

УДК 661.93

В.И. Файнштейн

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

e-mail: fainshtein@criogenmach.ru

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ВЗРЫВОБЕЗОПАСНОСТИ ВОЗДУХОРАЗДЕЛИТЕЛЬНЫХ УСТАНОВОК: РЕТРОСПЕКТИВНЫЙ АНАЛИЗ ПРОБЛЕМЫ И СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ

Продукты разделения воздуха (кислород, азот, аргон и др.) получают в основном с использованием процессов и оборудования криогенной техники. Производство и применение криопродуктов ещё на начальном этапе характеризовалось высокой потенциальной опасностью, обусловленной проявлением многочисленных специфических факторов. Поэтому одновременно с развитием техники низкотемпературного разделения воздуха и расширением сфер применения получаемых продуктов совершенствовались научные основы и технологические приёмы обеспечения безопасности. Это позволило специалистам к настоящему времени накопить опыт и обширные знания, разработать эффективные технологические и конструкторские решения для создания оборудования с высокой степенью взрывозащищённости. В исторической последовательности рассмотрены основные этапы решения проблемы, изложены методы и средства обеспечения взрывобезопасности современных воздухоразделительных установок.

Ключевые слова: Воздух. Кислород. Азот. Воздухоразделительная установка. Взрывобезопасность. Взрыв. Ацетилен. Углеводороды. Адсорбер. Цеолит. Жидкий кислород. Конденсатор-испаритель.

V.I. Fainshtein

MAINTENANCE OF EXPLOSION SAFETY OF AIR SEPARATION PLANTS: RETROSPECTIVE ANALYSIS OF THE PROBLEM AND MODERN STATE

Air separation products (oxygen, nitrogen, argon and others) basically results with use of processes and equipment of cryogenic technical equipment. Manufacture and application of cryoproducts at the initial stage has found out their high potential danger caused by demonstration of specific factors. Therefore simultaneously with development of technical equipment for low-temperature air separation and expansion the spheres of application of received products were improved scientific bases and technological receptions of safety. It has allowed for experts to save up experience and an extensive knowledge at present, to develop effective technological and design decisions for creation of the equipment with a high degree of explosion safety. The basic stages of decision of a problem are considered in historical sequence, methods and means of maintenance of explosion safety for modern air separation plants are stated.

Keywords: Air. Oxygen. Nitrogen. Air separation plant. Explosion safety. Explosion. Acetylene. Hydrocarbons. Adsorber. Zeolite. Liquid oxygen. Condenser-evaporator.

1. ВВЕДЕНИЕ

Предотвращение взрывов — одна из основных проблем, которые приходится решать при создании воздухоразделительных установок (ВРУ) и их эксплуатации [1-3].

Взрывы, происходившие на воздухоразделительных установках, исходя из конкретных условий и обстоятельств, в результате которых образовалась

взрывоопасная смесь, подразделяются на две группы.

К первой относятся взрывы, происходившие вне технологических аппаратов и трубопроводов. Такие взрывы обусловлены образованием взрывоопасных смесей жидких кислорода или воздуха с органическими веществами в местах, где при нормальной работе оборудования их присутствие должно быть исключено. В противном случае это приводит к взрывам во внутриблочном пространстве пропитанных жидким

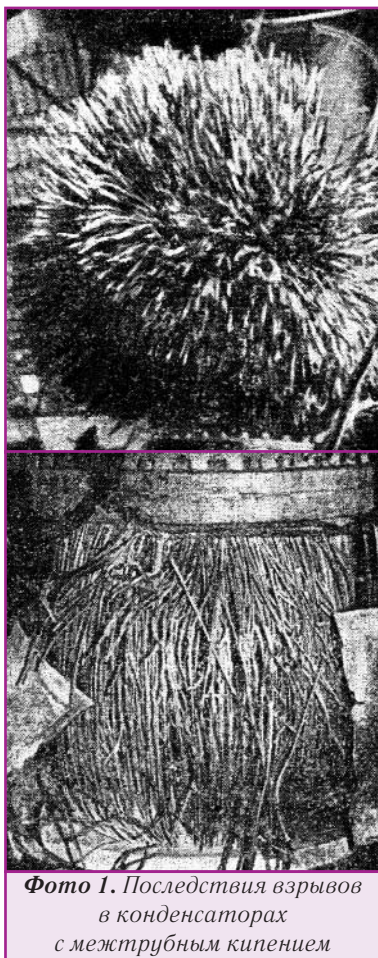


Фото 1. Последствия взрывов в конденсаторах с межтрубным кипением

кислородом деревянных деталей, использовавшихся в качестве изоляции; взрывам в маслобаках и редукторах турбодетандеров, вызванных попаданием в них обогатённого кислородом жидкого воздуха в результате работы установки с чрезмерно высоким уровнем жидкости в сборнике колонны высокого давления; взрывам в детандерных фильтрах из-за попадания на фильтрующую ткань жидкости, обогащённой кислородом, и взрывам, обусловленным 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, создававшихся с использованием в качестве адсорбента в вакуумной полости активированного угля, взрывоопасного в смесях с жидким кислородом.

Для таких взрывов характерно, что органические вещества, образовавшие затем взрывоопасную смесь с жидким кислородом, применялись в конструкции оборудования или попадали в установку при выполнении монтажных (ремонтных) работ. Их количество оказывается относительно большим (сотни грамм, а иногда и более). Поэтому эти взрывы характеризовались сравнительно высокой мощностью, приводили к весьма тяжёлым последствиям и сопровождалась поражением обслуживающего персонала.

Возникновение указанных взрывов всегда обусловлено серьёзными конструктивными недостатками оборудования и грубыми нарушениями правил эксплуатации и ремонта. Вместе с тем, количество таких взрывов относительно невелико и не превышает 2-3 % от общего числа известных взрывов.

Ко второй, наиболее многочисленной группе, относятся взрывы, происходившие в результате возникновения взрывоопасных условий в технологических аппаратах установок в связи с 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.

При прочих равных условиях, вероятность возникновения таких взрывов значительно возрастает по мере увеличения продолжительности работы установки после отогрева. Это связано с тем, что все взрывоопасные примеси, поступающие в установку с перерабатываемым воздухом, имеют достаточно низкие температуры кипения и сравнительно высокую упругость насыщенных паров при положительных температурах. При отогревах установок они полностью испаряются и выносятся из оборудования.

Условия для указанных взрывов создаются в тех местах ВРУ, где испаряется или выпаривается жидкий кислород (обогатённая кислородом жидкость), в результате чего на теплоотдающих поверхностях, а иногда и в массе жидкости накапливаются взрывоопасные количества примесей.

Наиболее часто они возникают в конденсаторах-испарителях.

Сравнительно небольшое число взрывов происходило в клапанных коробках регенераторов и примыкающих к ним трубопроводах, а также в сборниках жидких криопродуктов колонн высокого давления и в некоторых других местах.

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 сосуда, где произошел взрыв, но и соседние аппараты; разрушается также



а)



б)

Фото 2. Трубки длиннотрубного конденсатора-испарителя, разрушенные микровзрывом: а — вид одной из трубок; б — концы трубок, которые были запаяны при сборке конденсатора

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 подводится к арматуре, и в сливных вентилях, что было обусловлено неудовлетворительным выполнением трубопроводов, допуская поступление жидкого кислорода к арматуре, находящейся в закрытом положении.

На фото 1-4 показаны последствия некоторых взрывов наблюдавшихся на воздуходелительных установках.

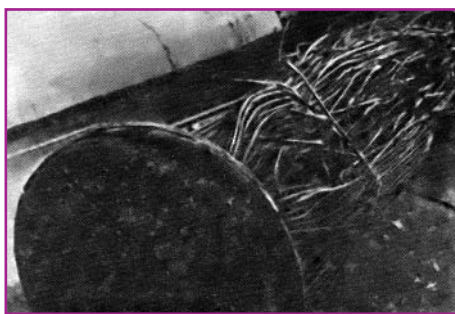


Фото 3. Конденсатор-испаритель с внутритрубным кипением, повреждённый несколькими взрывами

В современных ВРУ повсеместно применяются пластинчато-ребристые конденсаторы-испарители и структурированная (регулярная) насадка в ректификационных колоннах, представляющие собой тонкостенные алюминиевые конструкции. Установлено, что при взрывах такие алюминиевые конструкции в среде жидкого кислорода могут воспламениться и гореть с выделением значительных количеств энергии. Взрывы могут сопровождаться испарением больших объёмов жидкого кислорода, что многократно увеличивает энергию, выделяемую в связи с разрушением аппарата, и из-за этого серьёзно отягчать последствия аварии.

2. НАЧАЛЬНЫЙ ЭТАП РАБОТ ПО ОБЕСПЕЧЕНИЮ ВЗРЫВОБЕЗОПАСНОСТИ ВРУ

Промышленное производство газообразного кислорода, получаемого низкотемпературной ректификацией атмосферного воздуха, началось более 100 лет назад. В то время кислород использовался преимущественно для автогенных нужд (сварка и резка металлов). Как следует из ранних публикаций, взрывы, во многих случаях полностью разрушавшие кислородные установки, начали происходить сразу же после их появления. В книге [4] очень эмоционально описаны такие взрывы.

Анализ позволил прийти к заключению, что при-

чина взрывов — накопление в кислородной установке ацетилена, поступавшего в неё с перерабатываемым воздухом. Значительное загрязнение воздуха ацетиленом обуславливалось размещением кислородных установок в непосредственной близости от генераторов ацетилена, так же использовавшихся

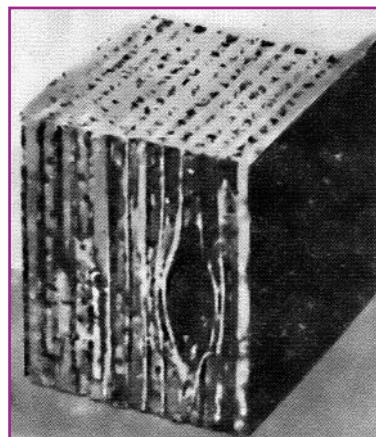


Фото 4. Фрагмент пластинчато-ребристого конденсатора-испарителя, повреждённого микровзрывом в канале

для автогенных нужд. Взрывоопасность ацетилена в смесях с жидким кислородом была подтверждена экспериментально как в СССР *Стрижевским* [5], так и за рубежом *Pollitzer* [6], *Karwat* [7], *Kerry* [8].

Разработанные в те годы методы предотвращения взрывов предусматривали, с одной стороны, удаление генераторов ацетилена от мест забора воздуха для кислородных установок и, с другой, — максимальное уменьшение концентрирования ацетилена в конденсаторах-испарителях путём вывода из них продукционного кислорода в жидком виде. В результате частота взрывов значительно уменьшилась. В этот же период было установлено, что перерабатываемый воздух может загрязняться также маслом, используемым для смазки поршневой группы компрессоров. Образующаяся смесь жидкого кислорода с маслом взрывоопасна. Такие смеси могут формироваться при попадании масла в конденсаторы-испарители. Для предотвращения возможных взрывов началась разработка и внедрение мероприятий, направленных на исключение поступления смазочного масла в холодную часть установок.

В дальнейшем кислород начали использовать в металлургической отрасли и азот — в химической промышленности. Большие объёмы потребления обусловили рост производительности установок до 1 тыс. м³/ч и более. В установках, производящих газообразный кислород, стали применять выносные конденсаторы-испарители, в которых испарение кислорода происходило в существенно более безопасных условиях, чем в применявшихся до этого аппаратах с межтрубным кипением. Однако, несмотря на принимаемые меры, частота взрывов ВРУ радикально не уменьшалась.

В начале сороковых годов советские исследователи *И.П. Ишкин* и *П.З. Бурбо* и почти одновременно с ними *К.А. Лобашов* предложили использовать для очистки от ацетилена адсорберы, располагаемые на потоке обогащённого кислородом жидкого воздуха, а затем и на потоке охлажденного газообразного воздуха. Повсеместное внедрение таких адсорберов значительно снизило остроту проблемы обеспечения взры-

вобезопасности ВРУ. И.П. Ишкину и П.З. Бурбо за внедрение указанной разработки была присуждена Сталинская премия.

В последующем научные основы и технологические приёмы, обеспечивающие взрывобезопасное протекание процессов низкотемпературного разделения воздуха, продолжали совершенствоваться. Необходимость выполнения комплекса научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ в области обеспечения взрывобезопасности воздуходелительных установок в течение многих лет постоянно подстегивалась авариями и взрывами, приводившими к человеческим жертвам и значительным убыткам. Результаты расследований происходивших взрывов неоднократно вносили серьёзные коррективы в направления и программы научно-исследовательских работ и вызывали необходимость реконструкции ранее выпущенных установок.

Первые технические решения, направленные на повышение взрывобезопасности ВРУ за счёт их оснащения адсорберами на потоке кубовой жидкости и организации вывода из конденсаторов кислорода в жидком виде, основывались на уверенности, что опасными является накопление в жидком кислороде ацетилена и попадание в установки масла из компрессоров. Их внедрение в установки в сороковые-пятидесятые годы приводило только к временному снижению частоты взрывов. Далее, в шестидесятые годы, по мере расширения числа предприятий, где вводились в эксплуатацию ВРУ, частота взрывов вновь стала возрастать. В этот период работы по анализу причин взрывов и разработке противоаварийных мероприятий проводились Г.Ф. Денисенко под руководством А.И. Мороза.

Затем началось широкое применение кислорода на металлургических предприятиях в доменном, мартеновском и конвертерном производствах. Интенсивное развитие химической и нефтехимической промышленности сопровождалось пуском в эксплуатацию на предприятиях этих отраслей крупных воздуходелительных установок. Эти установки, в отличие от ранее выпускавшихся, работали уже по технологическим схемам низкого давления. Места их эксплуатации, как правило, характеризовались относительно высокой загрязнённостью перерабатываемого воздуха различными углеводородами, взрывоопасность которых в условиях ВРУ была подтверждена экспериментально [7,9].

3. СОЗДАНИЕ СОВРЕМЕННЫХ МЕТОДОВ И СРЕДСТВ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ВЗРЫВОБЕЗОПАСНОСТИ ВРУ

С середины 60-ых годов работы по обеспечению взрывобезопасности ВРУ были сосредоточены в ОАО «Криогенмаш». В это время стремительно возросла производительность выпускаемых установок до 15-35 тыс. м³/ч по кислороду и более. Это сопровождалось изменением технологических схем, методов очистки и охлаждения воздуха, конструкций технологических

аппаратов и условий протекания процессов, определяющих поведение в установке взрывоопасных примесей, поступающих с перерабатываемым воздухом, а также условий, в которых эксплуатировались установки.

Результаты исследований и накопленный опыт потребовали коренного изменения существовавших методов обеспечения взрывобезопасности ВРУ. Для формирования новой концепции был выполнен большой объём исследований: расширена номенклатура принимаемых во внимание опасных примесей и получены данные об их содержаниях в атмосферном воздухе (Е.В. Вагин, Д.И. Масумов, В.М. Разин); разработан хроматографический метод определения микроконцентраций углеводородов в жидком кислороде и в воздухе (Е.В. Вагин, Д.И. Масумов); созданы обоснованные нормативы содержания опасных примесей в жидком кислороде и перерабатываемом воздухе (В.И. Файнштейн); детально проанализировано изменение агрегатного состояния опасных примесей в условиях основного теплообменного узла ВРУ (В.Ф. Густов, Д.И. Масумов, М.Д. Векслер); рассмотрена динамика накопления примесей в регенераторах, реверсивно работающих пластинчато-ребристых теплообменниках (В.Ф. Густов) и конденсаторах-испарителях и определены условия их взрывобезопасной работы (В.И. Файнштейн); изучены гидродинамические условия работы различных типов конденсаторов-испарителей (В.К. Орлов, В.Е. Поздняк); разработаны химические методы определения различных опасных примесей в жидком кислороде (Н.М. Дыхно).

Один из наиболее серьёзных выводов, который следовал из выполненных нами работ, заключался в том, что накопление взрывоопасных количеств углеводородов в конденсаторах-испарителях возможно и при их средних концентрациях в жидком кислороде, значительно меньших предела растворимости, в связи с образованием отложений примесей на теплоотдающих поверхностях при испарении жидкого кислорода.

Были созданы математические модели указанных процессов. Для их подтверждения были проведены исследования на экспериментальных стендах в условиях, максимально приближённых к производственным (В.И. Файнштейн, Д.И. Масумов, М.Д. Векслер), и на промышленных установках (В.И. Файнштейн, Д.И. Масумов). Также уделялось внимание исследованию адсорбционных и фильтрационных процессов при условиях, характерных для криогенных установок (Е.В. Вагин, Д.И. Масумов, С.С. Петухов). Изучались физико-химические свойства ряда опасных примесей (Р.Г. Амамчян), были начаты исследования, направленные на использование цеолитов для комплексной очистки воздуха (Е.В. Вагин, Н.Ф. Катина, С.С. Петухов, Г.А. Трохина). Всё это позволило разработать методы расчёта и технические решения, обеспечивающие создание установок, надёжно работающих при всех известных условиях по загрязнённости перерабатываемого воздуха. Достаточно подробная библиография по указанным вопросам приведена в работах [2,3].

Весьма эффективным оказалось применение в наших ВРУ первоначально предложенного в 60-ые годы немецкими инженерами способа адсорбционной очистки жидкого кислорода от опасных примесей в циркуляционном контуре. Усовершенствование этого способа позволило отказаться от применявшихся до этого адсорберов на потоке жидкого кислорода.

В 60-70-ые годы неоднократно проводились Все-союзные совещания по проблеме обеспечения взрывобезопасности воздухоразделительных установок, в работе которых участвовали сотрудники многих производств продуктов разделения воздуха [10-13].

Одновременно были созданы нормативные документы, регламентирующие учёт требований безопасности в ходе проектирования ВРУ и станций, а также при эксплуатации оборудования. В частности, разработаны «Правила безопасности при производстве и потреблении продуктов разделения воздуха» (ПБПРВ-88), утверждённые в 1988 г. Госгортехнадзором СССР. Гипрокислородом были созданы нормы проектирования воздухоразделительных станций.

Некоторые итоги выполненных на этом этапе работ были обобщены в монографии [3].

Зарубежные работы по проблемам, связанным с обеспечением безопасности при эксплуатации ВРУ, систематически обобщаются в информационных материалах, разрабатываемых и публикуемых Европейской ассоциацией производителей технических газов (EIGA) [14,15]. Представляет интерес и стандарт компании «Air Liquide» [16].

4. ОБЕСПЕЧЕНИЕ ВЗРЫВОБЕЗОПАСНОСТИ ВРУ НА СОВРЕМЕННОМ ЭТАПЕ

Предотвращение взрывов, обусловленных накоплением взрывоопасных компонентов, содержащихся в воздухе, достигается оснащением установок системами, обеспечивающими глубокую очистку перерабатываемого воздуха от опасных примесей, необходимую доочистку технологических потоков, постоянную очистку жидкого кислорода, а также вывод из установки части кислорода в жидком виде. Наряду с этим, реализуются технологические мероприятия по максимально возможному снижению интенсивности накопления взрывоопасных примесей на теплоотдающих поверхностях при испарении жидкого кислорода и исключению выноса взрывоопасных примесей в последующие аппараты с каплями жидкости.

Используемый при проектировании современных воздухоразделительных установок и реализуемый в процессе эксплуатации 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 благоприятных гидродинамических режимах;

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

- контроль за содержаниями взрывоопасных примесей в местах их наибольшего концентрирования;

- 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.

Этот комплекс мероприятий позволяет: во-первых, предотвратить опасное накопление взрывоопасных примесей на теплоотдающих поверхностях конденсаторов-испарителей путём 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 подводных трубопроводов, а также выноса капель жидкого кислорода в трубопроводы газообразного кислорода.

Достаточно специфичными являются пути обеспечения взрывобезопасности при производстве первичного криптонового концентрата, когда определяющим является накопление метана в аппаратах воздухоразделительной установки [17].

Наиболее радикально на взрывобезопасности ВРУ сказалось применение адсорбционной очистки перерабатываемого воздуха синтетическими цеолитами в блоках комплексной очистки воздуха (БКО), располагаемых на входе в низкотемпературную часть установки. БКО обеспечивают необходимую и достаточно глубокую очистку воздуха не только от технологически нежелательных примесей (влага и диоксид углерода), но и от большинства взрывоопасных веществ.

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

Работы, выполненные в ОАО Криогенмаш (Ю.П. Блазгин [18]), создали необходимые научно-технические предпосылки для внедрения БКО на ВРУ средней и большой производительности, работающих при низком и среднем давлениях. Работы по повышению эффективности адсорбционной очистки воздуха в БКО продолжаются в направлениях совершенствования конструкции адсорберов и подбора новых адсорбентов, обеспечивающих расширение гаммы удаляемых примесей. Одновременно с этим обобщаются и анализируются результаты мониторинга содержания углеводородов в жидком кислороде ВРУ [19].

В результате внедрения на предприятиях и во

вновь создаваемых производствах продуктов разделения воздуха результатов выполненных работ частота взрывов и аварий на ВРУ в России и на территории бывшего СССР в период с 1964 по 1995 годы уменьшилась в десятки раз (см. таблицу). При этом число работающих установок многократно возросло.

По воздуходелительным установкам западных фирм известно (примерно с 1964 г.) следующее число взрывов, связанных с накоплением углеводородов [14]:

- сильные взрывы, сопровождавшиеся разрушением не только установки, но и соседних сооружений — 3;

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

- микровзрывы, приводившие к появлению неплотностей в парогенерирующих каналах испарителей кислорода — 36.

На агрегатах, оснащённых БКО, до 1997 г., согласно мировой статистике, практически не наблюдалось взрывов, связанных с накоплением взрывоопасных примесей, поступающих с перерабатываемым воздухом.

Тем неожиданнее прозвучали известия о двух крупных авариях, происшедших в 1997 г. в Юго-Восточной Азии. В результате этих взрывов были полностью выведены из строя, оснащённые БКО, крупнейшая в мире установка разделения воздуха в Бинтулу (Малазия) и установка средней производительности в Фусуне (Китай) [19,20]. Доступные материалы по этим авариям нами обсуждались в статье [21], а затем в монографии [2].

Обе аварии произошли при экстремальной загрязнённости перерабатываемого воздуха взрывоопасными примесями. Крайне тяжёлые последствия этих взрывов (их тротиловый эквивалент оценивался в сотни кг) были обусловлены тем, что взрыв углеводородов инициировал загорание в жидком кислороде тонкостенных пластинчато-ребристых алюминиевых конструкций.

Возникновению взрывоопасных условий в указанных установках способствовало:

- применение в ВРУ (Бинтулу) конденсаторов-испарителей с нисходящим потоком испаряемой жидкости (оросительного типа), в которых весьма сложно надёжно исключить интенсивное накопление в парогенерирующих каналах примесей, содержащихся в испаряемом кислороде, а также наличие малой проточности основного конденсатора;

- работа в ВРУ (Фусун) конденсаторов-испарителей с чрезвычайно низким уровнем жидкого кисло-

рода, что привело к работе парогенерирующих каналов в «сухом» режиме и обусловило интенсивное накопление в них углеводородов;

- отсутствие в техдокументации указаний о недопустимости работы установки в условиях экстремального загрязнения воздуха;

- отсутствие эффективного контроля за содержаниями в жидком кислороде опасных примесей, специфичных для промышленного района, где работает установка, или адекватной реакции персонала на результаты анализов.

Взрыв в Бинтулу подтвердил опасность переработки в ВРУ воздуха, содержащего не только газообразные взрывоопасные примеси, но также горючие аэрозоли и пыли.

Состоявшиеся взрывы должны послужить подтверждением опасности применения в ректификационных колоннах регулярной насадки из тонкослойного алюминия и пластинчато-ребристых испарителей. О загорании тонких алюминиевых пластин в жидком кислороде было известно давно. Однако возможность их поджигания в условиях промышленной установки считалась практически невероятной. В литературе приводилась фотография (см. рис. 4) последствий микровзрыва в канале алюминиевого пластинчато-ребристого конденсатора-испарителя, не сопровождавшегося загоранием металла [22].

Для исключения возможности взрывов, подобных происшедшим, необходимо всемерно повышать надёжность и эффективность указанного выше комплекса мер, направленных на обеспечение взрывобезопасности.

Многолетнее отсутствие взрывов, а, может быть, и отсутствие доступной информации о них, способствовало возникновению у некоторых специалистов представлений о том, что воздуходелительные установки с БКО в любых условиях полностью защищены от взрывов, а система обеспечения взрывобезопасности таких установок может быть без ущерба существенно упрощена. Упомянутые выше крупнейшие аварии убедительно показали, что это далеко не так. Поэтому, несмотря на весьма малую вероятность подобных аварий, необходимо предпринимать все меры для их предотвращения.

Должна обеспечиваться максимально возможная степень взрывозащищённости на кислородных установках, производящих продукт в жидком виде, и на установках с внутренним сжатием. На этих установках производственный жидкий кислород выводится из кон-

Взрывы на ВРУ, обусловленные накоплением в них углеводородов

	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	178	176	31	3
Установки среднего и высокого давлений:						
– сильные взрывы	95	15	16	7	–	–
Установки среднего давления с БКО:						
– сильные взрывы	–	–	–	–	2	–

денсатора-испарителя в жидком виде и испаряется в пластинчато-ребристом теплообменнике. Если в ВРУ указанных типов предусматривается получение азота или первичного криптонового концентрата, то вопросы обеспечения взрывобезопасности нужно рассматривать с особенной тщательностью.

В современных условиях опасность взрывов в первую очередь связана с возникновением экстремальной загрязнённости воздуха взрывоопасными примесями. Для своевременного предотвращения таких ситуаций необходима организация систематического мониторинга загрязнённости воздуха [23]. Иногда на конкретной промышленной площадке может быть достаточно эффективным сооружение системы удалённых воздухозаборов. Однако высокая их стоимость и необходимость впоследствии постоянно учитывать наличие таких устройств при дальнейшем развитии промышленной площадки, требуют очень тщательной проработки технико-экономической целесообразности создания сооружений этого вида.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Из рассмотрения в исторической перспективе результатов современного состояния проблемы обеспечения взрывобезопасности воздуходелительных установок следует, что, несмотря на достигнутые успехи, этим вопросам необходимо постоянно уделять внимание как при проектировании ВРУ, так и при их эксплуатации.

В настоящее время представляется необходимым с учётом требований федерального закона «О техническом регулировании» создание Технического регламента или свода правил безопасной эксплуатации производств продуктов разделения воздуха.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Денисенко Г.Ф., Файнштейн В.И.** Техника безопасности при производстве кислорода. — М.: Металлургия, 1968. — 219 с.
2. **Файнштейн В.И.** Кислород, азот, аргон — безопасность при производстве и применении. — М.: Интернет-Инжиниринг, 2008. — 192 с.
3. Взрывобезопасность воздуходелительных установок/ Под ред. **В.П. Белякова** и **В.И. Файнштейна**. — М.: Химия, 1986. — 224 с.
4. **Клод Ж.** Жидкий воздух. — Л.: Научно-хим. техническое изд-во, 1930. — 361 с.
5. **Стрижевский И.И.** Борьба с ацетиленовой опасностью при эксплуатации аппаратов для ректификации воздуха// Известия отделения технических наук АН СССР. — 1939. — № 3. — С. 51-62.
6. **Pollitzer W.** Explosionen an Apparaten zur Neifluesigung von Lueft// Z.f. angew. Chemie. — 1923. — Bd. 26. — No 39-40. — S. 262-266.
7. **Karwat E.** Kohlenwasserstoffe in Lueftzerlegungsanlagen// Linde Ber. aus Techn. und Wissenschaft. — 1958. — No 4. — S. 3-10.
8. **Kerry F.G.** Safety aspects of modern air separation plant cycles// Chem. Eng. Progr. — 1957. — V. 53. — No 4. — P. 181-187.
9. **Басыров З.Б.** Детонационная способность смесей ацетилен и масла с жидким кислородом// Кислород. — 1959. — № 5. — С. 1-6; **Басыров З.Б.** Чувствительность смесей органических веществ с жидким кислородом к импульсу давления// Кислород. — 1959. — № 6. — С. 13-23.
10. Материалы технического совещания по обеспечению взрывобезопасных условий работы воздуходелительных установок (15-16 мая 1956 г.). — М.: ВНИИКИ-МАШ, 1956. — 86 с.
11. Обеспечение взрывобезопасной эксплуатации воздуходелительных установок. ХМ-6. Кислородное и автотенное машиностроение. — М.: ЦИНТИХимнефтемаш, 1966. — 50 с.
12. Взрывобезопасность воздуходелительных установок. — М.: ЦИНТИХимнефтемаш, 1969. — 146 с.
13. Криогенное оборудование. Безопасность и надежность. Приложение к журналу// Химическое и нефтяное машиностроение. — 1993. — № 1. — 40 с.
14. Safe practices guide for cryogenic air separation plants (Руководство по безопасности для криогенных воздуходелительных установок)/ IGC EIGA Document 704/05. — 70 p.
15. Safe operation of reboilers/condensers in air separation units (Безопасная работа испарителей-конденсаторов в воздуходелительных установках)/ IGC EIGA Document 65/99/E. — 30 p.
16. Recommendations to control hazards related to hydrocarbons in the operation of air separation units (Рекомендации по обеспечению взрывобезопасности, связанной с углеводородами при работе воздуходелительных установок)/ Air Liquide Standard DI, GR.231.05-0. — 29 p.
17. **Файнштейн В.И.** Безопасность производства криптонового концентрата и сырого криптона// Технические газы. — 2008. — № 2. — С. 62-65.
18. **Блазний Ю.П., Кусый Г.В.** Исследование процессов в блоках комплексной очистки воздуха// Кн. «Криогенная техника. Юбилейный выпуск». — М.: ОАО «Криогенмаш», 1999. — С. 84-92.
19. 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.
20. 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.
21. **Файнштейн В.И.** Обеспечению взрывобезопасности воздуходелительных установок — постоянное усиленное внимание// Технические газы. — 2006. — № 6. — С. 63-66.
22. **Klein E.** Ueber die Brennbarkeit einiger Metalle in Sauerstoff// Linde Ber. aus Techn. und Wissenschaft. — 1972. — No 31. — S. 55-63.
23. **Файнштейн В.И.** Обеспечение взрывобезопасности воздуходелительных установок в современных условиях// Химическое и нефтегазовое машиностроение. — 2007. — № 2. — С. 20-23.