

ХИМИЧЕСКАЯ ПРОМЫШЛЕННОСТЬ СЕГОДНЯ

4 / 2024

Тема номера:

ПРОБЛЕМА ТВЕРДЫХ ОТХОДОВ ПЛАСТМАСС: УТИЛИЗАЦИЯ И ПЕРЕРАБОТКА



Над номером работали:

Главный редактор: д.х.н., проф.

Роман Козловский, nauka@chemprom.org

Генеральный директор: Ярцева Дарья Вадимовна,
chef@chemprom.org

Руководитель отдела подписки Артем Вашурин,
av@chemprom.org

Заведующая научным отделом:

Сария Козлова, red@chemprom.org

Дизайн и верстка: Станислав Игнатов

Члены редколлегии:

д.х.н., проф. Аветисов И. Х.

д.т.н., проф. Акинин Н. И.

д.х.н., проф. Бухаркина Т. В.

д.т.н., проф. Ваграмян Т. А.

член-корр. РАН, д.т.н., доцент Вошкин А. А.

д.т.н., проф. Грунский В. Н.

д.т.н., проф. Каграманов Г. Г.

д.т.н., проф. Кузнецов А. Е.

д.т.н., проф. Макаров Н. А.

член-корр. РАН, д.х.н., проф. Максимов А. Л.

академик РАН, д.т.н., проф. Мешалкин В. П.

академик РАН, д.х.н., проф. РАН Новаков И. А.

член-корр. РАН, д.т.н., проф. Носков А. С.

д.т.н., проф. Пантелеев И. Б.

д.т.н., проф. Панфилов В. И.

д.т.н., доцент Растунова И. Л.

д.т.н., проф. Сафин Д. Х.

к.б.н., доцент Сахаров Д. А.

д.х.н., проф. Степанов С. И.

д.х.н., проф. Сульман М. Г.

д.т.н., проф. Тимошенко А. В.

д.х.н., проф. Флид В. Р.

Издается под эгидой Российского Союза химиков
и Российского химико-технологического университета
им. Д. И. Менделеева, ФГУП «НТЦ Химвест»

По вопросам оформления подписки:

направьте в любом формате письмо

с запросом по адресу:

av@chemprom.org, Вашурин Артем

По вопросам размещения рекламы:

Коммерческая служба: +7 (495) 970-21-90,

reklama@chemprom.org

Журнал «Химическая Промышленность сегодня» включен
в Перечень ведущих рецензируемых научных изданий,
в которых должны быть опубликованы основные результаты
диссертаций на соискание ученой степени кандидата
наук и ученой степени доктора наук. Также журнал входит
в базу данных Russian Science Citation Index (RSCI) на
платформе Web of Science, и входит в Международную
реферативную базу Chemical Abstracts.

Редакция оставляет за собой право редакционной правки
публикуемых материалов. Редакция может опубликовать
статьи в порядке обсуждения, не разделяя точку зрения
автора. При перепечатке ссылка на журнал обязательна.

Адрес редакции:

Россия, 125047 Москва А-47, Миусская пл., 9,
РХТУ им. Д. И. Менделеева, ООО «Химпром Сегодня».
Тел./факс: +7 (495) 970-21-90 www.chemprom.org

Отпечатано в ООО «Интерпак».

6 выпусков в год. Тираж 1000 экз.

Издание зарегистрировано Министерством РФ по делам
печати, телерадиовещания и средств массовых коммуни-
каций. Свидетельство о регистрации ПИ №77-13131

Дата выхода: 22 июля 2024 г.

СОДЕРЖАНИЕ

ПРОЦЕССЫ И АППАРАТЫ ХИМИЧЕСКИХ ТЕХНОЛОГИЙ

ВЫВОД ФОРМУЛ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОРОЗНОСТИ И УДЕЛЬНОЙ ПОВЕРХНОСТИ КОЛЕЦ РАШИГА

2–7

ТЕХНОЛОГИИ

ПРОБЛЕМА ТВЕРДЫХ ОТХОДОВ ПЛАСТМАСС: УТИЛИЗАЦИЯ И ПЕРЕРАБОТКА

8–22

ТЕХНОЛОГИЯ ПОЛУЧЕНИЯ НАНОСТРУКТУРИРО- ВАННОЙ КОМПОЗИЦИИ СПЛАВА БИОГЕННЫХ МИКРОЭЛЕМЕНТОВ

23–28

БЕНЗИЛБЕНЗОАТ: ОСНОВНЫЕ МЕТОДЫ ПОЛУЧЕНИЯ, СВОЙСТВА, ПРИМЕНЕНИЕ (ОБЗОР)

29–37

ОЧИСТКА ОТРАБОТАННОГО УТЯЖЕЛЕННОГО БУРОВОГО РАСТВОРА С ВЫСОКИМ СОДЕРЖАНИЕМ ТВЕРДОЙ И ОРГАНИЧЕСКОЙ ФАЗЫ

38–47

БЕЗОПАСНОСТЬ ХИМИЧЕСКИХ ПРОИЗВОДСТВ

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИЧИН И ПОСЛЕДСТВИЙ ВЗРЫВА НА ФАРМАЦЕВТИЧЕСКОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

48–54

СЫРЬЕ И МАТЕРИАЛЫ

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ СОЗДАНИЯ БЕСКЕРНОВОГО КАРБИДОКРЕМНИЕВОГО ВОЛОКНА ИЗ ПРЕКУРСОРОВ РАЗЛИЧНОГО ТИПА

55–61

ИЗВЛЕЧЕНИЕ ЛИТИЯ ИЗ ПРИРОДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ. ЧАСТЬ 2. ПЕРСПЕКТИВЫ ВЫДЕЛЕНИЯ ЛИТИЯ ИЗ ВОДНЫХ РАССОЛОВ

62–68

ПОДГОТОВКА МЕДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ВНУТРЕННИХ СЛОЕВ МНОГОСЛОЙНЫХ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ К ПРЕССОВАНИЮ

69–76

КИНЕТИКА И АНАЛИЗ

КИСЛОТНО-КАТАЛИТИЧЕСКОЕ РАЗЛОЖЕНИЕ ГИДРОПЕРОКСИДА ВТОР-БУТИЛБЕНЗОЛА ДО ФЕНОЛА И МЕТИЛЭТИЛКЕТОНА

77–84

ДАТЫ

2 ИЮЛЯ 2024 ГОДА ИСПОЛНИЛОСЬ 75 ЛЕТ АКАДЕМИКУ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК ИВАНУ АЛЕКСАНДРОВИЧУ НОВАКОВУ

85–86

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИЧИН И ПОСЛЕДСТВИЙ ВЗРЫВА НА ФАРМАЦЕВТИЧЕСКОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

Шушпанов А. Н., Васин А. Я., Райкова В. М.
Российский химико-технологический университет
имени Д.И. Менделеева, Москва.

В работе проведен анализ аварийной ситуации, сложившейся на одном из российских фармацевтических предприятий, в результате которой была повреждена производственная установка, разрушен цех и один рабочий получил тяжелые травмы. Настоящее исследование показывает возможность глубокого исследования аварийных ситуаций в условиях недостатка исходных данных – в частности, неполного описания аварии в официальных источниках. Раскрыт потенциал проведения предварительных лабораторных исследований в области пожаровзрывобезопасности веществ и материалов до внедрения масштабных промышленных процессов.

Ключевые слова: теризидон, промышленная безопасность, пылевоздушные смеси, газовоздушные смеси, взрывы.

Благодарность: Авторы крайне благодарны сотрудникам Информационно-библиотечного центра РХТУ им. Д. И. Менделеева за оперативность подбора архивных статей и документов, а также к.т.н. До Т. Х. за тщательно и скрупулезно проведенные исследования в области кинетических параметров теризидона.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов и сообщают об отсутствии коммерческой заинтересованности в какой-либо из концепций, изложенных в данной статье, а также об отсутствии личной предвзятости к ситуации. Коллектив авторов был движим исключительно научным интересом.

INVESTIGATION OF THE CAUSES AND CONSEQUENCES OF AN EXPLOSION IN PHARMACEUTICAL PRODUCTION

Shushpanov A. N., Vasin A. Ya., Raikova V. M.
Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Moscow.

Abstract: : This paper analyzes the emergency situation at one of the Russian pharmaceutical enterprises, as a result of which the production plant was damaged, the workshop was destroyed and one worker was seriously injured. The present study shows the possibility of an in-depth study of emergency situations in conditions of a lack of initial data – in particular, an incomplete description of the accident in official sources. The potential of conducting preliminary laboratory studies in the field of fire and explosion safety of substances and materials before the introduction of large-scale industrial processes is revealed.

Keywords: terizidone, industrial safety, dust-air mixtures, gas-air mixtures, explosions.

Введение

Фармацевтическая промышленность является одной из самых важных и значимых для человечества ветвей химической промышленности [1]. Отрасль важна настолько, что некоторые авторы говорят о неотделимости данной индустрии от технологической составляющей человеческой материальной культуры [2,3]. Создание новых и совершенствование старых производственных мощностей на указанном направлении рискованно и сопряжено с дорогостоящими инновациями [4]. Таким образом остро встает вопрос промышленной и технологической безопасности, возникающий вне зависимости от того, планирует ли производитель остаться на старой производственной базе, иногда морально устаревшей, или воплотить в жизнь новую, не всегда до конца исследованную с указанной точки зрения [5]. Прежде всего, здесь, как и во всей химической отрасли, особенно остра проблема пожаровзрывобезопасности, причем статистика неумолима – производства улучшаются, меры безопасности повышаются, но с годами все также половина инцидентов в химической промышленности оканчивается либо пожаром, либо взрывом, либо и тем, и другим [6–8].

Молекулы синтетических лекарств и витаминов, антибиотиков и полупродуктов их производства имеют в структуре функциональные группы, оказывающие влияние на свойства данного конкретного вещества – обуславливающие терапевтический эффект (для лекарств) или оптимизирующие пути синтеза (для полупродуктов) [9,10]. Зачастую эти функциональные группы, столь полезные для фармацевтов и технологов, ставят дополнительные задачи специалистам в области безопасности, поскольку способны оказать негативное влияние на пожаровзрывоопасные свойства вещества [11]. Иногда это негативное воздействие настолько неочевидно и стохастично, что классического подхода технолога к формированию технического регламента производства (с изучением справочных и литературных данных) недостаточно и могут потребоваться дополнительные исследования, например, термический анализ с целью получения кинетических параметров процесса разложения [12–15].

К сожалению, специалистам в области безопасности не всегда доступны результаты детальных расследования аварий. Тем не менее даже в условиях недостатка информации всегда остается возможность научного прогнозирования события, что и представлено в настоящей статье.

Взрыв на производстве лекарственного препарата

Весной 2022 г. российские новостные агентства распространили информацию о взрыве на фармацевтическом заводе «Синтез» в г. Курган, в ходе которого пострадал один человек. Взрыв прогремел 29 апреля 2022 г. в 16:44 на территории цеха № 4 предприятия, по словам исполнительного директора «Синтеза», на этот момент рабочий день на предприятии был закончен, большая часть работников покинула территорию завода, пострадавший сотрудник заканчивал производственный процесс.

По данным информантов после взрыва на территории поврежденного объекта возник пожар площадью 200 кв. м., который был быстро локализован и потушен.

В декабре 2022 г. Уральское управление Ростехнадзора завершило техническое расследование причин аварии с тяжелым несчастным случаем на «Синтезе» и дало общедоступное заключение. Согласно данным расследования, в результате локального перегрева при производстве лекарственного препарата теризидон внутри процесс-фильтра возникло избыточное давление, что привело к его разгерметизации с выбросом в объем помещения с последующим взрывом.

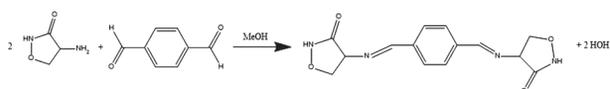
В ходе расследования комиссией совместно с экспертными группами были установлены основные причины аварии, это достаточно обширный список, каждый пункт из которого достаточно важен, но особый научный интерес представляют, пожалуй, два пункта этого списка, а именно:

- на ПАО «Синтез» не отлажена система по передаче технологии из лабораторных условий в производственные. Установлено различие в проводимых операциях (масштабы, сушка, фильтрация) при лабораторных исследованиях и производственном изготовлении. Лабораторными исследованиями не выявлены взрывопожароопасные свойства теризидона в связи с небольшим количеством исследуемого вещества;
- при осуществлении технологической операции по сушке субстанции допущены нарушения установленного порядка осуществления такой операции и правил эксплуатации технологического оборудования фильтра-сушилки, установленных заводом изготовителем в руководстве по эксплуатации и обслуживанию.

В настоящей статье проведен анализ причин аварии на основании информационных данных, взятых из открытых источников, и результатов исследования, полученных авторами лично.

Локальный перегрев

Начать теоретическое исследование стоит с анализа данных производственного процесса и субстанции, являющейся непосредственным актором данного процесса. Теризидон – это 4-[[4-[(3-Оксо-1,2-оксазолидин-4-ил)аминометил]фенил] метилиденамино]-1,2-оксазолидин-3-он, антибиотик широкого спектра действия, используемый в качестве противоопухолевого средства второй линии, активен против легочного и внелегочного туберкулеза, в том числе лекарственно-устойчивых форм. Фактически, это две молекулы другого популярного антибиотика, циклосерина ((R)-4-амино-3-изоксазолидинон), «сшитые» за счет реакции с терефталевым альдегидом в присутствии метанола. Общий вид реакции таков:



В отчете Ростехнадзора идет речь о сушке продукта и упоминается процесс-фильтр. По всей видимости, речь идет о конечном этапе синтеза, когда количества метанола в субстрате пренебрежимо мало. В отчете также упоминается локальный перегрев и очевидно, что аварийная ситуация сложилась исключительно за счет пожаровзрывоопасных свойств самого теризидона.

Теризидон ранее был изучен в стенах Российского химико-технологического университета [19] и продемонстрировал сравнительно высокую теплоту разложения (526 кДж/кг), а также значительную степень разложения при термоллизе. Это указывает на то, что к этому веществу в технологическом процессе стоит относиться крайне внимательно. Также для него были получены кинетические параметры, в частности, энергия активации составила 151 кДж/моль.

С использованием основных соотношений классической теории теплового взрыва при конвективном теплообмене с окружающей средой ранее были проведены расчеты температуры вспышки для целого ряда продуктов химической промышленности, непосредственно не относящихся к взрывчатым [9,16], результаты расчетов хорошо согласуются с экспериментальными данными. Для расчета температуры вспышки теризидона использовались кинетические параметры и теплота разложения, полученные экспериментально. Расчетное значение температуры вспышки составило 128 °С.

В качестве общепринятого критерия термической безопасности объекта в отечественной и в зарубежной практике применяется адиабатический период индукции теплового взрыва [17]. Этот показатель в наибольшей степени характеризует потенциальную термическую опасность, присущую опасному химическому веществу, т. к. в адиабатических условиях на развитие теплового взрыва не влияют ни размеры, ни геометрия объекта. Расчет периода индукции адиабатического теплового взрыва теризидона проводили по известному уравнению для скорости реакции 1-го порядка:

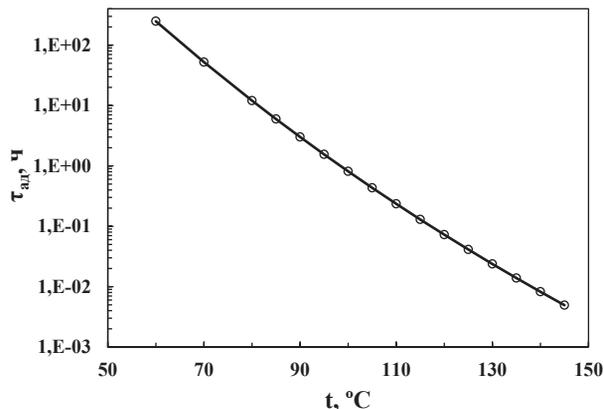
$$\tau_{ad} = \frac{C_p \cdot R \cdot T_0^2}{Q_r \cdot E_A \cdot A} \exp \frac{E_A}{R T_0},$$

где R – универсальная газовая постоянная 0,008314 кДж/(моль·К с); T_0 – начальная температура реакционной смеси, К; C_p – теплоемкость вещества при постоянном давлении, 1,26 кДж/(кг·К); E_A – энергия активации, 151 кДж/моль; Q_r – теплота реакции разложения, 526 кДж/кг; A – предэкспоненциальный множитель, $2 \cdot 10^{16} \text{ с}^{-1}$.

На рисунке 1 представлена зависимость периода индукции теризидона от начальной температуры в диапазоне 60–145 °С.

Проведенный расчет позволяет дать приближенную оценку периода индукции при значениях температуры в реальных условиях. Мы не знаем начальных условий нагрева субстанции в процесс-фильтре, но были сделаны некоторые предположения, на основании которых были построены несколько зависимостей для разных начальных температур. В интервале 85–95 °С период индукции изменяется от 5 до 1 часов.

РИС. 1
ЗАВИСИМОСТЬ ПЕРИОДА ИНДУКЦИИ ТЕРИЗИДОНА (Ч) ОТ НАЧАЛЬНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ (°С) ДЛЯ ТЕРИЗИДОНА



Зная период индукции адиабатического теплового взрыва, можно спрогнозировать рост температуры от времени разложения вещества при различной начальной температуре по уравнению:

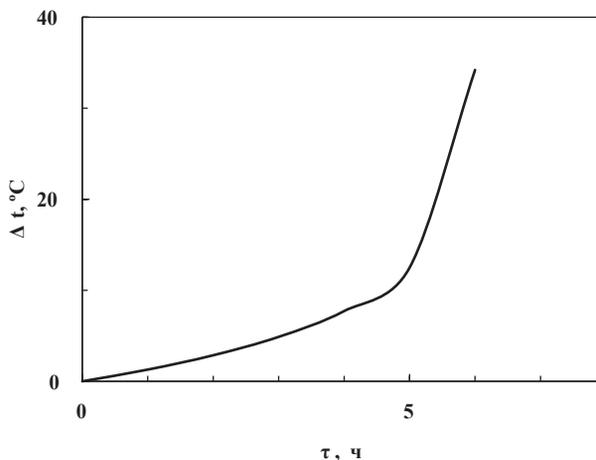
$$T = T_0 + \frac{\theta R T_0^2}{E},$$

где θ – безразмерный разогрев, который рассчитывается по формуле:

$$\theta = \ln \frac{\tau_{ad}}{\tau_{ad} - \tau}.$$

На рисунке 2 приведена зависимость роста температуры от времени разложения вещества для начальной температуры 90 °С. Можно выделить начальный участок медленного роста температуры (индукционный период) и следующий за ним участок стремительного роста температуры. Зависимости в диапазоне 85–95 °С получились практически одинаковыми, вплоть до наложения кривых друг на друга.

РИС. 2
ЗАВИСИМОСТЬ РОСТА ТЕМПЕРАТУРЫ (°С) ОТ ВРЕМЕНИ (Ч) ДЛЯ ТЕРИЗИДОНА ПРИ НАЧАЛЬНОЙ ТЕМПЕРАТУРЕ 90 °С



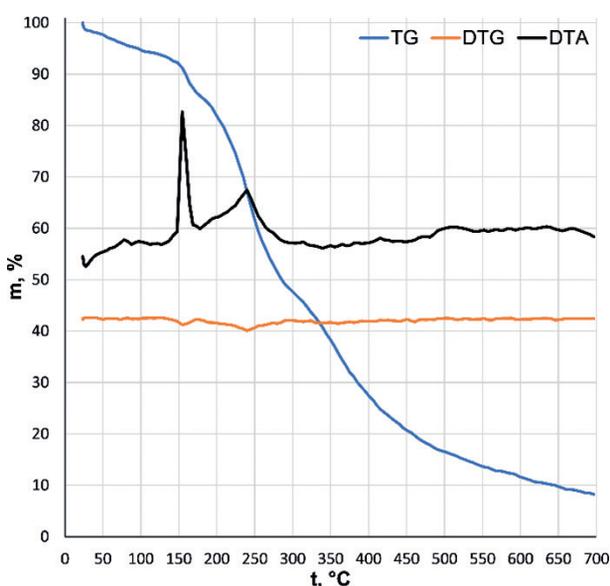
Указанный диапазон начальных температур можно считать критическим, поскольку время достижения стремительного роста температуры в нем составляет 5 ч, что укладывается в пределы среднего времени рабочей смены (8 ч). При большем перегреве гипотетическая авария может произойти значительно быстрее.

В герметично закрытом и вакуумированном процесс-фильтре вполне мог начаться процесс адиабатического разогрева в массе теризидона, обусловленный трудностью теплоотвода от «горячей точки» в реакционной массе [18]. Более того, таких точек могло быть несколько. В результатах экспертизы Ростехнадзор сообщает, что внутри процесс-фильтра возникло избыточное давление. По всей видимости, оно возникло исключительно за счет выделения значительного количества продуктов термического разложения теризидона.

Разгерметизация и взрыв

Способность технологической среды, находящейся внутри аппарата, оставаться стабильной при разных условиях ведения процесса во многом обусловлена термической стабильностью ее компонентов. В данном случае вопрос стоит исключительно о термостабильности теризидона, которая была изучена ранее. Результаты термического анализа теризидона приведены на рис. 3, эксперимент был проведен в рамках диссертационного исследования [19]. Анализ проводили при скорости нагрева 10 °С/мин в инертной атмосфере (азот). Эксперимент демонстрирует двухступенчатый процесс экзотермического разложения с потерей массы до 50 %.

РИС. 3
TG-DTA КРИВЫЕ ТЕРИЗИДОНА, АТМОСФЕРА АЗОТ, СКОРОСТЬ НАГРЕВА 10 °С/мин



«Горячие точки» в герметично закрытом процесс-фильтре, в которых шел процесс разложения теризидона, очевидно, создавали большое количество продуктов

распада, в том числе и газопарообразных. О потенциале образования таких продуктов можно говорить с уверенностью, поскольку изначально твердый теризидон имеет температуру самовоспламенения 425 °С, а ее наличие нельзя объяснить ничем, кроме возникновения при термическом распаде до достижения этой температуры большого объема горючих паров. Образование таких паров, вероятно, значительно повысило давление внутри процесс-фильтра, и затем, когда он был разгерметизирован (возможно, с нарушением культуры технологической безопасности, как отмечено Ростехнадзором), произошел выброс в помещение подсушенного теризидона с последующим взрывом. В результате взрыва был тяжело ранен сотрудник предприятия. Новостные агентства распространили фотографию [20], на которой можно видеть общую картину последствий, которые можно описать, как «значительные разрушения», колонны, ригели и стропила, тем не менее, устояли, как видно на рисунке 4.

РИС. 4
ВИД ЦЕХА ПО ПРОИЗВОДСТВУ ТЕРИЗИДОНА ПОСЛЕ ВЗРЫВА И ПОСЛЕДУЮЩЕГО ПОЖАРА



Если о причинах роста давления в процесс-фильтре можно говорить с достаточной уверенностью, то восстановление картины самого взрыва выглядит, как достаточно сложная задача. Экспериментально определенный нижний концентрационный предел распространения пламени (НКПР) для теризидона составляет всего 62 г/м³ [21], что позволяет отнести его пыль к II классу опасности, взрывоопасные пыли [22]. Выше мы говорили о том, что разрушению процесс-фильтра предшествовало разложение вещества с образованием потенциально горючих паров. После разрушения аппарата в помещение цеха попали и пылевоздушная смесь, и эти пары. Источником зажигания наиболее вероятно послужили искры коротких замыканий, возникших при разрушении аппарата и нарушении изоляции его электрооборудования.

Определенный интерес вызвало предполагаемое избыточное давление, которое создал взрыв для данного помещения. Даже если оставить за рамками подхода вопрос о том, что во взрыве почти наверняка участвовали и газопарообразные продукты, и подойти к расчету избыточного давления, исходя из того, что в инциденте

участвовала только пыль, результат оказался крайне интересен.

Итак, подход к расчету избыточного давления взрыва для пылевоздушных смесей осуществляется с использованием формулы, предлагаемой Сводом правил [23]:

$$\Delta P = \frac{m_n H_T P_0 Z}{V_{св} \rho_n C_p T_0 K_H} \cdot \frac{1}{K_H},$$

где m_n – масса пыли, участвующей в инциденте, кг; H_T – теплота сгорания, Дж/кг; P_0 – начальное давление, кПа; Z – коэффициент участия взвешенной пыли в горении; $V_{св}$ – свободный объем помещения, м³; C_p – теплоемкость воздуха в помещении Дж·кг⁻¹·К⁻¹, T_0 – начальная температура воздуха, К; ρ_n – плотность воздуха до взрыва при начальной температуре воздуха T_0 , кг·м⁻³; K_H – коэффициент, учитывающий негерметичность помещения и неадиабатичность процесса горения.

Первой сложностью для применения данной формулы, стало, разумеется, незнание действительных размеров помещения. Ситуация, впрочем, оказалась достаточно легко преодолимой, поскольку в открытых источниках (конкретно, в социальных сетях) нашлась фотография цеха, сделанная с другого ракурса, очевидно, из стоящего рядом здания одним из рабочих. Даже сравнительно невысокое качество снимка позволило выполнить некоторые предположения, приведенные на рисунке 5.

РИС. 5

ФОТО ЦЕХА ПО ПРОИЗВОДСТВУ ТЕРИЗИДОНА С ДРУГОГО РАКУРСА, ВЫПОЛНЕНО НАЛОЖЕНИЕ РАЗМЕРОВ



По фотографии видно, что взрывом был затронут весь этаж, но значительные разрушения понес только ближайший к наблюдателю блок. Дальние облицовочные плиты этажа целы, разрушено только остекление в окнах. Очевидно, выброс реакционной массы произошел в объеме именно указанного блока и наиболее значительное давление взрыва возникло именно здесь.

Сделаем предположения о геометрических параметрах блока. Здание завода представляет собой типичное решение, выполненное с учетом строительной унификации в области железобетонных конструкций. По снимку можно

составить заключение, что взрыв, по всей видимости, не затронул соседние с цехом помещения, а несущие конструкции цеха, обнаженные взрывом, позволяют узнать размеры. Шаг колонн в такой конструкции составляет 6 метров, а высота потолка порядка 3,5 метров (нет данных о чистовых размерах с учетом набетонки, полового покрытия и т. д.). С учетом этих данных мы можем говорить об объеме помещения порядка 250 м³. Свободный объем помещения составит 0,8 от этого объема, т. е. 200 м³.

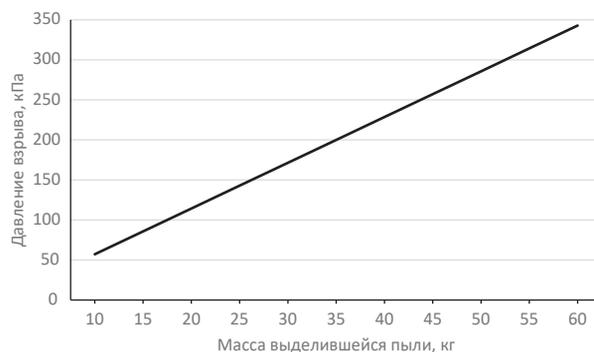
Мы предполагаем, что температура в цехе на момент инцидента составляет 20 °С. Ее влияние на конечный результат, на самом деле, здесь крайне незначительно, поэтому указать ее с некоторой погрешностью не критично. Руководствуясь нормативной документацией [23], мы принимаем начальное давление 101 кПа, теплоемкость воздуха в помещении

1010 Дж·кг⁻¹·К⁻¹, коэффициент, учитывающий негерметичность помещения, равно как и неадиабатичность процесса горения считаем равным 3, а значение коэффициента участия взвешенной пыли в горении принимаем равным 0,5.

Если принять гипотетическую ситуацию, что изначально до взрыва в объем помещения выделилась масса пыли, соответствующая НКПР (для свободного объема в 200 м³ это 12,4 кг), то ситуация уже критическая. Это соответствует давлению в 71 кПа, значению, достаточно близкое к пороговому значению 100 кПа, давлению, при котором нередко происходит полное разрушение здания. Мы предполагаем, что в объем помещения выделилась большая масса взрывоопасной пыли, разумеется, давление взрыва при этом растет по линейному закону, как показано на рисунке 6.

РИС. 6

ЗАВИСИМОСТЬ ДАВЛЕНИЯ ВЗРЫВА ОТ МАССЫ ВЫБРОШЕННОЙ ПЫЛИ В РАССМАТРИВАЕМОЙ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ СИТУАЦИИ



Отдельное неприятие в свете полученных данных вызывает стремление официальных лиц в информационных материалах называть полноценный взрыв, повлекший за собой жертвы и разрушения, «хлопком» [24].

Выводы и рекомендации

1. На основании данных из информационных источников проведен анализ причин аварии на производстве лекарственного препарата теризидона. Установлены условия возникновения разложения вещества на операции сушки и последующего взрыва.
2. Экспериментальные исследования теризидона показали, что данное вещество способно к разложению при нагревании, теплота разложения составляет более 500 кДж/кг. Определены кинетические параметры разложения вещества.
3. Проведенные расчеты в рамках теории теплового вещества показали, что температура вспышки составляет

128 °С. Период индукции адиабатического теплового взрыва в интервале температуры 85–95 °С составляет несколько часов. Увеличение массы вещества сокращает период индукции и снижает температуру начала разложения.

4. Выход сравнительно небольшой массы пыли продукта в объем помещения способен создавать воздушно-пылевую смесь в концентрации, позволяющей достичь разрушительного давления взрыва после возникновения источника зажигания.
5. Для обеспечения безопасности дальнейшего производства данного вещества необходимо внести настоящие результаты исследования в технологический регламент.

Библиография:

1. Martin P.A. The challenge of institutionalised complicity: Researching the pharmaceutical industry in the era of impact and engagement // *Sociol. Health Illn*, 2022, vol. 44, № S1, p. 158–178. DOI: 10.1111/1467-9566.13536
2. Raniyah Z. et al. Gerwith's Theory of Justice Cases in the Pharmaceutical Industry // *J. Pharm. Negat. Results*, 2022, vol. 13, № special issue 03, p. 1623–1627. DOI: 10.47750/pnr.2022.13.S03.249
3. Theodore L., Dupont R.R. *Pharmaceuticals* // *Chemical Process Industries*, CRC Press, 2023, p. 273–284.
4. Nagy S., Asmyatullin R.R. The pharmaceutical industry of the world: investment in R & D in the postcovid period // *Int. Trade Trade Policy*, 2023, vol. 8, № 4, p. 62–70. DOI: 10.21686/2410-7395-2022-3-62-70
5. Barling J. *Brave New Workplace: Designing Productive, Healthy, and Safe Organizations* // Oxford University Press, 2023. DOI: 10.1093/oso/9780190648107.001.0001
6. Wehmeier, G., Mitropetros, K. Fire protection in the chemical industry // *Chem. Eng. Trans.*, 2016, vol. 48, p. 259–264. DOI: 10.3303/CET1648044
7. Zhang H. -D., Zheng X. -P. Characteristics of hazardous chemical accidents in China: A statistical investigation // *J. Loss Prev. Process Ind.*, 2012, vol. 25, № 4, p. 686–693. DOI: 10.1016/j.jip.2012.03.001
8. Li X. et al. Exploring hazardous chemical explosion accidents with association rules and Bayesian networks // *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, 2023, vol. 233, p. 109099. DOI: 10.1016/j.res.2023.109099
9. Васин А. Я. и др. О взрывоопасности некоторых органических соединений с explosиформными группами // *Химическая промышленность сегодня*, 2016, № 12, с. 50–55.
10. Васин А. Я. и др. О механизме термического разложения D-циклосерина и теризидона // *Безопасность труда в промышленности*, 2022, № 1, с. 20–26.
11. Козак Г. Д. О взрывоопасности химических соединений с explosиформными группировками // *Вопросы надежности и безопасности технологических процессов: сб. статей*, М.: РХТУ им. Д.И. Менделеева, 2006, с. 51–75.
12. Васин А. Я. и др. Термический анализ и пожаровзрывоопасность новых лекарственных препаратов // *Химическая промышленность сегодня*, 2018, № 5, с. 48–55.
13. Васин А. Я., Шушпанов А. Н., Гаджиев Г. Г. Пожаровзрывоопасность и термический анализ 5-аминолевулиновой кислоты и её полупродукта синтеза // *Технологии техносферной безопасности*, 2019, т. 4, № 86, с. 13–27.
14. Mohamed M. A., Atty S. A., Banks C. E. Thermal decomposition kinetics of the antiparkinson drug «entacapone» under isothermal and non-isothermal conditions // *J. Therm. Anal. Calorim.*, Springer Netherlands, 2017, vol. 130, № 3, p. 2359–2367. DOI: 10.1007/s10973-017-6664-y
15. Al-Harbi L. M. et al. Thermal Decomposition of Some Cardiovascular Drugs (Telmisartane, Cilazapril and Terazosin HCL) // *Am. J. Anal. Chem.*, 2013, vol. 04, № 07, p. 337–342. DOI: 10.4236/ajac.2013.47042
16. Shushpanov A. N. et al. Ability of Naphthoquinondiazide Photoresists to Exothermic Decomposition // *Occup. Saf. Ind.*, 2020, № 10, p. 90–96. DOI: 10.24000/0409-2961-2020-10-90-96
17. Бенин А. И. Программный комплекс «Тепловой взрыв (TSS)». Научные основы и методология // СПб: Литео, 2017, 672 с.
18. Дубовицкий Ф. И., Барзыкин В. В., Мержанов А. Г. Тепловой взрыв динитроксиэтилнитрамина в условиях чисто конвективной теплопередачи // *Известия АН СССР*, 1960, № 6, с. 1124–1126.
19. До Т. Х. Пожаровзрывоопасность некоторых лекарственных препаратов, способных к интенсивному экзотермическому разложению: дис. кандидата технических наук: 05.26.03. // М.: РХТУ им. Д.И. Менделеева, 2022, 187 с.
20. Ростехнадзор рассказал о причинах взрыва на «Синтезе» в Кургане [Electronic resource] // 45.ru - новости Кургана. 2022. URL: <https://45.ru/text/incidents/2022/12/16/71904797/> (Дата обращения: 27.11.2023).
21. Васин А. Я. и др. Пожаровзрывоопасность D-циклосерина, теризидона и их полупродукта синтеза // *Химическая промышленность сегодня*, 2021, № 1, с. 28–33.
22. Годжелло М. Г. Взрывы промышленных пылей и их предупреждение // *Минкоммухоз*, 1952, 142 с.

References.

1. Martin P.A. The challenge of institutionalised complicity: Researching the pharmaceutical industry in the era of impact and engagement // *Sociol. Health Illn*, 2022, vol. 44, № S1, p. 158–178. DOI: 10.1111/1467-9566.13536
2. Raniyah Z. et al. Gerwith's Theory of Justice Cases in the Pharmaceutical Industry // *J. Pharm. Negat. Results*, 2022, vol. 13, № special issue 03, p. 1623–1627. DOI: 10.47750/pnr.2022.13.S03.249
3. Theodore L., Dupont R. R. *Pharmaceuticals* // *Chemical Process Industries*, CRC Press, 2023, p. 273–284.
4. Nagy S., Asmyatullin R. R. The pharmaceutical industry of the world: investment in R & D in the postcovid period // *Int. Trade Trade Policy*, 2023, vol. 8, № 4, p. 62–70. DOI: 10.21686/2410-7395-2022-3-62-70
5. Barling J. *Brave New Workplace: Designing Productive, Healthy, and Safe Organizations* // Oxford University Press, 2023. DOI: 10.1093/oso/9780190648107.001.0001
6. Wehmeier, G., Mitropetros, K. Fire protection in the chemical industry // *Chem. Eng. Trans.*, 2016, vol. 48, p. 259–264. DOI: 10.3303/CET1648044
7. Zhang H. -D., Zheng X. -P. Characteristics of hazardous chemical accidents in China: A statistical investigation // *J. Loss Prev. Process Ind.*, 2012, vol. 25, № 4, p. 686–693. DOI: 10.1016/j.jip.2012.03.001
8. Li X. et al. Exploring hazardous chemical explosion accidents with association rules and Bayesian networks // *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, 2023, vol. 233, p. 109099. DOI: 10.1016/j.res.2023.109099
9. Vasin A. Ya. et al. On the explosiveness of some organic compounds with explosive groups // *Khimicheskaya promyshlennost' segodnya* [Chemical industry today], 2016, № 12, p. 50–55.
10. Vasin A. Ya. et al. On the mechanism of thermal decomposition of D-cycloserine and terizidone // *Bezopasnost' truda v promyshlennosti* [Occupational safety in industry], 2022, № 1, p. 20–26.
11. Kozak G. D. On the explosiveness of chemical compounds with explosive groupings // *Voprosy nadezhnosti i bezopasnosti tekhnologicheskikh processov: sb. statey* [Issues of reliability and safety of technological processes: collection of articles], М.: MUCTR, 2006, p. 51–75.
12. Vasin A. Ya. et al. Thermal analysis and fire and explosion hazard of new drugs // *Khimicheskaya promyshlennost' segodnya* [Chemical industry today], 2018, № 5, p. 48–55.
13. Vasin A. Ya., Shushpanov A.N., Gadzhiev G.G. Fire and explosion hazard and thermal analysis of 5-aminolevulinic acid and its synthesis intermediate // *Tekhnologii tekhnosfernoy bezopasnosti* [Technosphere security technologies], 2019, т. 4, № 86, p. 13–27.
14. Mohamed M. A., Atty S. A., Banks C.E. Thermal decomposition kinetics of the antiparkinson drug «entacapone» under isothermal and non-isothermal conditions // *J. Therm. Anal. Calorim.*, Springer Netherlands, 2017, vol. 130, № 3, p. 2359–2367. DOI: 10.1007/s10973-017-6664-y
15. Al-Harbi L. M. et al. Thermal Decomposition of Some Cardiovascular Drugs (Telmisartane, Cilazapril and Terazosin HCL) // *Am. J. Anal. Chem.*, 2013, vol. 04, № 07, p. 337–342. DOI: 10.4236/ajac.2013.47042
16. Shushpanov A. N. et al. Ability of Naphthoquinondiazide Photoresists to Exothermic Decomposition // *Occup. Saf. Ind.*, 2020, № 10, p. 90–96. DOI: 10.24000/0409-2961-2020-10-90-96
17. Benin A. I. Program complex «Thermal explosion (TSS)». Scientific foundations and methodology // St. Petersburg: LITER, 2017, 672 p.
18. Dubovitsky F. I., Barzykin V. V., Merzhanov A. G. Thermal explosion of dinitroxiethylnitramine under conditions of purely convective heat transfer // *Izvestiya AN SSSR* [News of the USSR Academy of Sciences], 1960, No. 6, pp. 1124–1126.
19. Do T. H. Fire and explosion hazard of some drugs capable of intensive exothermic decomposition: PhD thesis: 05.26.03. // М.: MUCTR, 2022, 187 p.
20. Rostekhnadzor told about the causes of the explosion at the «Synthesis» in Kurgan [Electronic resource] // 45.ru - Kurgan news. 2022. URL: <https://45.ru/text/incidents/2022/12/16/71904797/> (Accessed: 27.11.2023).
21. Vasin A. Ya. et al. Fire and explosion hazard of D-cycloserine, terizidone and their synthesis intermediates // *Khimicheskaya promyshlennost' segodnya* [Chemical industry today], 2021, № 1, p. 28–33.
22. Godzhello M.G. *Industrial dust explosions and their prevention* // *Mincommunhoz*, 1952, 142 p.

23. Свод правил СП 12.13130.2009 Определение категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности, 2009.

24. Следственными органами в связи с инцидентом, произошедшим на территории производственного завода, возбуждено уголовное дело – Следственный комитет Российской Федерации по Курганской области [Electronic resource]. URL: <https://kurgan.sledcom.ru/news/item/1679521/> (Дата обращения: 27.11.2023).

Краткая информация об авторах:

Шушпанов Александр Николаевич*

Российский химико-технологический университет имени Д. И. Менделеева, к.т.н., доцент.
Адрес: 125047, Москва А-47, Миусская пл., 9.
E-mail: shushpanov.a.n@muctr.ru

Васин Алексей Яковлевич

Российский химико-технологический университет имени Д. И. Менделеева, д.т.н., профессор.
Адрес: 125047, Москва А-47, Миусская пл., 9.
E-mail: vasin.a.ya@muctr.ru

Райкова Влада Мирославовна

Российский химико-технологический университет имени Д. И. Менделеева, к.т.н., доцент.
Адрес: 125047, Москва А-47, Миусская пл., 9.
E-mail: raikova.v.m@muctr.ru

23. Code of Rules SP 12.13130.2009 Definition of categories of premises, buildings and outdoor installations for explosion and fire hazard, 2009.

24. The investigative authorities have opened a criminal case in connection with the incident that occurred on the territory of the production plant – Investigative Committee of the Russian Federation for the Kurgan Region [Electronic resource]. URL: <https://kurgan.sledcom.ru/news/item/1679521/> (Accessed: 27.11.2023).

Autors

Shushpanov Alexander Nikolaevich*

Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, PhD, Associate Professor.
Address: 125047, Moscow A-47, Miuskaya pl., 9.
E-mail: shushpanov.a.n@muctr.ru

Vasin Alexey Yakovlevich

Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, DSc, Professor.
Address: 125047, Moscow A-47, Miuskaya pl., 9.
E-mail: vasin.a.ya@muctr.ru

Raikova Vlada Miroslavovna

Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, PhD, Associate Professor.
Address: 125047, Moscow A-47, Miuskaya pl., 9.
E-mail: raikova.v.m@muctr.ru