

УДК 621.593:546.217

А.В. Кортиков

ОАО «Криогенмаш», пр. Ленина, 67, г. Балашиха Московской области, РФ, 143907

e-mail: kortikov@cryogenmash.ru

ПРАКТИЧЕСКИЕ ВОПРОСЫ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ И ЭКСПЛУАТАЦИИ ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА И ПОТРЕБЛЕНИЯ ПРОДУКТОВ РАЗДЕЛЕНИЯ ВОЗДУХА. КИСЛОРОД

Кислород широко используется в различных отраслях промышленности, но его свойства эффективного окислителя в случае инцидентов с кислородным оборудованием могут приводить к тяжёлым последствиям. Рассмотрены вопросы безопасности при проектировании и эксплуатации кислородных систем. Проведён анализ конкретных инцидентов, допущенных из-за ошибок при проектировании и эксплуатации оборудования, ненадлежащего использования кислорода. Рассмотрены риски при нахождении в атмосфере с повышенным содержанием кислорода, а также авария из-за эксплуатации неисправного оборудования. Основные причины инцидентов — несоблюдение правил и требований безопасности, недостаток опыта и знаний, отсутствие надлежащего контроля на этапах разработки, монтажа, эксплуатации, технического обслуживания и ремонта кислородных систем.

Ключевые слова: Кислород. Безопасность. Проектирование. Эксплуатация. Инцидент. Система хранения. Клапан. Загорание. Трубопровод.

A. V. Kortikov

PRACTICAL SAFETY MATTERS AT THE DESIGNING AND OPERATING THE EQUIPMENT FOR PRODUCTION AND CONSUMPTION AIR SEPARATION PRODUCTS. OXYGEN.

Oxygen is widely used in various branches of industry, but its properties of the efficient oxidant can result in serious consequences in case of incidents with oxygen equipment. The safety matters are considered at designing and operating the oxygen systems. The specific accidents, occurred by reason of the errors, when designing and operating the equipment, improper use of oxygen, have been analyzed. The risks are considered of being in the atmosphere with the increased oxygen content as well as the accident due to the faulty equipment operation. The main reasons of accidents are inobservance of the rules and requirements of safety, lack of experience and knowledge, lack of the proper control at the stages of designing, mounting, operation, maintenance and repair of oxygen systems.

Keywords: Oxygen. Safety. Design. Operation. Accident. Storage system. Valve. Fire. Pipeline.

1. ВВЕДЕНИЕ

Развитие техники разделения воздуха в первой половине двадцатого века привело к широкому внедрению кислорода в технологические процессы металлургической и химической промышленности, в машиностроение, строительство, медицину. Сегодня кислород — наиболее востребованный продукт разделения воздуха, и его использование в качестве эффективного окислителя позволяет повышать температуру горения, экономить топливо, окислять вредные примеси, получать полуфабрикаты или целевые продукты. Однако те же свойства кислорода, которые востребованы в технологии, в случае инцидентов с кислородным оборудованием превращаются в отрицательные и зачастую приводят к тяжёлым и трагическим последствиям.

2. СВОЙСТВА КИСЛОРОДА И ОПАСНОСТИ, СВЯЗАННЫЕ С ЕГО ПРИМЕНЕНИЕМ

Кислород — необходимая для нашей жизни часть воздуха. Этот газ не имеет цвета, вкуса и запаха, и нашими обычными чувствами мы не можем определить его повышенное содержание в воздухе. Вдыхание воздуха, обогащённого кислородом, не представляет угрозы здоровью, более того, широко используется в медицинской практике при нарушении дыхательной функции. Кислород тяжелее воздуха и может скапливаться в траншеях, колодцах, подвалах. Это особенно следует учитывать при разливе жидкого кислорода, поскольку его пары в три раза тяжелее воздуха.

Не представляя прямой угрозы человеку при вдыхании, кислород опасен из-за того, что поддерживает

горение. При увеличении его концентрации и давления снижается температура воспламенения материалов и одновременно растут температура и скорость горения. Горючие вещества в кислороде горят быстрее и с более высокой температурой пламени, а вещества, которые в воздухе не горят, могут загореться в кислороде. Чрезвычайно опасно образование смесей кислорода или обогащённого кислородом воздуха с горючими газами или парами — такие смеси подвержены взрывному воспламенению. Инициировать воспламенение смесей может разряд статического электричества, теплота трения, удар.

3. ОШИБКИ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ КИСЛОРОДНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

При проектировании кислородных систем серьёзное внимание следует уделять правильному выбору материалов. В России действует ограничительный список на материалы, которые могут использоваться в контакте с кислородом при различных концентрациях, температурах и давлении [1]. В том же стандарте изложены требования к изготовлению, монтажу, подготовке к работе и ремонту кислородных систем. Руководство, выпущенное в США [2], включает правила проектирования, эксплуатации и технического обслуживания кислородных систем. Строгое следование подобным документам — необходимое условие безопасной работы оборудования. Нарушение правил проектирования чревато серьёзными инцидентами, которые происходят чаще всего в период ввода оборудования в эксплуатацию. Рассмотрим несколько примеров.

Пример 1. На самолетах военно-морского флота в Австралии и США произошли три загорания кислородного распределительного блока, последнее случилось в 2003 г. Во всех трёх инцидентах происходили такие повреждения корпусов самолетов, при которых их дальнейшая эксплуатация становилась невозможной (фото 1 и 2).



Фото 1. Пожар на авиабазе Джексонвилл (США) в 2003 г.

Кислородный блок, служащий элементом соединения кислородных баллонов под давлением 160 бар с

дыхательными масками экипажа, состоял из трёх алюминиевых деталей и включал входной и выпускной трубопроводы и шесть обратных клапанов с уплотнениями из силиконовой резины. Все три загорания произошли на земле во время технического обслуживания кислородной системы: первый — во время отключения баллона со сжатым кислородом, второй — при наполнении кислородного баллона, третий — во время регламентных работ. Расследование последнего случая, проведённого специалистами NASA, показало, что наиболее вероятной причиной загорания явился нагрев при течении кислорода высокого давления через неплотности в силиконовом уплотнении. Могло также произойти загорание посторонних частиц в этом же потоке. Это привело к загоранию материала в месте утечки, которое распространилось на корпус блока. По результатам расследования было рекомендовано заменить материал корпуса кислородного распределителя на монель — сплав на основе никеля и меди, который намного устойчивее к загоранию в среде кислорода по сравнению с алюминием. Следует отметить, что в соответствии с российским стандартом [1] в кислородных системах не допускается использование алюминия и его сплавов при давлении кислорода выше 64 бар.



Фото 2. Последствие загорания кислородного распределительного блока

Пример 2. Во время пуска насоса жидкого кислорода, входящего в состав системы хранения и предназначенного для выдачи кислорода под давлением, произошло его возгорание. Загорание насоса привело к повреждению элементов камеры низкого давления насоса, переднего фланца, трубопроводов линии всасывания и нагнетания (фото 3 и 4), что вызвало утечку жидкого кислорода из резервуара системы хранения.

Разлившаяся жидкость при испарении повысила концентрацию кислорода в атмосфере вблизи места инцидента, что усилило процесс горения. В результате пожара серьёзные ожоги получили два человека, один из них смог перекрыть клапан на линии, по которой кислород вытекал из резервуара, что исключило более серьёзные последствия инцидента.



Фото 3. Корпус насоса жидкого кислорода после инцидента



Фото 4. Камера предварительного сжатия аварийного насоса с клапанной головкой

По результатам анализа жидкого кислорода из системы хранения и газообразного аргона, которым насос продувался перед пуском, было исключено попадание в насос таких органических веществ, как простые углеводороды или жировые загрязнения. Характер повреждений элементов насоса и анализ материалов, из которых они были сделаны, позволил заключить, что источником загорания явился всасывающий клапан насоса, выполненный из титана. Титан и его сплавы могут легко поджигаться в кислороде от случайных источников, присутствующих в кислородном оборудовании, например, небольших твёрдых частиц, горящих в потоке кислорода. Кроме этого, титан может воспламениться в кислороде при образовании на его поверхности ювенильных участков, т.е. участков, свободных от окисной плёнки, образующихся при изломе, царапании, механическом ударе. При работе насоса титановый клапан, поджатый стальной пружиной, периодически ударялся о головку клапана, поэтому образование ювенильной поверхности в результате таких ударов или царапаний при смещении относительно пружины более чем вероятно. В результате воспламенения титановый клапан и

стальная пружина сгорели полностью, а выделяющейся энергии было достаточно для поджигания массивной головки клапана из нержавеющей стали. Таким образом, ошибка в выборе материала элемента насоса жидкого кислорода явилась причиной аварии и пожара.

Пример 3. В результате сбоя в электропитании воздуходелительной установки была задействована резервная схема обеспечения потребителя кислородом, с выдачей его из системы хранения через испаритель. Через 12 мин после включения насоса жидкого кислорода, входящего в состав системы хранения, трубопровод за испарителем лопнул и из-за возникшего пожара выгорел на длине 150 м. Причина инцидента, повлекшего большие экономические потери, — попадание жидкого кислорода в стальную трубу, охрупчивание металла и его разрыв из-за возникших температурных напряжений. В свою очередь это было вызвано неправильным расчетом испарителя и замедленной реакцией температурного датчика, по сигналу которого должна проводиться аварийная остановка насоса жидкого кислорода.

Пример 4. Во время заполнения жидким кислородом трубопровода, который соединял два кислородных резервуара, произошло воспламенение внутри вакуумного изоляционного пространства с разрывом внешней и воспламенением внутренней трубы. Причиной инцидента явилась утечка кислорода в вакуумную полость через стыковое соединение отдельных элементов трубопровода либо через трещину в клапане с ручным приводом и вакуумным кожухом. На фото 5 представлены последствия инцидента; они минимальны, чему способствовало быстрое перекрытие потока кислорода, который поступал в аварийный участок трубопровода.



Фото 5. Повреждения после загорания трубопровода жидкого кислорода с вакуумной изоляцией

По результатам расследования инцидента было рекомендовано при изготовлении вакуумной многослойной изоляции трубопроводов жидкого кислорода применять исключительно неорганические материалы — алюминиевую фольгу, промежуточные слои из стекловолнока, а в качестве адсорбента — цеолит. В конкретном рассматриваемом примере адсорбентом служил активированный уголь, многослойная изоляция была выполнена из органических материалов, которые послужили топливом при попадании кислорода в вакуумную полость.

4. НЕНАДЛЕЖАЩЕЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КИСЛОРОДА. НАХОЖДЕНИЕ В ЗОНЕ С ПОВЫШЕННЫМ СОДЕРЖАНИЕМ КИСЛОРОДА

Кислород — широко распространённый и доступный технический газ, он находит широкое применение при проведении строительных, монтажных и ремонтных работ. Из-за того, что баллоны с кислородом всегда находятся под рукой, иногда происходят инциденты, подобные следующему.

Пример 5. Во время испытания на прочность и герметичность трубопроводов гидравлической системы корабля, стоящего в доке, произошли множественные возгорания трубопроводов (фото 6 и 7), в результате чего пострадало шесть рабочих. Во время расследования инцидента было установлено, что для поднятия давления в трубопроводах использовалась рампа с кислородными баллонами. Предварительно никакого обезжиривания внутренней поверхности трубопроводов не проводилось, поскольку никто не предполагал подавать в них кислород.



Фото 6. Загорание трубопроводов корабельной гидросистемы



Фото 7. Повреждённые трубопроводы гидросистемы

Подобные случаи связаны с отсутствием знаний и опыта у непосредственных исполнителей, а также халатностью и несоблюдением элементарных правил техники безопасности у ответственных за производство работ.

Пример 6. Рядом с работающей воздуходелительной установкой необходимо было отремонтировать паропровод, находящийся в приемке. Из-за разлива жидкого кислорода в зоне проведения работ содержание кислорода было повышено. Во время рабо-

ты одежда на сварщике вспыхнула, от полученных ожогов он скончался.

На фото 8 показаны последствия взрывного загорания куртки, которая была наполнена пропитанной кислородом бумагой. Из этого видно, насколько опасным может быть насыщение одежды кислородом. Перед проведением работ в замкнутых или ограниченных объёмах обязательно должен быть проведён анализ атмосферы; концентрация кислорода не должна превышать 23 %. При попадании в зону с повышенным содержанием кислорода в ней после выхода из неё необходимо, как минимум в течение пятнадцати минут, проветривать одежду и волосы, не допуская при этом резких движений во избежание разрядов статического электричества и быть вдали от источников высокой температуры, например, горячей сигареты или открытого огня. Промасленная и загрязнённая спецодежда значительно увеличивает риски при нахождении в обогащённом кислородом воздухе.



Фото 8. Взрывное воспламенение насыщенной кислородом одежды

При использовании кислородно-ацетиленовых горелок недопустимо с помощью потока кислорода дуть пыль с одежды или охлаждать лицо.

5. ОШИБКИ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ КИСЛОРОДНЫХ СИСТЕМ И НЕИСПРАВНОСТИ ОБОРУДОВАНИЯ

Пример 7. На воздуходелительной установке, работающей по схеме с внутренним сжатием, после её выведения на режим с проектной чистотой продукционного кислорода проводилось переключение потока кислорода в линию потребителя. После открытия клапана произошел хлопок. В результате возгорания и разрушения клапана поток газообразного кислорода под давлением сжег участок трубопровода за клапаном (фото 9).

Во время инцидента люди не пострадали, и после перекрытия потока кислорода горение прекратилось. На основании внешнего осмотра места инцидента, степени выгорания элементов оборудования, анализа технологической схемы и журнала параметров воздуходелительной установки сделано заключение, что наиболее вероятным инициатором загорания клапана явилась ударная волна, возникшая при открытии клапана. Это волна подняла в поток кислорода и воспламенила твёрдые частицы, находящиеся в технологическом расширении трубопровода перед клапаном. Такие частицы — мелкая стружка, частицы сварочного графа, продукты износа оборудования и кислородного

тракта воздуходелительной установки всегда присутствуют в технологических трубопроводах и могут накапливаться в застойных зонах, тупиках или расширениях. Одна или несколько частиц могут сгореть без каких-либо последствий, но при большом числе их энергии достаточно для поджигания внутренних элементов арматуры. Для плавного увеличения давления в участке трубопровода за основным клапаном обычно предусматривают параллельную установку небольшого байпасного клапана, который исключает образование ударной волны. После снижения перепада давления в участках трубопровода открывают основной клапан.



Фото 9. Результаты загорания клапана в линии газообразного кислорода под давлением

Пример 8. После завершения ежегодных профилактических работ на кислородопроводе сталелитейного завода, во время которых в линии были установлены дополнительные обратные клапаны, проводилось заполнение трубопровода кислородом под давлением 35 бар. Во время открытия главного запорного клапана на линии чистого кислорода, подающего газ в плавильный цех, произошло его взрывное воспламенение, которое привело к гибели трёх человек и значительным разрушениям в помещении, где располагалась арматура (фото 10).



Фото 10. Разрушения в помещении после взрывного воспламенения клапана

При расследовании инцидента было установлено, что винт, крепящий штурвал редуктора дискового поворотного клапана к валу (фото 11), был сломан. Поэтому погибший начальник цеха использовал для открытия клапана разводной ключ. Небольшой байпасный клапан, служащий для выравнивания давления в секциях трубопровода, был закрыт, хотя однозначной информации о том, что клапаном не пользовались, получено не было.



Фото 11. Аналог аварийного клапана. Штурвал крепится к валу редуктора с помощью винта

Окончательная причина аварии так и не была установлена, однако в результате расследования было определено, что пожар возник по одной из следующих причин:

1. Повреждение подшипника скольжения вала клапана, в результате чего две стальные поверхности в зоне повреждения пришли в контакт. Когда клапан начали открывать, зона контакта нагрелась из-за трения, что привело к загоранию материала уплотнения, который воспламеняется легче, чем сталь.

2. Главный клапан могли открыть без выравнивания давления в следующей секции с помощью небольшого байпасного клапана. В этом случае частицы, летящие с большой скоростью в потоке кислорода, могли загореться от удара о часть клапана и поджечь его.

3. Инородный предмет застрял в клапане и образовал пару трения, которая разогрелась при открытии клапана и привела к его воспламенению.

Тот факт, что для открытия клапана был использован разводной ключ, говорит в пользу первой или третьей причин. Независимо от конкретной причины недопустимо открытие заевшего клапана в находящейся под давлением кислородной системе. Перед очередным включением в работу после профилактических и ремонтных работ трубопроводы должны быть продуты инертным газом, а кислородная арматура — проверена на работоспособность.

Пример 9. Воздуходелительная установка, снабжающая азотом крупный химический комплекс, была автоматически остановлена, и для подачи азота в цехи была задействована система хранения и газификации жидкого азота. Линия азота высокого давле-

ния после газификатора была соединена с линией выдачи азота из воздуходелительной установки через обратный клапан. Обратный клапан был неисправен, и азот после газификатора выдавил кубовую жидкость, обогащённую кислородом, из ректификационной колонны сначала в конденсатор, а затем в турбодетандер. Давление кубовой жидкости и её паров стало выше давления газа наддува лабиринтного уплотнения турбодетандера, и кубовая жидкость или её пары попали через систему уплотнения в масляную систему. В масляной ёмкости образовалась взрывоопасная смесь обогащённого кислородом воздуха и паров масла. При попадании холодного пара в ёмкость масло остыло. Оператор включил нагреватель, и через тридцать минут сборник масла взорвался, тяжело ранив двух рабочих, находящихся рядом со сборником. Причина инцидента — неисправный обратный клапан на линии выдачи азота из воздуходелительной установки. Инцидент можно было предотвратить при надлежащем наблюдении оператора воздуходелительной установки за параметрами ректификационной колонны (давление, уровень жидкости в кубе и конденсаторе).

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Безопасность эксплуатации кислородного оборудования начинается с проектирования. В процессе разработки оборудования должны быть заложены решения, в максимальной степени исключающие возможность воспламенения его элементов. К настоящему времени выполнен огромный объём исследований по свойствам различных материалов в широком диапазоне концентраций, температур и давлений кислорода. Требования безопасного проектирования систе-

матизированы и обобщены в отечественных и зарубежных стандартах. Правила эксплуатации кислородного оборудования также чётко изложены в правилах безопасности, технических руководствах и регламентах, инструкциях по эксплуатации конкретного оборудования.

Опасности, связанные с кислородом, хорошо известны. Тем не менее, ежегодно происходит множество инцидентов — от небольших возгораний до серьёзных аварий, в которых страдают люди. Иногда инциденты происходят из-за недостатка опыта и знаний у конкретных исполнителей, иногда из-за ненадлежащего контроля или невнимательности, но почти всегда — из-за несоблюдения правил и требований безопасности со стороны ответственных за это лиц. Путь, по которому надо идти для снижения и исключения инцидентов с кислородным оборудованием — это постоянное обучение, тренинги с проверкой знаний, предметный разбор конкретных происшествий как для разработчиков, так и для служб эксплуатации. Это неукоснительное соблюдение правил монтажа, эксплуатации, технического обслуживания и ремонта кислородного оборудования. Только комплексное объединение технических знаний и организационных мероприятий по безопасности может привести к желаемым результатам.

ЛИТЕРАТУРА

- ГОСТ 12.2.052-81. Оборудование, работающее с газообразным кислородом. Общие требования безопасности.
- ASTM Manual 36. Safe use of oxygen and oxygen system: Handbook for design, operation and maintenance/ 2nd edition, 2007.



НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

“ТЕХНИЧЕСКИЕ ГАЗЫ”



ПРИГЛАШАЕТ К СОТРУДНИЧЕСТВУ ПРОИЗВОДСТВЕННИКОВ, УЧЁНЫХ, АСПИРАНТОВ И ДОКТОРАНТОВ

При подготовке статей для журнала необходимо руководствоваться нижеперечисленными правилами.

МАТЕРИАЛ ГОТОВИТСЯ при помощи редактора MS Word и направляется на e-mail: uasigma@paco.net.

В СТАТЬЕ НЕОБХОДИМО УКАЗАТЬ УДК; инициалы и фамилии авторов; название организации, её почтовый адрес; название статьи; реферат (на русском и английском языках); список литературы. **СТАТЬЯ** должна быть разбита на несколько разделов: введение, основная часть (может состоять из нескольких разделов со своими заголовками), заключение. **ФОРМУЛЫ** необходимо набирать в редакторе формул. Каждая формула должна иметь номер.

РИСУНКИ следует располагать после упоминания о них в тексте. Они нумеруются и сопровождаются подрисовочными подписями. На рисунке допускаются цифровые и буквенные обозначения, а поясняющие надписи выносятся в подписи к нему. Схемы, графики, диаграммы должны быть выполнены в любой из указанных программ: CorelDraw, Visio, AutoCAD, графический редактор MS Word. Предоставляются они в векторном виде. **ФОТОГРАФИИ** необходимо прилагать к статье в виде отдельных JPG-файлов с разрешением не менее 300 dpi. **ТАБЛИЦЫ** должны иметь номера и названия.

ЛИТЕРАТУРА: На используемые библиографические источники ссылки делаются по мере их упоминания в статье. Если источник — книга, необходимо указать: фамилии и инициалы авторов, название книги, место и год издания, название издательства, общее количество страниц. Для журнала — фамилии и инициалы авторов, название журнала и статьи, год и номер выпуска, а также страницы, на которых напечатана статья. Для патентов и авторских свидетельств указывается номер, страна, МКП или МКИ (международный классификатор патентов или изобретений), полное название. В отдельном письме необходимо дать сведения обо всех авторах: фамилия, имя, отчество; учёная степень и звание; должность, полное название организации, института или предприятия, а также домашний и служебный адреса с почтовыми индексами и номера телефонов, факсов и e-mail.

ВЫПОЛНЕНИЕ ЭТИХ ТРЕБОВАНИЙ УСКОРИТ ИЗДАНИЕ СТАТЬИ.

Статьи принимаются к публикации на русском языке.

Авторам, публикующим статьи в журнале, предоставляется авторский экземпляр.

Редколлегия просит не направлять материалы, ранее опубликованные или публикуемые в других изданиях.

Редакция оставляет за собой право проводить правку статей.