

Научная статья
УДК 66.047.3-027.274
doi: 10.34987/vestnik.sibpsa.2022.58.87.005

ОБЩИЕ ПРИНЦИПЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ВЗРЫВОБЕЗОПАСНОСТИ ПРОЦЕССОВ СУШКИ

*Андрей Николаевич Минкин^{1,2},
Елена Владимировна Мусияченко¹,
Дмитрий Александрович Едимичев¹,
Алина Владимировна Феоктистова¹*

¹Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

²Сибирская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, Железногорск, Россия

Автор ответственный за переписку: Андрей Николаевич Минкин, minkin.1962@mail.ru

Аннотация. При нарушении состояния взрывобезопасности технологических процессов сушильных установок возникает высокая вероятность взрыва, приносящего значительные разрушения и материальный ущерб. Для решения данной проблемы предлагается применение трех принципов: исключение возможности образования горючих смесей; предотвращение возникновения тепловых источников, инициирующих горение; использование систем пассивной или активной взрывозащиты, способных локализовать взрыв в пределах аппаратов.

Ключевые слова: взрыв, взрывобезопасность, взрывозащита, горючая среда, сушильная установка, сушка

Для цитирования: Минкин А.Н., Мусияченко Е.В., Едимичев Д.А., Феоктистова А.В. Общие принципы обеспечения взрывобезопасности процессов сушки// Сибирский пожарно-спасательный вестник. 2022. № 1 (24). С. 37-42.
<https://dx.doi.org/10.34987/vestnik.sibpsa.2022.58.87.005>

Original article

GENERAL PRINCIPLES OF EXPLOSION-PROOF DRYING PROCESSES

*Andrey N. Minkin^{1,2},
Elena V. Musiyachenko¹,
Dmitriy A. Edimichev¹,
Alina V. Feoktistova¹*

¹Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

²Siberian Fire and Rescue Academy EMERCOM of Russia, Zheleznogorsk, Russia

Corresponding author: Andrei N.Minkin, minkin.1962@mail.ru

Abstract. If the state of explosion safety of technological processes of drying plants is violated, there is a high probability of an explosion, causing significant destruction and material damage. To solve this problem, it is proposed to use three principles: exclusion of the possibility of the formation of suspension

combustion; prevention of the occurrence of heat sources capable of initiating combustion; the use of passive or active explosion proofing systems capable of localizing an explosion within the apparatus.

Key words: explosion, explosion safety, explosion proofing, combustible environment, air-drying plant, drying

For citation: Minkin A.N., Musiyachenko E.V., Edimichev D.A., Feoktistova A.V. General principles of explosion-proof drying processes // Siberian Fire and Rescue Bulletin 2022. № 1 (24). С. 37-42. <https://dx.doi.org/10.34987/vestnik.sibpsa.2022.58.87.005>

Актуальность

Взрыв внутри технологического оборудования и производственных помещений является одной из наиболее опасных и типичных аварийных ситуаций для предприятий химической и смежных отраслей промышленности. Статистика [1] показывает, что результатом 37% всех аварий на объектах нефтехимической и нефтеперерабатывающей промышленности России являются взрывы в производственных помещениях, которые, как правило, становятся следствием взрывов в технологическом оборудовании. Вместе с классическими способами и методами взрывозащиты технологических установок и аппаратов для профилактики и обеспечения взрывобезопасности производства в целом [1, 2] можно использовать оригинальный метод прогнозирования аварий, приводящих к пожарам, апробированный на объектах нефтегазовой отрасли [3].

Процессы сушки дисперсных горючих продуктов представляют значительную опасность. Требования технологических регламентов большинства установок, связанных с переработкой горючих материалов, направлены на исключение образования взрывоопасной среды, однако, на практике эксплуатируемое оборудование довольно часто выходит из строя по этой причине.

Особую опасность представляют установки сушки дисперсных материалов от горючих продуктов в токе воздуха. В этом случае к процессу термообработки предъявляют специальные требования обеспечения взрывобезопасности, т.к. растворители образуют взрывоопасные паровоздушные смеси, а дисперсный материал – взрывоопасную пылевоздушную смесь.

Разработка и использование средств защиты оборудования от взрывов базируются на понимании происходящих при этом процессов и динамике их развития. Взрыв рассматривается как комплекс явлений, связанных с выделением больших количеств энергии в ограниченном объеме за очень короткий промежуток времени [4]. Наиболее опасным внешним проявлением взрывов горючих смесей в замкнутом объеме считается быстрое повышение давления, причем (если не учитывать детонацию) максимальное давление взрыва может превышать начальное в 8...11 раз [5]. Защита от взрывов в технологическом оборудовании всегда направлена на предотвращение его разрушения под действием давления.

Надежным способом взрывозащиты является установка высокопрочного оборудования, способного выдержать полное давление взрыва, однако данный способ применяется редко в связи с большими экономическими затратами. Снижение давления при взрыве горючей смеси в установке позволит либо полностью отказаться от применения средств защиты ($P_{\text{взр}} \leq P_{\text{расч}}$), либо значительно упростить конструкцию предохранительных устройств, например, уменьшить диаметр взрывной мембраны.

Целью данной работы является рассмотрение некоторых принципов обеспечения взрывобезопасности технологических процессов сушки.

Анализ причин аварии

Сушка является одним из наиболее сложных теплообменных процессов, скорость которого определяется скоростью диффузии влаги из глубины высушиваемого вещества к поверхности и от границ раздела фаз в окружающую среду.

В технологии сушки дисперсных материалов от органических растворителей возможно образование горючих аэродисперсных смесей различного состава. Опасность возникновения взрыва таких смесей будет определяться как пожаровзрывоопасными свойствами высушиваемого материала, так и особенностями технологического процесса сушки и его аппаратного оформления. В одной и той же сушильной установке возможно наличие и гомогенных, и гетерогенных горючих смесей.

Особую опасность представляют процессы сушки, когда твердая и газообразные фазы (испаряющееся вещество) являются по своим свойствам взрывопожароопасными. В этом случае в объеме сушильной установки возможно образование гибридных смесей, которые характеризуются воспламенением и горением пылевидных веществ в присутствии горючих газов или паров растворителей. Наличие таких гибридных смесей в оборудовании увеличивает вероятность взрыва даже тогда, когда доля горючего газа или пара (если взять их отдельно) находятся за пределами воспламенения [6].

Таким образом, при сушке горючих материалов практически всегда имеется потенциальная опасность их воспламенения.

Несмотря на большое разнообразие конструкций сушильных установок, возможно представить общую структурную схему, которая позволяет разделить всю конструкцию на отдельные взаимосвязанные функциональные блоки (рисунок) [7].



Рисунок. Структура сушильной установки

Такое разделение дает возможность более детально выполнить анализ состояния взрывоопасности как дифференцированно по блокам, так и комплексно, поскольку при сушке материалов от горючих растворителей возможно образование взрывоопасных концентраций при выносе высушиваемых веществ с последующим их осаждением в пылесадительных камерах, центробежных пылесадителях, в электро- и рукавных фильтрах, бункерах и других устройствах, а также имеется потенциальная опасность воспламенения паров в любой части сушильной установки.

Принципы обеспечения взрывобезопасности процессов сушки

На основе анализа существующих способов предотвращения производственных аварий можно сделать вывод о том, что методы обеспечения безопасности основываются на трех принципах предотвращения взрывов пылепарогазовых систем [8] в технологическом оборудовании. Первый метод состоит в исключении возможности образования горючих смесей. Второй – в предотвращении возникновения тепловых источников, способных инициировать горение, т. е. поджечь существующую, заведомо горючую систему. Третий – в использовании оборудования, способного выдержать последствия сгорания внутри установки и обеспечить локализацию взрыва в пределах аппаратов с применением систем пассивной или активной взрывозащиты.

Первый принцип при использовании большинства типов сушилок реализовать на практике невозможно. Это связано с тем, что основные высушиваемые материалы (в том числе и органические растворители) являются горючими, поэтому полностью исключить

образование горючей смеси в сушильной установке невозможно. Однако технически осуществимо снизить горючесть среды путем применения инертных добавок: азота, топочных газов, углекислоты или инертных твердых материалов.

Инертные добавки флегматизируют горючую смесь, вплоть до превращения ее в негорючую. Для процессов сушки наиболее типичными являются тепловые инертные флегматизаторы, которые могут быть как газообразными (H_2 , CO_2 и т. д.), так и твердыми дисперсными продуктами. Механизм воздействия негорючих инертных материалов заключается в следующем: при попадании в зону горения негорючих твердых частиц или молекул газообразных инертных разбавителей они становятся тепловыми поглотителями, т. к. для их нагрева расходуется часть тепла, выделяемая при горении.

Применение данного метода осложняется тем, что в некоторых случаях технология сушки не допускает разбавления перерабатываемых продуктов инертными компонентами, при этом использование инертных флегматизаторов снижает экономические показатели процесса. На величину давления, развивающегося при взрыве в замкнутом объеме, оказывают дополнительное влияние следующие факторы:

- процентное содержание горючего в смеси;
- расположение источника зажигания относительно геометрического центра оболочки;
- форма и конструктивные особенности оболочки.

Изменение давления взрыва в зависимости от концентрации горючего можно рассчитать по формуле

$$P_{\text{взр}} = P_{\text{н}} \left[1 + \frac{q}{cT_0} (C_0 - C) \right] \mu, \quad (1)$$

где $P_{\text{н}}$ – начальное давление;

q – тепловой эффект реакции;

T_0 – начальная температура;

C – концентрация горючей смеси;

C_0 – начальная концентрация горючей смеси;

μ – коэффициент, учитывающий изменение числа молей при реакции.

Для определения давления взрыва внутри оболочки произвольной формы Резник Л.Б. и Байков Н.А. предложили формулу

$$P_{\text{взр}} = P_{\text{max}} \sqrt[3]{\frac{V_3}{V_0 + V_T}}, \quad (2)$$

где $V_3 = \frac{4}{3} \pi \left(\frac{3V}{S}\right)^3 \approx 114 \left(\frac{V}{S}\right)^3$ – объем сферы, в которой давление взрыва эквивалентно

давлению взрыва, развивающемуся в оболочке произвольной формы;

V_0 – характеристический объем для данной смеси;

V_T – отношение объема оболочки к площади внутренней поверхности.

При невозможности обеспечения безопасности ведения технологического процесса сушки на основе первого принципа, используют мероприятия, основанные на втором принципе.

Второй принцип направлен на исключение источников зажигания, в качестве которых могут выступать открытое пламя, разряды статического электричества, электрические разряды, нагретые твердые тела, ударные волны, различные самовоспламеняющиеся пиррофорные материалы, очаги самовозгорания, искры механического происхождения.

В тех случаях, когда невозможно исключить вероятность образования горючей смеси и появление источника зажигания, взрывобезопасность технологических процессов обеспечивают по третьему принципу.

Третий принцип является наиболее надежным, он основан на выборе и применении прочного оборудования, способного выдержать полное давление взрыва. При расчетах

на взрывоустойчивость применяют одну из теорий прочности, поэтому в работе [9] вводится фактор разрушающего действия взрыва, мощность взрыва определяется выражением

$$N = \frac{P_{\text{взр}}}{\tau_{\text{взр}}} V_0^{1/3} \cdot V_a^{2/3}, \quad (3)$$

где V_0 – объем экспериментальной емкости;

V_a – объем аппарата.

Вероятность разрушения аппарата устанавливается величинами энергии взрыва горючей смеси и упругой энергии.

Для оценки энерговыделения при взрыве используется следующее соотношение

$$E_{\text{взр}} \sim P_{\text{max}} \cdot V_{\text{г.с.}} \quad (4)$$

где P_{max} – максимальное давление взрыва;

$V_{\text{г.с.}}$ – объем горючей смеси.

Снижение размера сушильных установок позволяет уменьшить вероятность разрушения аппарата, если произошел взрыв, несмотря на принятые профилактические меры. Из формулы (4) следует, что величина энергии взрыва определяется и количеством горючего вещества, и давлением взрыва. Экономически целесообразным является применение метода секционирования объемов аппарата.

Выводы

Одним из наиболее перспективных способов защиты сушильных установок от разрушения при взрыве является метод секционирования свободного объема.

В качестве дополнительных показателей анализа взрывобезопасности технологических процессов, возможно использовать цифровые двойники предприятий для определения экономической целесообразности (окупаемости) предлагаемых противопожарных способов и мероприятий [10].

Выбор комплекса защитных мероприятий выполняется с учетом экономической оптимальности.

Несомненно, что взрывобезопасность сушильных установок во многом предопределена правильным выбором основных параметров процесса сушки и стабильности их регулирования в заданных пределах.

Как видно из вышеизложенного для разработки соответствующих рекомендаций необходимо знать не только кинетические закономерности процесса сушки, но и показатели пожаровзрывоопасности высушиваемых материалов.

Рассмотренные принципы обеспечения взрывобезопасности в сушильных аппаратах могут применяться как дифференцированно, так и в сочетании друг с другом и иными защитными мероприятиями.

Список источников

1. Краснов, А. В. Статистика чрезвычайных происшествий на объектах нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности за 2007-2016 гг. / А. В. Краснов, З. Х. Садыкова, Д. Ю. Пережогин, И. А. Мухин // Сетевое издание «Нефтегазовое дело». – 2017. – № 6, С. 179-191. URL: <http://ogbus.ru/article/view/statistika-chrezvychajnyx-proisshestvij-na-obektax-neftepererabatyvayushhej-i-nefteximicheskoj-promyshlennosti-za-2007-2016-gg-statistics-of-emergency-accidents-in-the-refining-and-petrochemical>. – Режим доступа: свободный. – Текст: электронный.

2. Масаев, С. Н. Магнитная Буря как источник аварий на нефтеперерабатывающих заводах РФ / С. Н. Масаев, Д. А. Едимичев, Е. А. Руф, А. А. Середкина // Современные проблемы гражданской защиты. – 2020. – № 2(35). – С. 72-77.
3. Едимичев, Д. А. К вопросу об использовании электрофильтров в системе вентиляции цеха по производству серы для улавливания серной пыли / Д. А. Едимичев, А. Н. Минкин, С. Н. Масаев, А. А. Межеумова // Сибирский пожарно-спасательный вестник. – 2020. – № 2 (17). – С. 12-19. – DOI 10.34987/vestnik.sibpsa.2020.17.2.010.
4. Масаев, С. Н. Оценка пожарных рисков и поражающих факторов закрытого распределительного устройства 220 кВ / С. Н. Масаев, А. Н. Минкин, Д. А. Едимичев // Сибирский пожарно-спасательный вестник. – 2018. – № 4 (11). – С. 29-38.
5. Zeern Y.P. Dust explosions – Fn: «Bulr handling and transport», 1979, V. 2, p.p. 25/1-25/3
6. Иванов, А. Г. О масштабных эффектах при разрушении. / А. Г. Иванов, В. Н. Минеев // Физика горения и взрыва. – 1979. - № 5. - С. 70-95. DOI: <http://dx.doi.org/10.17122/ogbus-2017-6-179-191>
7. Балин, В.А. Оценка взрывоопасности технологий сушки химико-фармацевтических препаратов / В. А. Балин, Р.Я. Дедеян, А.Н. Минкин : тезисы докладов V научной конференции. – Рубежное, 1986. – С .383.
8. Бесчастнов, М.В. Аварии в химических производствах и меры их предупреждения / М. В. Бесчастнов, В. М. Соколов, М. И. Кац. – Москва: Химия, 1976. – 368 с.
9. Попов, Б.Г. Предупреждение взрывов пыли в крупнотонажных производствах пластмасс. / Б. Г. Попов, А. И. Жуков // Журнал Всесоюзного химического общества им. Д.И. Менделеева. – 1979. - т. XXIV, № 4. - с. 370-375.
10. Masaev, S. N. An algorithm for determining the state of a non-stationary dynamic system for assessing fire safety control in an enterprise by the method of integrated indicators / S. N. Masaev, A. N. Minkin, D. A. Edimichev // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Krasnoyarsk, Russia, / Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering Associations. – Krasnoyarsk, Russia: Institute of Physics and IOP Publishing Limited, 2020. – P. 42014. – DOI 10.1088/1757-899X/919/4/042014.

Информация об авторах

А.Н. Минкин - кандидат технических наук, доцент
Е.В. Мусияченко - доцент
Д.А.Едимичев - кандидат технических наук, доцент

Information about the author

A.N. Minkin – Ph.D. of Engineering Sciences, Docent
E.V. Musiyachenko – Docent
D.A. Edimichev – PhD in Engineering, Docent

Статья поступила в редакция 17.01.2022; одобрена после рецензирования 09.03.2022; принята к публикации 21.03.2022.

The article was submitted 17.01.2022, approved after reviewing 09.03.2022, accepted for publication 21.03.2022.