятельность в области промышленной безопасности опасных производственных объектов» (ПБ 03-517–02), и «Правил устройства и безопасной эксплуатации сосудов, работающих под давлением» (ПБ 03-576–03).

Кроме этого, должно быть обеспечено выполнение требований отраслевых правил безопасности для предприятий и производств, где располагаются производства продуктов разделения воздуха и где используются эти продукты, например таких, как «Общие правила взрывобезопасности для взрывоопасных химических, нефтехимических и нефтедобывающих производств» (ПБ 09-540–03) и «Общие правила безопасности для металлургических и коксохимических предприятий и производств» (ПБ 11-493–02).

Проектирование, строительство и реконструкция объектов производства и потребления продуктов разделения воздуха должны проводиться в соответствии с требованиями действующих руководящих материалов, в том числе строительных норм и правил, утвержденных Госстроем, государственных стандартов, норм технологического проектирования, утвержденных МВД, «Правил безопасности при производстве и потреблении продуктов разделения воздуха» (ПБ 11-544-03), «Правил проектирования производств продуктов разделения воздуха» (ОСТ 290.004), «Инструкции по проектированию трубопроводов газообразного кислорода», «Инструкции по проектированию трубопроводов жидких продуктов разделения воздуха», «Инструкции по проектированию межзаводских трубопроводов для продуктов разделения воздуха», утвержденных Минхимпромом, ведомственных норм технологического проектирования, согласованных с Госстроем.

Изготовление, монтаж, ремонт, эксплуатация и освидетельствование сосудов, работающих под давлением, и баллонов, используемых

при потреблении продуктов разделения воздуха, должны соответствовать требованиям «Правил устройства и безопасной эксплуатации сосудов, работающих под давлением», утвержденных Ростехнадзором, и могут выполняться только организациями, имеющими соответствующую лицензию.

Вносить изменения в проектную документацию или в технологические схемы, конструкцию, режим работы технологического оборудования разрешается только по согласованию с автором проекта или разработчиком оборудования. При этом вносимые изменения не должны снижать уровень безопасности при ведении технологических процессов и обслуживании оборудования.

Монтаж (ремонт) оборудования должен производиться по технологии его разработчика или по технологии, разработанной специализированной монтажной (ремонтной) организацией до начала выполнения соответствующих работ.

При применении горючих газов на объектах производства и потребления продуктов разделения воздуха должны соблюдаться требования соответствующих правил безопасности, утвержденных Ростехнадзором, предусматривающих использование данных газов.

Все действующие и вновь вводимые в эксплуатацию производства и объекты, производящие и потребляющие продукты разделения воздуха, должны иметь технологические регламенты производств или инструкции по эксплуатации всех видов оборудования и их взаимодействию, утвержденные в установленном порядке.

Технологические регламенты и технологические инструкции должны разрабатываться на основе эксплуатационной документации разработчика оборудования с учетом местных производственных условий и требований правил безопасности (ПБ 11-544—03).

На каждом производстве, производящем или использующем продукты разделения воздуха, должны быть разработаны и утверждены главным инженером предприятия следующие инструкции:

- по безопасности труда для рабочих каждой профессии;
- рабочие инструкции по ведению технологических процессов для каждого рабочего места;
- по техническому обслуживанию оборудования;
- по ремонту и чистке оборудования.

Инструкции по безопасности труда должны быть разработаны на основе технологических регламентов или технологических инструкций, правил безопасности (ПБ 11-544—03) с учетом требований производственной санитарии и соответствующих стандартов ССБТ.

Инструкции по безопасности труда и рабочие инструкции должны находиться на рабочих местах. Инструкции по безопасности труда должны пересматриваться не реже одного раза в пять лет.

При изменении технологического режима, технологических схем или конструкции оборудования действующие инструкции должны пересматриваться и утверждаться до начала введения изменения.

В случае возникновения аварийного положения или травмирования работающих из-за несовершенства инструкций последние должны быть пересмотрены в сроки, установленные комиссией, расследовавшей несчастный случай или аварию.

На предприятии, имеющем объекты, производящие и потребляющие продукты разделения воздуха, приказом по предприятию из числа инженерно-технических работников должно назначаться лицо, ответственное за безопасную эксплуатацию такого оборудования и его техническое состояние. Наряду с этим в цехах (отделениях), потребляющих продукты разделения воздуха, должны назначаться лица, ответственные за безопасную эксплуатацию и техническое состояние трубопроводов и оборудования цеха.

15.2. Обучение и аттестация персонала

Обучение и аттестация работников проводятся в соответствии с Положением о порядке подготовки и аттестации работников организаций, эксплуатирующих опасные производственные объекты, которые подконтрольны Госгортехнадзору России (РД 04-265-99).

Вновь принимаемые на работу рабочие, инженерно-технические работники и служащие должны проходить предварительное, а работающие периодическое медицинское освидетельствование в соответствии с порядком и сроками, установленными Министерством здравоохранения.

Все лица, поступающие на работу на объекты потребления продуктов разделения воздуха, а также учащиеся, студенты и другие лица, прибывшие на производственное обучение или практику, должны пройти вводный инструктаж в отделе охраны труда по программе, разработанной с учетом требований ГОСТ 12.0.004 и всех особенностей производства и утвержденной главным инженером предприятия.

О проведении инструктажа должна быть сделана запись в журнале регистрации вводного инструктажа (личной карточке инструктажа). В журнале (карточке) расписываются лица, прошедшие инструктаж, и лицо, проводившее его.

Руководящие и инженерно-технические работники перед допуском к самостоятельной работе, связанной с эксплуатацией, реконструкцией и ремонтом объектов, производящих и потребляющих продукты разделения воздуха, должны сдать экзамен на знание действующих правил в объеме выполняемой ими работы.

Периодическая проверка знаний действующих правил и инструкций руководящими и инженерно-техническими работниками должна осуществляться не реже одного раза в три года.

В случае неудовлетворительной сдачи повторный экзамен должен быть проведен не позднее чем через 1 месяц.

Порядок проведения экзаменов определяется «Типовым положением о порядке проверки знания правил, норм и инструкций по технике безопасности руководящими и инженерно-техническими работниками», утвержденным Ростехнадзором.

Руководящим и инженерно-техническим работникам, допустившим нарушения правил безопасности или инструкций по безопасности труда, может быть назначена внеплановая проверка знаний.

Рабочие, вновь принятые или переведенные из одного цеха в другой на работу, связанную с производством и применением продуктов разделения воздуха, а также учащиеся и студенты, прибывающие на производственное обучение, должны непосредственно на рабочем месте пройти первичный инструктаж по безопасным методам работы. Инструктаж проводит мастером или начальником участка.

Рабочие, не имеющие профессии или меняющие свою профессию, а также учащиеся и студенты после прохождения первичного инструктажа должны быть обучены в течение первых не менее 6–10 смен безопасным методам работы. Это обучение должно проводиться под руководством назначенных распоряжением по цеху опытных рабочих и инженерно-технических работников.

По истечении срока обучения рабочие, студенты и учащиеся должны пройти проверку знаний по безопасности труда в комиссии под председательством начальника цеха или его заместителя. Результаты проверки должны оформляться протоколом и заноситься в журнал регистрации инструктажа на рабочем месте (личную карточку инструктажа).

Указанные рабочие допускаются к самостоятельной работе только после обучения по профессии в соответствии с «Типовым положением о профессиональном обучении рабочих на производстве», утвержденным Государственным комитетом по труду и социальным вопросам и Государственным комитетом по народному образованию, прохождения стажировки на рабочем месте в соответствии с программой, сдачи экзамена и получения удостоверения.

Допуск рабочих к самостоятельной работе должен оформляться распоряжением по цеху.

Рабочие, вновь принятые или переведенные из одного цеха в другой на работу, связанную с производством и применением продуктов разделения воздуха, допускаются к самостоятельной работе по своей профессии после прохождения ими первичного инструктажа и проверки знаний по безопасности труда в порядке, предусмотренном для вновь принятых или переведенных работников.

Профессиональное обучение может проводиться только организациями, имеющими лицензию, выданную органами Ростехнадзора.

Рабочие должны не реже чем через шесть месяцев проходить повторный инструктаж по безопасности труда. Рабочие, совмещающие несколько профессий, проходят инструктаж по каждой профессии.

Внеплановый инструктаж рабочих по безопасности труда должен проводиться в случаях:

- а) ввода в действие новых или переработанных в установленном порядке инструкций;
- б) нарушения рабочими инструкций, которые могут привести или привели к травме, аварии;
- в) перевода на временную работу, требующую дополнительных знаний;
- г) перерывов в работе более чем 30 календарных дней.

Данные о проведении инструктажей (первичного, повторного и внепланового) должны заноситься в журнал регистрации инструктажа на рабочем месте (личную карточку инструктажа).

В журнале (карточке) расписываются рабочий, прошедший инструктаж, и лицо, проводившее его, с указанием наименования инструкции, по которой был проинструктирован рабочий.

Рабочие должны не реже одного раза в год проходить проверку знания инструкций по безопасности труда в комиссиях, назначаемых начальником цеха. Результаты проверки должны оформляться протоколом и заноситься в журнал регистрации инструктажа на рабочем месте (личную карточку инструктажа).

Если комиссия установит, что рабочий неудовлетворительно знает инструкции, он должен получить дополнительный инструктаж и не позднее чем через 20 дней пройти повторную проверку знаний. Если при повторной проверке знания проверяемого окажутся неудовлетворительными, он должен быть отстранен от работы по данной профессии.

Повышение квалификации рабочих должно осуществляться в соответствии с ранее указанными положениями о профессиональном обучении.

15.3. Самоконтроль

Воздухоразделительные установки представляют собой достаточно сложный комплекс взаимосвязанного технологического оборудования, включающего в себя воздушный компрессор, систему охлаждения, блок комплексной очистки воздуха, блок разделения воздуха, детандеры и т. д. Безопасность и надежность работы таких систем, несмотря на значительный уровень автоматизации, в решающей степени зависят от «человеческого фактора» и от надежности взаимодействия аппаратчиков и машинистов. Не менее важен «человеческий фактор» и при работе с продуктами разделения воздуха.

Аварии и неполадки, связанные с «человеческим фактором», могут быть в решающей степени предотвращены при надлежащем самоконтроле персонала, исключающем спонтанные действия при управлении оборудованием. Самоконтроль – это практически последний барьер, когда еще можно предотвратить ошибку. Самоконтроль необходим на всех этапах деятельности персонала: с момента получения задания или

принятия решения о выполнении каких-либо операций или работ, при подготовке к их выполнению, в процессе выполнения работ и после их окончания. Самоконтроль требуется и в тех случаях, когда работы выполняются по наряду-допуску в газоопасных средах.

Постоянный самоконтроль следует воспитывать при обучении и аттестации персонала, в процессе эксплуатации оборудования и при противоаварийных тренировках. При этом существенную помощь может оказать плакат (рис. 19), который был любезно представлен автору на одном из сложнейших энерготехнологических производств.

15.4. Спецдежда

Администрация предприятия обязана обеспечить рабочих и служащих спецдеждой, спецобувью и другими средствами индивидуальной защиты в соответствии с типовыми отраслевыми нормами бесплатной выдачи специальных средств индивидуальной защиты.

Их перечень применительно к определенным работам для каждой рабочей специальности должен быть утвержден руководством предприятия и вывешен на рабочих местах.

Запрещается допускать к работе лиц без соответствующих спецдежды, спецобуви и предусмотренных средств индивидуальной защиты.

Порядок обеспечения рабочих и служащих средствами индивидуальной защиты должен соответствовать Инструкции о порядке обеспечения рабочих и служащих специальной одеждой, специальной обувью и другими средствами индивидуальной защиты.

15.5. Ликвидация аварий и противоаварийные тренировки

На всех объектах производства, производящих и использующих продукты разделения воздуха, должны быть составлены планы ликвидации (локализации) аварий в соответствии с методическими указаниями, утвержденными Ростехнадзором.

Запрещается допускать к работе лиц, не ознакомленных с планом ликвидации аварий и не знающих его части, относящейся к месту их работы.

Противоаварийные тренировки должны предусматривать возможные аварийные ситуации, например полное отключение энергопитания основного технологического оборудования, внезапную остановку основного оборудования при срабатывании автоматической защиты, отключение отдельных аппаратов, появление значительных утечек жидкости или газа.

15.6. Локализация последствий аварий

На предприятиях, предусмотренных специальным перечнем, утвержденным Ростехнадзором, должны быть разработаны и утверждены в установленном порядке планы локализации аварийных ситуаций. В некото-



Рис. 19. Последовательность самоконтроля

рых случаях они необходимы для производств и объектов, потребляющих продукты разделения воздуха.

Такие планы разрабатываются на основе методических указаний о порядке разработки плана локализации и ликвидации аварийных ситуаций (ПЛИАС) на химико-технологических объектах (РД 09-536-03), утвержденных Ростехнадзором, с целью оценки вероятных сценариев возникновения и развития аварийных ситуаций, определения технических средств и действий персонала и специальных подразделений по ограничению последствий аварий.

При этом особое внимание уделяется выявлению возможных негативных последствий аварийных ситуаций на расположенные достаточно близко объекты и производства и возможности возникновения и предотвращения вторичных аварийных ситуаций.

При разработке плана локализации аварий для конкретного производства или объекта необходимо следующее.

1. Составить перечень возможных аварийных ситуаций. В такой перечень могут быть включены, например, такие аварии:

- взрыв кислородного баллона;
- разрушение воздушного ресивера;
- утечка кислорода;
- утечка азота.

2. Рассчитать взрывоопасные характеристики оборудования. Такой расчет проводится по методике, изложенной в «Общих правилах взрывобезопасности для химических, нефтехимических и нефтеперерабатывающих производств» (ПБ 09-540-03), с учетом особенностей рассматриваемого производства.

С этой целью определяются параметры, характеризующие потенциальную энергетическую опасность рассматриваемых ситуаций, и оценивается их возможная опасность для персонала и близлежащих строительных конструкций, а также категория взрывоопасности оборудования.

Например, необходимо определить следующие параметры. Общий энергетический потенциал технологического блока или объекта (А), под которым понимается совокупная энергия адиабатического расширения парогазовой смеси, полного сгорания паров или газов за счет внутренней и внешней энергии при внезапном аварийном раскрытии технологического блока (объекта).

Работа адиабатического расширения газа при разрушении сосуда, МДж, может быть рассчитана по следующим зависимостям:

$$A = 1/(k - 1)PV(1 - (P_0/P)^{k - 1/k}), \quad (22)$$

где k — показатель политропы; P — давление в сосуде, МПа; V — объем сосуда, м³; P_0 — атмосферное давление, МПа, или

$$A = bV, \quad (23)$$

где b – величина, определяемая из таблиц, приведенных в «Общих правилах взрывобезопасности».

При рассмотрении взрывов величину A рассчитывают исходя из количества взрывоопасной смеси, находящейся в объекте, и ее энергетических характеристик.

Затем определяют следующие параметры:

тротильный эквивалент разрушения (взрыва):

$$T_3 = A/Q_v, \quad (24)$$

где Q_v – теплота взрыва 1 кг тротила: $Q_v = 3,806$ МДж/кг;

давление в ударной волне на заданном расстоянии от места взрыва, МПа:

$$P_{уд} = 0,0956/R_n + 0,1427/R_n^2 + 0,5737/R_n^3, \quad (25)$$

$$R_n = R/(T_3)^{1/3}, \quad (26)$$

где R – расстояние от места взрыва, м.

Максимальное расстояние от места взрыва, на котором может происходить травмирование персонала, разрушение строительных конструкций и разрушение остекления, определяется из выражений (25) и (26) при следующих значениях $P_{уд}$, МПа:

Травмирование персонала	0,02
Разрушение строительных конструкций	0,01
Разрушение остекления	0,001

Приведенная масса взрывоопасного компонента, кг:

$$m = A/E_{сг}, \quad (27)$$

где $E_{сг}$ – единая удельная энергия сгорания: $E_{сг} = 4,6 \cdot 10^4$ кДж/кг.

Относительный энергетический потенциал взрывоопасности

$$Q_v = (1/16,534)A^{1/3}.$$

Сопоставляя полученные значения Q_v и m , можно по табл. 15 определить категорию производства по взрывоопасности.

Для каждой из рассмотренных аварийных ситуаций устанавливается уровень развития аварии, под которым понимается степень локализации возможных последствий.

Первый уровень (А) характеризуется возникновением и развитием аварийной ситуации в пределах одного технологического блока без влияния на смежные. Локализация аварийной ситуации на первом уровне возможна производственным персоналом без привлечения специальных подразделений.

Второй уровень (Б) характеризуется развитием аварийной ситуации с выходом за пределы технологического блока и ее возможным продолжением в пределах технологического объекта (установки, цеха, производства).

Таблица 15. Категории взрывоопасности

Категория взрывоопасности	Q_0	m , кг
I	> 37	> 5000
II	$27-37$	$2000-5000$
III	< 27	< 2000

Локализация аварии возможна только с привлечением специальных подразделений.

Третий уровень (В) характеризуется развитием аварии с возможным разрушением химико-технологических объектов, зданий и сооружений, построек на территории предприятия и за его пределами, поражением персонала и населения.

По результатам анализа возможных аварийных ситуаций составляются так называемые блок-карты, в которых приводятся все данные, необходимые для руководства действиями обслуживающего персонала, а при необходимости и спецподразделений, по локализации и ликвидации аварийных ситуаций и спасению людей.

Блок-карта должна содержать:

расчет уровней взрывоопасности технологических объектов цеха, производства;

схемы вероятных сценариев аварийных ситуаций;

инструкции по локализации и ликвидации аварийных ситуаций.

На рис. 20–22 в качестве примеров представлены вероятные сценарии следующих аварийных ситуаций: взрыва в конденсаторе-испарителе (рис. 20); взрыва в кислородном баллоне (рис. 21); разрушения воздушного ресивера (рис. 22).

В инструкции по локализации и ликвидации аварийных ситуаций для каждой из них указываются стадии развития, предпосылки и опознавательные признаки, оптимальные способы защиты, технические средства противопожарной защиты, исполнители и порядок их действий.

15.7. Совершенствование нормативной базы

Со второго полугодия 2003 года вступил в силу Федеральный закон «О техническом регулировании» (№ 184-ФЗ). В соответствии с этим законом в течение семи лет должны принципиально измениться нормативная база, регламентирующая требования к продукции, процессам ее производства, эксплуатации, хранения, перевозки и утилизации, порядок разработки нормативной базы и надзор за ее выполнением.

Под техническим регулированием понимается правовое регулирование отношений в области установления, применения и исполнения обязательных требований к продукции, процессам производства, хранения, утилизации и т. д.



Рис. 20. Сценарий взрыва в конденсаторе-испарителе

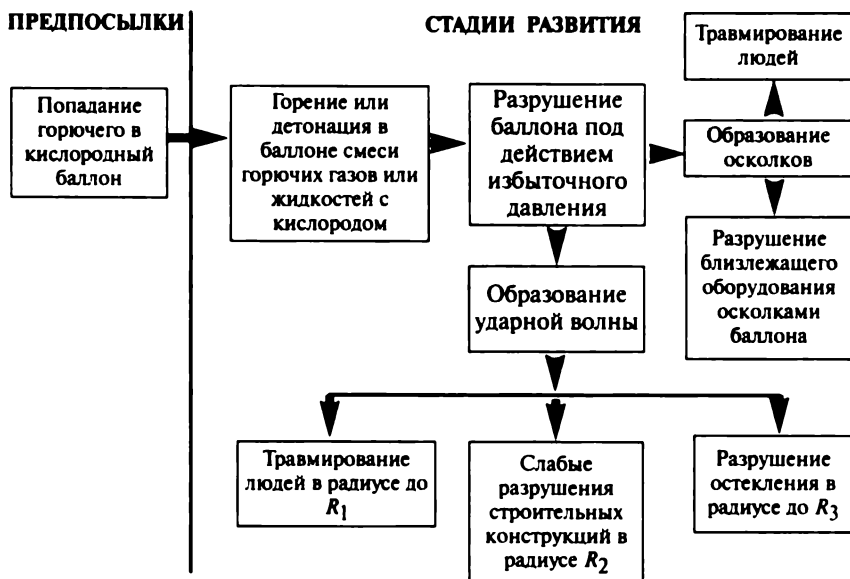


Рис. 21. Сценарий взрыва кислородного баллона

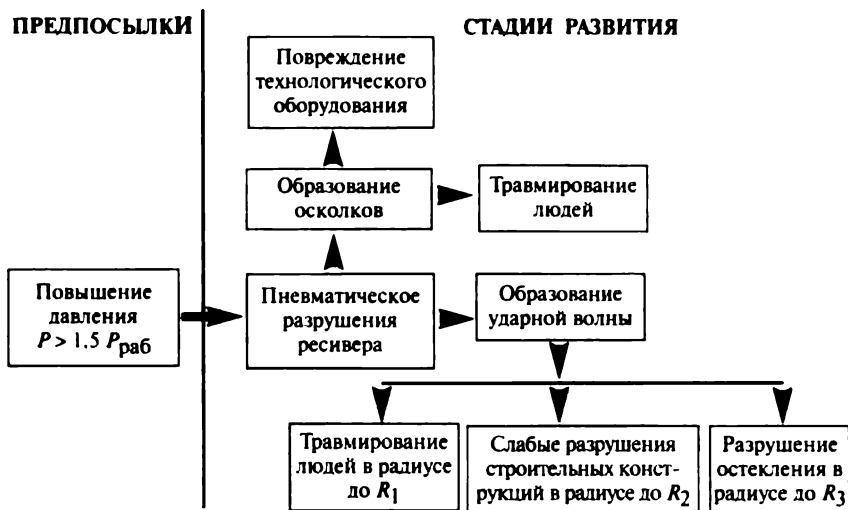


Рис. 22. Сценарий разрушения воздушного ресивера

В соответствии с указанным законом взамен действующих правил и различных стандартов все обязательные к применению требования, обеспечивающие защиту жизни и здоровья граждан, имущества и охрану окружающей среды, будут регламентироваться так называемыми техническими регламентами, которые принимаются в виде федерального закона.

Предусматривается разработка двух видов технических регламентов — общих и специальных.

Технические регламенты должны устанавливать минимально необходимые с учетом риска причинения вреда требования, обеспечивающие безопасность, в том числе взрывобезопасность, механическую безопасность, промышленную безопасность, пожарную безопасность, химическую безопасность и т. д. Они должны содержать требования к характеристикам продукции, процессам производства, эксплуатации и т. д., но не должны, как правило, содержать требований к конструкции и исполнению.

Общие технические регламенты разрабатываются по вопросам: безопасной эксплуатации и утилизации машин и оборудования; безопасной эксплуатации зданий и сооружений; пожарной безопасности и т. д.

Требования общего технического регламента обязательны для применения и соблюдения в отношении любых видов продукции, процессов производства, эксплуатации и т. д.

Требования специальных технических регламентов учитывают технологические и иные особенности отдельных видов продукции, процессов производства и т. д.

Надзор за соблюдением требований технических регламентов должен осуществляться государственными учреждениями, уполномоченными органами исполнительной власти.

Стандартизация осуществляется в соответствии с принципами добровольности применения стандартов в целях повышения уровня безопасности жизни или здоровья граждан, сохранности имущества, экологической безопасности и т. д.

Предусматривается разработка национальных стандартов, стандартов предприятий и сводов правил.

Под сводом правил понимается документ в области стандартизации, в котором содержатся технические правила и (или) описания процессов проектирования (включая изыскания), производства, строительства, монтажа, наладки, эксплуатации, хранения, перевозки, реализации и утилизации продукции, которые применяются на добровольной основе.

15.8. Срок службы оборудования

Продолжительность работы оборудования после ввода в эксплуатацию может серьезно влиять на безопасность его работы, что связано с возможностью появления отказов и возникновения аварий, вызываемых отработкой ресурса отдельными элементами оборудования. Поэтому срок службы оборудования регламентируется изготовителем и указывается в руководстве по эксплуатации.

Для воздухоразделительных установок назначенный срок службы обычно составляет 20 лет.

Негативные последствия при длительной работе оборудования могут возникать в результате: снижения прочности сосудов, аппаратов и различных деталей, вызванного влиянием длительных циклических нагрузок и работой в условиях значительных перепадов температур; изменения свойств изоляции и адсорбентов; снижения надежности работы арматуры, машинного оборудования, систем управления и средств защиты.

Вероятность подобных явлений возрастает по мере отработки оборудованием назначенного срока службы.

Система планово-предупредительного ремонта должна обеспечивать поддержание в течение назначенного срока службы необходимого уровня работоспособности изнашивающихся деталей и узлов в течение периода между капитальными ремонтами.

Оценка технического состояния оборудования для решения вопроса о возможности продолжения работы после истечения назначенного срока службы проводится методом экспертного технического диагностирования отдельных составляющих, которые определяют безопасность и на-

дежность работы оборудования, в соответствии с «Методическими указаниями по определению остаточного ресурса потенциально опасных объектов, поднадзорных Госгортехнадзору России» (РД 08-102-95).

При определении технического состояния воздухоразделительных установок в качестве критериев используются результаты технического диагностирования установки в целом как технического объекта и ее основных составляющих.

Методы и критерии определения технического состояния всех составляющих воздухоразделительных установок излагаются в соответствующих методиках, разрабатываемых изготовителем.

Остаточный ресурс воздухоразделительной установки в целом устанавливается по результатам технического диагностирования специализированной организацией параметров технического состояния и определения остаточного ресурса входящих в установку сосудов, аппаратов и трубопроводов, машинного оборудования, арматуры и предохранительных устройств, кожуха и опор под аппаратами и трубопроводами, системы и средств обеспечения безопасности, системы КИП и автоматики, тепловой изоляции.

Техническое диагностирование и определение остаточного ресурса работающих под давлением сосудов, аппаратов и трубопроводов, входящих в воздухоразделительные установки, проводятся в соответствии с «Методикой диагностирования технического состояния и определения остаточного ресурса сосудов, аппаратов и трубопроводов криогенной техники, отслуживших установленный срок эксплуатации» РД 2082-19-98 (МД-2СТКТ-98).

Техническое диагностирование и определение остаточного ресурса оборудования, входящего в воздухоразделительные установки (компрессоры, насосы, детандерные агрегаты), проводятся по методикам разработчика оборудования, согласованным с Ростехнадзором.

При положительных результатах технического диагностирования оборудование может быть допущено к дальнейшей эксплуатации.

Решение об остаточном ресурсе воздухоразделительной установки в целом и соответственно о возможности и условиях продолжения ее эксплуатации принимается на основе анализа совокупности полученной информации о техническом состоянии всех составляющих установки и выводов, содержащихся в акте анализа технической документации, в заключении по контролю функционирования, в экспертных заключениях по всем элементам установки, в заключениях по машинному оборудованию, техническому диагностированию и определению остаточного ресурса аппаратов, сосудов и трубопроводов.

При этом в качестве остаточного ресурса установки принимается минимальное значение остаточного ресурса входящих в установку машин, аппаратов, сосудов и других ее составляющих.

Глава 16. Оказание доврачебной помощи пострадавшим от несчастных случаев

16.1. Общие положения

Несчастные случаи, как правило, сопровождаются различными травмами. Помощь, оказанная немедленно, может спасти пострадавшего от тяжелых последствий.

Каждый работающий должен уметь наложить при переломах шину, остановить кровотечение, сделать искусственное дыхание и наружный массаж сердца. Особенно важно своевременное оказание первой помощи пострадавшему от поражения электрическим током.

Производственный персонал должен периодически проходить инструктаж, а также практическое обучение приемам освобождения от воздействия электрического тока и приемам искусственного дыхания.

Ответственность за организацию обучения несут руководство предприятия и начальник цеха.

В щитовом помещении или на производственном участке должны находиться: 1) набор необходимых приспособлений и средств для оказания первой помощи (аптечный шкафчик в цехах и сумки первой помощи у бригадиров в условиях работы вне территории станции); 2) плакаты о правилах оказания первой помощи, приемах искусственного дыхания и наружного массажа сердца. Плакаты должны быть вывешены на видных местах.

Для правильной организации работы по оказанию первой помощи необходимо выполнение следующих условий:

а) в каждой смене должны быть лица, специально обученные правилам оказания первой помощи. На этих же лиц целесообразно возложить также ответственность за систематическое пополнение запаса приспособлений и средств оказания первой помощи, а также наблюдение за их надлежащим состоянием;

б) должен быть организован строгий систематический контроль со стороны медицинского персонала за умением работающих правильно оказывать первую помощь и доставлять пострадавшего в медицинский пункт, а также за состоянием и своевременным пополнением аптечного шкафчика необходимыми приспособлениями и средствами для оказания первой помощи;

в) оказывать помощь пострадавшему неспециалист должен до прибытия врача (временная остановка кровотечения, перевязка раны, иммобили-

лизация перелома, искусственное дыхание, переноска и перевязка пострадавшего);

г) аптечка, находящаяся в цехе или на воздухоразделительной станции, должна содержать медикаменты по списку, согласованному с медсанчастью предприятия. Рекомендуется также иметь аппарат для проведения искусственного дыхания.

16.2. Первая помощь при криогенных обмороживаниях

При криогенном обмороживании необходимо с пострадавшего снять одежду, затрудняющую кровообращение в пораженной области.

Немедленно сделать теплую ванну пораженного места или его обмывание свободным потоком воды при температуре 40,5–45 °С. Не следует производить сухое отогревание или использовать воду температурой выше 46 °С, так как в этом случае возможно усиление поражения пострадавших тканей.

Пораженные места ни при каких условиях нельзя массировать, так как это может расширить зону поврежденных тканей.

Если поражена большая часть поверхности тела, чем вызвано общее понижение температуры тела, то пострадавшему необходимо сделать общую согревательную ванну. При этом необходимо иметь в виду, что пострадавший может впасть в шоковое состояние.

Непосредственно после обмороживания пораженные поверхности тела безболезненны, кажутся восковидными и имеют бледно-синий оттенок. После оттаивания они становятся болезненными и появляются пузыри.

Раны, образующиеся при их разрушении, весьма подвержены инфекции. Поэтому не следует проводить немедленное оттаивание, если поражение произошло в условиях, когда пострадавший не может быть срочно госпитализирован.

Оттаивание следует производить в течение 15–60 мин до тех пор, пока окраска пораженного места не станет розовой или красной. При оттаивании рекомендуется использовать анестезирующие средства для уменьшения болезненности.

По возможности оттаивание следует проводить под надзором врача.

Если оттаивание пораженных частей тела произошло до того, как могла быть оказана медицинская помощь, то отогревание проводить не следует. В этом случае необходимо закрыть пораженную поверхность стерильной сухой тканью, а поверх нее положить плотную защитную повязку.

После госпитализации пострадавшему необходимо сделать противостолбнячную прививку. Не разрешается курить, так как это ухудшает кровообращение в пораженных частях тела.

16.3. Первая помощь при поражениях электрическим током

При поражении человека электрическим током необходимо быстро освободить его от воздействия тока, так как от длительности действия тока зависит характер электрической травмы. При этом следует помнить:

1) прикосновение к токоведущим частям, находящимся под напряжением, вызывает в большинстве случаев непроизвольное судорожное сокращение мышц и, если пострадавший держит провод руками, пальцы так сильно сжимаются, что освободить провод из рук почти невозможно;

2) прикасаться к человеку, находящемуся под током, без надлежащих мер предосторожности опасно для жизни оказывающего помощь.

Поэтому прежде всего необходимо быстро отключить ту часть установки, которой касается пострадавший.

Если пострадавший находится на высоте, то отключение установки может вызвать его падение, поэтому должны быть приняты меры, обеспечивающие безопасность падения пострадавшего.

При отключении установки может одновременно отключаться также и электрическое освещение, в связи с чем следует обеспечить освещение от другого источника (аварийное освещение, аккумуляторные фонари и т. п.) с учетом взрыво- и пожароопасности помещения, не задерживая при этом отключения установки и оказания помощи пострадавшему.

Если отключение установки не может быть произведено достаточно быстро, то необходимо принять меры к отделению пострадавшего от токоведущих частей, к которым он прикасается.

Меры первой помощи зависят от состояния, в котором находится пострадавший после освобождения его от электрического тока.

Если пострадавший находится в сознании, но до этого был в обмороке или продолжительное время находился под током, его следует удобно уложить (подстелить под него что-нибудь и накрыть его сверху какой-либо одеждой) и до прибытия врача обеспечить полный покой, непрерывно наблюдая за дыханием и пульсом.

Ни в коем случае нельзя позволять пострадавшему двигаться, а тем более продолжать работу, так как отсутствие тяжелых симптомов после поражения не исключает возможности последующего ухудшения состояния здоровья пострадавшего.

Вопрос о дальнейшем лечении пострадавшего может быть решен только врачом.

Если пострадавший находится в бессознательном состоянии, но его дыхание и пульс устойчивые, то следует ровно и удобно уложить его, расстегнуть одежду, создать приток свежего воздуха и обеспечить полный покой (удалить лишних людей). При этом пострадавшему нужно давать нюхать нашатырный спирт, обрызгивать его водой (не изо рта), растирать и согревать тело. Одновременно следует срочно вызвать врача.

При отсутствии дыхания или пульса у пострадавшего в связи с резким ухудшением кровообращения расширяются зрачки, появляется синюшность кожи и слизистых оболочек. В этих случаях помощь должна быть направлена на восстановление жизненных функций путем применения искусственного дыхания и наружного массажа сердца.

Следует помнить, что попытки оживления эффективны лишь в тех случаях, когда с момента остановки сердца прошло не более 45 мин, поэтому первую помощь следует оказывать по возможности на месте происшествия.

Переносить пострадавшего в другое место следует только в тех случаях, когда ему или лицу, оказывающему помощь, продолжает угрожать опасность или когда оказание помощи на месте невозможно.

Искусственное дыхание проводится в тех случаях, когда пострадавший не дышит или дышит очень плохо (редко, судорожно, как бы всхлипыванием), а также когда дыхание пострадавшего постепенно ухудшается независимо от того, чем это вызвано (поражение электрическим током, отравление и т. д.).

Проводить искусственное дыхание следует немедленно после освобождения пострадавшего от действия электрического тока, извлечения его из воды или из помещения с отравляющими веществами и непрерывно до достижения положительного результата или до прибытия врача.

Наиболее эффективным является способ проведения искусственного дыхания «изо рта в рот» или «изо рта в нос».

16.4. Первая помощь при ранениях

Всякая рана может быть легко загрязнена микробами; во избежание заражения столбняком особое внимание следует уделять ранам, загрязненным землей.

Срочное обращение к врачу для введения противостолбнячной сыворотки предупреждает это заболевание. Чтобы не загрязнять рану во время перевязки, оказывающий первую помощь при ранениях должен чисто (с мылом) вымыть руки, а если это сделать почему-либо невозможно, следует смазать пальцы настойкой йода. Прикасаться к самой ране даже вымытыми руками не разрешается.

При оказании первой помощи необходимо строго соблюдать следующие правила:

а) нельзя промывать рану водой или даже каким-либо лекарственным веществом, засыпать порошками или смазывать мазями, так как это препятствует заживлению раны, в нее заносится грязь с поверхности кожи, что вызывает последующее нагноение;

б) нельзя удалять из раны песок, землю; при этом можно глубже втереть грязь и вызвать заражение раны. Очистить рану может только врач;

в) нельзя удалять из раны сгустки крови, так как это может вызвать сильное кровотечение.

Для оказания первой помощи при ранении следует вскрыть имеющийся в аптечном шкафу (сумке) индивидуальный пакет (правила пользования напечатаны на его обертке), наложить содержащийся в нем стерильный перевязочный материал на рану и завязать бинтом.

Индивидуальный пакет следует распечатывать так, чтобы не касаться руками той части повязки, которая должна быть наложена непосредственно на рану.

Если индивидуального пакета почему-либо не оказалось, то для перевязки следует использовать чистый носовой платок, чистую ткань и т. п.

Края раны необходимо обработать настойкой йода.

16.5. Первая помощь при кровотечениях

Наружное кровотечение может быть артериальным и венозным.

При артериальном кровотечении кровь алого цвета вытекает пульсирующей струей (толчками), при венозном кровь темного цвета вытекает непрерывно. Наиболее опасно артериальное кровотечение.

Для того чтобы остановить кровотечение, необходимо поднять раненую конечность, закрыть кровоточащую рану перевязочным материалом (из пакета), сложенным в несколько слоев, придавить сверху, не касаясь пальцами самой раны, и в таком положении, не отпуская пальца, держать в течение 45 мин.

Если кровотечение остановится, то, не снимая наложенного материала, необходимо поверх него наложить еще одну подушечку из другого пакета или же кусок ваты и забинтовать раненое место (с некоторым нажимом); при сильном кровотечении, если оно не останавливается повязкой, следует сдавливать кровеносные сосуды, питающие раненую область, сгибанием конечности в суставах, а также пальцами, жгутом или закруткой. Во всех случаях необходимо срочно вызвать врача.

16.6. Первая помощь при переломах, вывихах, ушибах и растяжении связок

При переломах и вывихах необходимо обеспечить наиболее удобное положение для поврежденной конечности. На место перелома конечностей (рук, ног) следует сразу же наложить шину из любого твердого материала (в крайнем случае шину можно заменить палкой, доской, линейкой).

Центр шины должен находиться на уровне места перелома, а концы ее должны обеспечивать неподвижность суставов. Поврежденная конечность должна быть неподвижна, что обязательно не только для устранения болевых ощущений, но и для предупреждения добавочных повреждений окружающих тканей и превращения закрытого перелома в открытый.

Наиболее спокойное положение поврежденной части тела необходимо обеспечить и во время доставки пострадавшего в лечебное учреждение.

16.7. Первая помощь при обмороке, тепловом и солнечном ударах

При обморочном состоянии (головокружение, тошнота, стеснение в груди, недостаток воздуха, потемнение в глазах) пострадавшего следует уложить, опустив голову и приподняв ноги (чтобы обеспечить приток крови к сосудам мозга), дать выпить холодной воды и понюхать нашатырный спирт. Класть на голову примочки и лед не следует.

При тепловом или солнечном ударе человек, работающий в жарком помещении (машинном зале), на солнцепеке или в душную безветренную погоду, должен быть немедленно отстранен от работы и выведен на свежий воздух или в тень.

Признаки теплового или солнечного удара: внезапная слабость и головная боль, пошатывание и т. п.

При появлении резких признаков недомогания (частый слабый пульс, бессознательное состояние, поверхностное, слабое, стонущее дыхание, судороги) необходимо перенести пострадавшего из жаркого помещения в прохладное место, уложить, раздеть, охладить тело, обмахивая лицо, смачивая голову и грудь холодной водой.

При прекращении дыхания или резком его расстройстве следует применить искусственное дыхание.

Библиографический список

1. **Иванов Б.А.** Безопасность применения материалов в контакте с кислородом / Б.А. Иванов. – М.: Химия, 1974. – 160 с.
2. **Иванов Б.А.** Безопасность работы с жидким кислородом / Б.А. Иванов, А.С. Розовский. – М.: Химия, 1989. – 190 с.
3. Взрывобезопасность воздухоразделительных установок / Под ред. В.П. Белякова и В.И. Файнштейна. – М.: Химия, 1986. – 224 с.
4. **Файнштейн В.И.** Еще раз о взрывобезопасности воздухоразделительных установок. / В.И. Файнштейн // Холодильное дело. 1998. № 4. С. 14–15.
5. **Файнштейн В.И.** Безопасность при производстве и применении продуктов разделения воздуха / В.И. Файнштейн. – М.: Металлургия, 1996. – 219 с.
6. Safe operation of reboilers/condensers in air separation units (Безопасная работа испарителей-конденсаторов в воздухоразделительных установках) / IGC EIGA Document 65/99/E – 30 pp. Новая редакция IGC EIGA Document 65/06/E.
7. **Hardeveld R.M.** Investigation of an Air Separation Unit Explosion // R.M. Hardeveld, M.J. Groeneveld, J.-Y. Lehman, D.C. Bull // Journal of Loss in Prevention Process Industries, 2001. V. 14. P. 167–180. www.eisevier.com
8. **Lehman J.-Y.** Investigation of the Fushun ASU Explosion in 1997 / J.-Y. Lehman, X.C. Wei, Q.X. Hua, G. Delannoy // Journal of Loss in Prevention Process Industries. 2003. V. 16. P. 209–221. www.eisevier.com
9. **Schmidt W.P.** Safe Desing and Operation of a Criogenic Air Separation Unit // W.P. Schmidt, K.S. Wenegardner, M. Dennehy, H. Castle-Smith // Process Safety Progress, Dec 2001; 20, 4; Career and Technical Education. P. 269.
10. Методика расчета концентраций в атмосферном воздухе вредных веществ, содержащихся в выбросах предприятий. ОМД-88. – Л.: Гидрометиздат. 1987. – 94 с.
11. Recommendations to control hazards related to hydro carbons in the operation of air separation units (Рекомендации по обеспечению взрывобезопасности, связанной с углеводородами при работе воздухоразделительных установок) // Air Liquide Standard DI, GR.231.05–0. – 29 p.
12. Safe Practices Guide for Cryogenic Air Separation Plants (Руководство по безопасности для криогенных воздухоразделительных установок) // IGC EIGA Document 704/05. – 70 p.
13. **Льюис Б.** Горение, пламя и взрывы в газах; пер. с англ.; под ред. К.И. Шелкина, А.А. Борисова / Б. Льюис, Г. Эльбе. – М.: Мир, 1968. – 592 с.

14. Мелихов А.С. Обеспечение пожарной безопасности при работе в помещениях с повышенным содержанием кислорода в воздухе / А.С. Мелихов // Химическое машиностроение. 1993. № 1. Специальное приложение «Криогенное оборудование». 1993. Январь. С. 23–25.
15. Пожарная опасность веществ и материалов, применяемых в химической промышленности. Справочник; под ред. И.В. Рябова. – М.: Химия, 1970. – 336 с. с ил.
16. Дыхно Н.М. / Н.М. Дыхно, Б.А.Иванов, Н.А. Щепотьев // Кислородное и автогенное машиностроение. 1966. № 3. 2425 с. с ил.
17. Стандарт предприятия ОАО «Криогенмаш» «Оборудование криогенное. Методы обезжиривания» (СТП 2082-594–2004).
18. Спринг С. Очистка поверхности металлов / С. Спринг. – М.: Мир, 1966. – 128 с.
19. Кислород. Справочник. В 2 т. / Под ред. Д.Л. Глизманенко. – М.: Металлургия, 1973. – 667 с. Т. 1; 463 с. Т. 2.
20. Разделение воздуха методом глубокого охлаждения. В 2 т. / Под ред. В.И. Епифановой, Л.С. Аксельрода. – М.: Машиностроение. 1974. 468 с.
21. Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности» (ОСПБРБ–99): 2.6.1. Ионизирующее излучение, радиационная безопасность СП 2.6.1. 799–99. – М.: Минздрав России, 2000. – 98 с. (Госсанэпиднормирование Рос. Фед. (Гос. сан. эпид. правила и нормативы).
22. Нормы радиационной безопасности НРБ 96.
23. Чечеткин Ю.В. Очистка радиоактивных газообразных отходов АЭС / Ю.В. Чечеткин, Е.К. Якшин, В.М. Ещеркин. – М.: Энергоатомиздат, 1986. С. 152.
24. Исидоров В.А. Органическая химия атмосферы; под ред. Б.В. Иоффе / В.А. Исидоров. – Л.: Химия, 1985. – 265 с.
25. Klein E. // Linde Ber. Aus Techn. u. Wissenschft. 1972. № 31. Bd. 55–63.
26. Веннинг У. Закись азота в воздухоразделительных установках / У. Веннинг // Технические газы. 2002. №1. С. 33–38.

Приложение. Руководящие материалы по безопасности ВРУ

Правила безопасности при производстве и потреблении продуктов разделения воздуха (ПБ 11-544-03). Утверждены постановлением Госгортехнадзора России от 24.04.03. № 24, зарегистрированным Минюстом России 15.05.03 рег. № 4543.

Правила проектирования производств продуктов разделения воздуха (ОСТ 290.002-02).

Инструкция по проектированию трубопроводов газообразного кислорода (ВСН 10-83/Минхимпром).

Инструкция по проектированию межзаводских трубопроводов газообразных кислорода, азота и аргона (ВСН 49-83/Минхимпром).

Инструкция по проектированию трубопроводов жидких продуктов разделения воздуха (ВСН 50-83/Минхимпром).

Правила перевозки автомобильным транспортом инертных газов и кислорода сжатых и жидких (Министерство промышленности РФ).

Специальные требования по обеспечению безопасности при перевозке автомобильным транспортом газовых смесей (Министерство экономики РФ).

Государственный стандарт. Система стандартов безопасности труда. Оборудование, работающее с газообразным кислородом. Общие требования безопасности (ГОСТ 12.2.052-81).

Стандарт предприятия «Оборудование криогенное. Методы обезжиривания» (СТП 2082-594-2004).

Правила устройства и безопасной эксплуатации сосудов, работающих под давлением (ПБ 03-576-03). Утверждены постановлением Госгортехнадзора России от 11.06.03 № 91, зарегистрированным Минюстом России 19.06.03, рег. № 4776.

Правила проектирования, изготовления и применения сосудов и аппаратов стальных сварных (ПБ 03-584-03). Утверждены постановлением Госгортехнадзора России от 10.06.03 № 81, зарегистрированным Минюстом России 18.06.03, рег. № 4706.

Правила устройства и безопасной эксплуатации технологических трубопроводов (ПБ 03-585-03). Утверждены постановлением Госгортехнадзора России от 10.06.03 № 80, зарегистрированным Минюстом России 19.06.03, рег. № 4738.

Методические указания о порядке разработки плана локализации и ликвидации аварийных ситуаций (ПЛАС) на химико-технологических объектах РД 09-536-03). Утверждены постановлением Госгортехнадзора России от 18.04.03 № 14, зарегистрированным Минюстом России 25.04.03, рег. № 4453.

Типовая инструкция по организации безопасного проведения огневых работ на взрывоопасных и взрывопожарных объектах (РД 09-364-00). Утверждена постановлением Госгортехнадзора России от 23.06.00 № 38.

Правила устройства и безопасной эксплуатации стационарных компрессорных установок, воздухопроводов и газопроводов (ПБ 03-581-03). Утверждены постановлением Госгортехнадзора России от 05.06.03 № 60, зарегистрированным Минюстом России 18.06.03, рег. № 4702.

Строительные нормы и правила 11-89-80. Генеральные планы промышленных предприятий.

Нормы пожарной безопасности ПБ 105-2003. Определение категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности.

Правила защиты от статического электричества в производствах химической, нефтехимической и нефтеперерабатывающей промышленности. Утверждены Минхимпромом СССР 31.01.72.

ГОСТ 12.1.005–88. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны.

ГОСТ 12.1.004–91 ССБТ. Пожарная безопасность. Общие требования.

ГОСТ 12.1.044–89 ССБТ. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов. Номенклатура показателей и методы их определения.

Типовая инструкция по организации безопасного проведения газоопасных работ. Утверждена Госгортехнадзором СССР 20.02.85 г.

Правила безопасности при перевозке опасных грузов железнодорожным транспортом (РД 15-73–94). Утверждены постановлением Госгортехнадзора России от 16.08.94 № 50.

Правила устройства и безопасной эксплуатации компрессорных установок с поршневыми компрессорами, работающими на взрывоопасных и вредных газах (ПБ 03-582–03). Утверждены постановлением Госгортехнадзора России от 03.06.03 № 61, зарегистрированным Минюстом России 19.06.03, рег. № 4711.

Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ–99): 2.6.1. Ионизирующее излучение, радиационная безопасность СП 2.6.1. 799–99 – М.: Минздрав России, 2000. – 98 с. (Гос. сан. эпид. нормирование Рос. Фед. (Гос. сан. эпид. правила и нормативы).

Нормы радиационной безопасности (НРБ 96).

Положение о порядке подготовки и аттестации работников организаций, эксплуатирующих опасные производственные объекты, подконтрольные Госгортехнадзору России (РД 04-265–99).

Об авторе

Файнштейн Владлен Иосифович, кандидат технических наук, начальник сектора – главный специалист ОАО «Криогенмаш», окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана, работал на Магнитогорском металлургическом комбинате и в ВНИИКИмаше. С 1964 г. специализируется в области обеспечения взрывобезопасности воздухоразделительных установок, глубокой очистки газов и в последние годы в области короткоцикловой безнагревной адсорбции. Автор 7 книг по вопросам обеспечения безопасности работы воздухоразделительных установок и около 80 печатных работ. Принимал участие в разработке всех действующих руководящих материалов по безопасности при производстве и применении продуктов разделения воздуха.