

Б.А. Иванов

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Лефортовская наб., 1, факультет «Энергомашиностроение», г. Москва, РФ, 105005

А.С. Розовский, В.И. Файнштейн*

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

e-mail: fainshtein@cryogenmash.ru

СПОСОБЫ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ ВЗРЫВОВ КИСЛОРОДНЫХ БАЛЛОНОВ

Взрывы кислородных баллонов — наиболее частые аварии с тяжёлыми последствиями, которые сопровождаются гибелью людей, разрушением оборудования и сооружений. Проведённый анализ аварий кислородных баллонов показал, что основной причиной их разрушения является повышение давления в результате сгорания в них смесей горючих газов с кислородом. Предложенный ранее сплошной контроль наличия горючих газов в кислородных баллонах перед их наполнением не решил указанную проблему. Для предотвращения взрывов предлагается перед наполнением производить сбрасывание давления газа в кислородном баллоне до атмосферного. Взрывы кислородных баллонов можно полностью исключить, если их ещё и вакуумировать перед заправкой до 0,1-0,2 ата.

Ключевые слова: Кислород. Баллон. Температура. Давление. Взрыв. Безопасность.

B.A. Ivanov, A.S. Rozovsky, V.I. Fainshtein

METHODS TO PREVENT EXPLOSIONS OF OXYGEN CYLINDERS

Explosions of oxygen cylinders are the most frequent accidents with serious consequences that are accompanied by loss of lives, equipment and constructions destruction. The carried out analysis of accidents oxygen cylinders showed that the main reason of cylinders destruction is pressure increased of as a result of combustion in them mixtures of combustible gases with oxygen. The proposed before continuous control of presence of combustible gases in an oxygen cylinder before there are filling did not solve the specified problem. It is proposed to make the dropping pressure of gas in the oxygen cylinder to atmospheric pressure for prevention of explosions before filling. Explosions oxygen cylinders can be completely eliminated if they vacuumize before filling up 0,1-0,2 ata.

Keywords: Oxygen. Cylinder. Temperature. Pressure. Explosion. Safety.

1. ВВЕДЕНИЕ

Из практики эксплуатации кислородных баллонов известны случаи их взрывов, сопровождающиеся разрушением баллонов на мелкие осколки и нередко приводящие к травматизму и гибели людей, а также значительному материальному ущербу.

Несмотря на то, что причины, приводящие к взрыву кислородных баллонов, были выяснены достаточно давно [1], мероприятия по их устранению до настоящего времени продолжают оставаться малоэффективными. Подтверждением сказанного являются многочисленные взрывы, случившиеся за последнее время в странах СНГ. Например, только в Украине за период 1995-2010 гг. произошло около 50 аварий. Трагедия в Луганске, вызванная взрывом кислородного баллона 18.01.2010 г. в отделении реанимации горбольницы № 7, привела к гибели 16 чел., травми-

рованию 9 чел. и разрушению несущих конструкций со второго по пятый этажи пятиэтажного здания [2].

Практически на всех международных семинарах по теме «Повышение эффективности и безопасности производств продуктов разделения воздуха», ежегодно проводимых Украинской ассоциацией производителей технических газов «УА СИГМА», анализировались причины происшедших взрывов кислородных баллонов, рассматривались рекомендации по их предотвращению. Развивая эту тему, хотим затронуть ряд вопросов радикального предотвращения взрывов кислородных баллонов.

2. АНАЛИЗ ПРИЧИН ВЗРЫВОВ КИСЛОРОДНЫХ БАЛЛОНОВ

Как отмечалось в [1], возможны следующие причины взрывов кислородных баллонов:

1. Разрушение баллонов под действием давления газа вследствие недоброкачественного их изготовления, а также в результате их падения с большой высоты и последующих ударов о твёрдые предметы и т.п. Такие случаи крайне редки, а причины разрушения достаточно очевидны.

2. Разрушение баллонов из-за чрезмерного нагрева и повышения в них давления. Показано, что такие разрушения могут происходить при температурах выше 500 °С. Нагрев баллона до такой высокой температуры возможен только при пожаре, попадании баллона в печь и т.п.

3. Разрушение баллона из-за роста давления в связи со сгоранием предварительно внесённых в него различных органических веществ (минеральные масла, лаки, краски, растворители, горючие газы). Горение органических веществ в кислороде может происходить в режиме обычного (дефлаграционного) горения и в режиме детонации. Расчётным путём показано, что взрыв кислородного баллона возможен при сгорании внутри него 300-600 г консистентного органического вещества в режиме дефлаграционного горения, 80-160 г — в режиме детонации или при взрыве внутри баллона горючей газовой смеси, например, паров легко испаряющихся жидкостей. Очевидно, что такие количества органических веществ могут оказаться в баллоне не при случайном загрязнении, а при грубейших нарушениях правил его эксплуатации, прежде всего при использовании баллона не по назначению.

Попадание горючего газа в кислородный баллон может произойти в результате преднамеренного заполнения баллона горючим газом и, после его использования, передачи на наполнительную кислородную станцию с большим остаточным давлением.

Горючий газ может попасть в кислородный баллон и во время его обычной эксплуатации, но при нарушении правил проведения газопламенных работ. При сварке или резке металлов в условиях, когда давление в кислородном баллоне оказывается ниже, чем давление горючего газа за редуктором, горючий газ через горелку может перетекать в баллон с кислородом. В работе [1] экспериментально показано, что в этих условиях возможно перетекание горючего газа в кислородный баллон даже при полностью открытом мундштуке горелки. При этом в зависимости от вида горелки в 40-литровый баллон за 4 мин может перетечь до 70 л горючего газа, что повысит давление в баллоне на 1,75 кгс/см². Переток может продолжаться до выравнивания давлений в смесительной камере горелки и кислородном баллоне. Далее такой баллон попадает на наполнительную станцию и заполняется кислородом. Образовавшаяся в баллоне смесь горючего газа с кислородом является взрыво- и пожароопасной, если концентрация горючего газа в кислороде равна или выше нижнего концентрационного предела распространения пламени (НКПР) и ниже верхнего концентрационного предела (ВКПР).

НКПР в об. процентах для смесей различных горючих газов с кислородом различен: ацетилен — 2,5, пропан — 2,3, бутан — 1,8, метан — 5, пары спирта

этилового — 3,6. Верхний же концентрационный предел углеводородных смесей составляет обычно 30-40 % об. горючего газа.

При одном и том же начальном давлении смесей в баллоне могут наблюдаться различные давления при горении. Температура горения углеводородов в зависимости от состава смеси изменяется в пределах 1500-3000 К.

Если рассматривать горючие смеси, по составу близкие к НКПР, то можно принять температуру горения в 1500 К. В этом случае давление P_r при взрыве горючего газа в баллоне составит $5P_0$.

Кислородные баллоны делают с коэффициентом запаса прочности не ниже трёх, поэтому критическое давление разрушения баллонов $P_{кр} = 3P_{раб} = 450$ кгс/см².

Из изложенного следует, что для баллонов с $P_{раб} = 150$ кгс/см² разрушение при сгорании смеси на нижнем пределе возможно при начальных давлениях $P_0 \geq 90$ кгс/см², что соответствует наличию в нём горючего газа, например, пропана, с давлением не менее 2,1 кгс/см² (85 л пропана) при $P_0 = 90$ кгс/см² и 3,45 кгс/см² (138 л пропана) при $P_0 = 150$ кгс/см².

При сгорании горючей смеси в кислородном баллоне в режиме детонации давление в детонационной волне может достигать намного больших значений, чем при дефлаграционном горении. Например, при горении смеси метан-кислород давление во фронте детонационной волны возрастает в 27,4 раза по сравнению с начальным, а для смеси ацетилен-кислород — в 54,5 раза [3]. При отражении детонационной волны от стенок баллона давление может возрасти ещё в 2 раза. Значительно большие давления могут возникать при быстром нестационарном горении газовых смесей.

Таким образом, при детонации и быстром нестационарном горении газовых смесей разрушение кислородного баллона может происходить даже при очень низких начальных давлениях газовой смеси (4-10 кгс/см²). Отметим, что в этих случаях характер разрушений баллона должен быть иным, чем наблюдается на практике. При детонации и нестационарном горении в трубах разрушаются их закрытые торцы, расположенные на противоположном от места инициирования конце трубы. Следовательно, баллон должен разрушаться только в самой нижней части, т.е. в районе «юбки». На практике баллон разрушается на множество мелких осколков по всей его длине. Таким образом, имевшие место разрушения кислородных баллонов, носили характер общего, а не местного повышения давления газа в баллоне, т.е. происходили в результате обычного сгорания.

Анализ аварий, связанных со взрывами кислородных баллонов, показывает, что они возникают либо в момент открытия вентиля полного баллона, либо после зажигания сварщиком газовой горелки. В первом случае источником воспламенения газовой смеси в баллоне являются точечные очаги разогрева, возникающие при трении в узле уплотнения вентиля во время его открытия, во втором — проскок пламени в баллон от зажжённой газовой горелки по горючей

смеси, находящейся в кислородном шланге. Возможность проскока пламени через газовую горелку в кислородные шланги, где образовалась горючая смесь, подтверждается наличием «обратных ударов», связанных с хлопками в кислородном шланге за зажжённой горелкой и его разрывами.

Взрывы баллонов на наполнительной станции происходят крайне редко. Это, по-видимому, связано с тем, что в процессе наполнения практически отсутствуют источники, которые могли бы поджечь смесь горючего газа с кислородом. А ведь именно при наполнении баллона, первоначально содержащего горючий газ, смесь проходит весь интервал составов от верхнего до нижнего концентрационных пределов распространения пламени, в том числе и через стехиометрический состав, при котором энергия зажигания минимальна.

3. СПОСОБЫ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ ВЗРЫВОВ

Очевидно, что предпосылки для возникновения взрыва баллонов закладываются при эксплуатации баллонов у потребителей кислорода: нарушение правил, приводящее к натеканию горючего газа в кислородный баллон через автогенную горелку; использование кислородных баллонов как ёмкости для горючих газов и т.п. В этих условиях взрывы баллонов могут быть предотвращены, если исключить поступление загрязнённых в опасной степени баллонов на наполнение.

Рекомендованный более десяти лет назад сплошной контроль с помощью газоанализаторов присутствия горючих примесей в кислороде, оставшемся в баллонах перед наполнением, практически не обеспечил решение рассматриваемой проблемы. В реальных условиях при наполнении в смену сотен баллонов и при практически постоянном отсутствии горючих газов в пробах кислорода не исключён формальный подход к проведению анализов (они проводятся выборочно или не проводятся вообще). Кроме того, наполнители могут «экономить» кислород, не сбрасывая давление полностью, а лишь убеждаясь в наличии остаточного давления газа в баллоне. Поэтому загрязнённые баллоны выявляются крайне редко, а взрывы продолжают.

Наиболее действенным способом исключения взрывов кислородных баллонов является предлагаемый нами ранее в [4,5] сброс остаточного давления из всех баллонов перед наполнением до атмосферного. Даже если баллон содержал перед заправкой только один горючий газ, то после заполнения таких баллонов кислородом до давления 150 кгс/см² содержание в них горючего газа составит менее 0,7 % об., т.е. смесь будет невзрывоопасной, что позволит исключить взрывы кислородных баллонов у потребителей.

Концентрация во время заправки будет меняться от ВКПР (при 1-3 кгс/см²) до НКПР (при 40-55

кгс/см²). Поскольку при наполнении баллона, содержащего горючий газ при атмосферном давлении, концентрация горючей смеси в баллоне достигнет НКПР при давлении не выше 55 кгс/см², то, даже в случае воспламенения такой смеси, давление при горении ($P_r=5P_0=275$ кгс/см²) будет ниже давления разрушения баллона (~450 кгс/см²). Таким образом опасность взрыва баллона при наполнении будет возникать лишь в случае детонации или быстрого нестационарного горения газовой смеси, что, как отмечалось ранее, маловероятно.

Учитывая, что взрывы баллонов при наполнении происходили крайне редко, а при сбросе остаточного давления до атмосферного перед наполнением их вероятность ещё и уменьшится, считаем, что предлагаемый способ предотвращения взрывов кислородных баллонов является весьма эффективным и должен быть немедленно внедрён на наполнительных станциях. Отметим, что его внедрение не требует никаких дополнительных материальных затрат.

Если после сброса остаточного давления из баллонов осуществлять ещё и их вакуумирование перед заправкой до давления 0,1-0,2 ата, то опасность взрыва кислородных баллонов будет полностью исключена как во время их наполнения, так и при эксплуатации. Однако введение указанной процедуры приведёт к необходимости использования специального дополнительного оборудования и, как следствие, к удорожанию кислорода. Она может быть рассмотрена в случае недостаточной эффективности мероприятия по сбросу остаточного давления до атмосферного.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для предотвращения взрывов кислородных баллонов у потребителя необходимо немедленно и повсеместно внедрять процедуру предварительного сброса остаточного давления в баллонах до атмосферного перед их наполнением.

ЛИТЕРАТУРА

1. Иванов Б.А., Наркунский С.Е., Чукардин Л.Г. Причины взрывов кислородных баллонов// Безопасность труда в промышленности. — 1971. — № 9. — С. 24-26.
2. Чижиченко В.П. Анализ причин взрывов кислородных баллонов: комментарий к Луганской трагедии// Технические газы. — 2010. — № 5. — С. 65-68.
3. Физика взрыва/ Под редакцией К.П. Станюковича. — М.: Наука, 1975. — 704 с.
4. Розовский А.С. Обеспечение взрывобезопасности при эксплуатации кислородных баллонов// Безопасность труда в промышленности. — 1991. — № 11. — С. 27-29.
5. Файнштейн В.И. Кислород, азот, аргон — безопасность при производстве и применении. — М.: Интермет Инжиниринг, 2008. — 192 с.