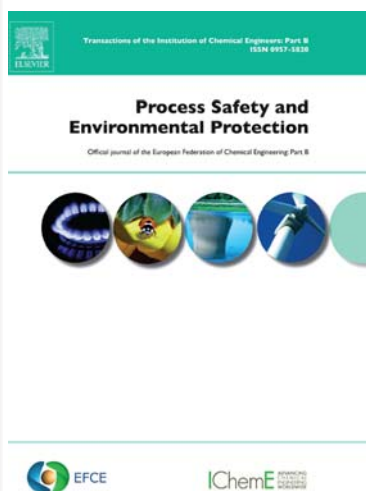


## РЕФЕРАТИВНЫЙ ОБЗОР ЗАРУБЕЖНЫХ ИЗДАНИЙ



### Process Safety and Environmental Protection 145 (2021): 150–156

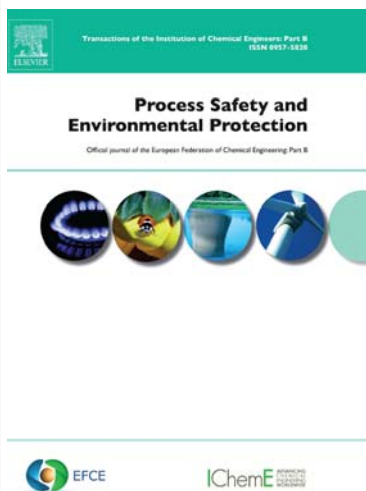
#### ОБЗОР СТАНДАРТОВ И РЕГЛАМЕНТОВ, КАСАЮЩИХСЯ ИСПЫТАНИЙ НА ОГНЕСТОЙКОСТЬ СОСУДОВ ПОД ДАВЛЕНИЕМ

И. Брэдли (Германия), Г.Э. Скарпони (Италия), Ф. Отремба (Германия), А.М. Бирк (Канада)

Воздействие пожара на сосуды для хранения и транспортировки опасных материалов (включая сжиженные газы под давлением) может привести к взрывам расширяющихся паров вскипающей жидкости (BLEVE) и другим подобным инцидентам, несущим серьезные социальные и экономические последствия. Для снижения подобной опасности в большинстве стран действуют многочисленные правила, строительные нормы и руководства, касающиеся проектирования, эксплуатации и технического обслуживания сосудов и систем тепловой защиты. Тем не менее, несмотря на такие правила, до сих пор не существует международной процедуры испытаний на огнестойкость сосудов высокого давления и сопутствующих систем тепловой защиты, которая отвечала бы ряду нормативных требований. В этой статье рассматриваются некоторые правила, действующие в западном мире, а также происхождение этих правил на основе крупномасштабных и среднемасштабных испытаний, проведенных на сегодняшний день. В статье также приведены условия, обнаруженные в ходе этих испытаний, для составления набора рекомендаций, которые можно использовать для стандартного метода испытаний. Эти рекомендации предлагаются в качестве репрезентативных для вероятного сценария пожара пролива.

Ключевые слова: *сжиженный нефтяной газ, сосуд под давлением, испытание, взрыв расширяющихся паров вскипающей жидкости, пожар*

## Process Safety and Environmental Protection 145 (2021): 203–210



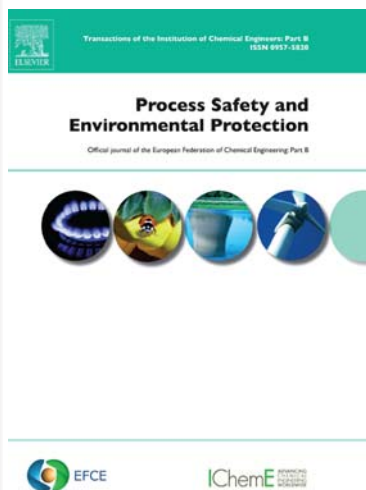
### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МЕЛКОМАСШТАБНЫХ ПОЖАРОВ ПРОЛИВОВ $CS_2$ (СЕРОУГЛЕРОД)

Саумитра Мишра, Пушпендра Кумар Вишвакарма, Анкит Шарма, Кирти Бхушан Мишра (Индия)

В этой работе представлены характеристики пожаров проливов  $CS_2$ , такие как массовая скорость горения, протяженность пламени, температура пламени, концентрация продуктов сгорания ( $CO_2$  и  $SO_2$ ), измеренные для двух проливов разного диаметра ( $d = 0,05$  м и  $d = 0,1$  м) в лабораторной испытательной установке с помощью хорошо откалиброванных приборов. Измерения показывают, что массовая скорость горения при пожарах проливов  $CS_2$  ( $d \leq 0,1$  м) определяется главным образом проводимостью и конвекцией, как и в случаях с углеводородом, и уменьшается с увеличением диаметра пролива. При  $d = 0,05$  м массовая скорость горения при пожаре пролива  $CS_2$  в 1,5 раза выше, чем у бензина. Из-за конвекции при  $d = 0,1$  м массовая скорость горения при пожаре пролива  $CS_2$  была такой же, как у бензина, но в 1,5 раза выше, чем у дизельного топлива и этанола. В зависимости от фона пламя  $CS_2$  невидимое (при дневном свете) и беловато-голубое (в темной среде) и имеет меньший размер с незначительным тепловым излучением по сравнению с дизельным топливом, бензином и этанолом. Измерения выбросов показали, что даже при очень кратковременном (60–120 с) горении пролива  $CS_2$  образуется более высокая концентрация ( $> 200$  частиц на миллион)  $SO_2$ , что является непосредственной опасностью для жизни и здоровья согласно предписанию Национального института безопасности и гигиены труда. Обнаружена корреляция между диаметром пролива, временем горения и концентрацией  $SO_2$ , которая может быть использована для оценки пожарных рисков, связанных с переработкой, хранением и транспортировкой  $CS_2$ .

Ключевые слова: *сероуглерод, пожар пролива, массовая скорость горения, тепловое излучение, воздействие  $SO_2$*

## Process Safety and Environmental Protection 145 (2021): 303–311



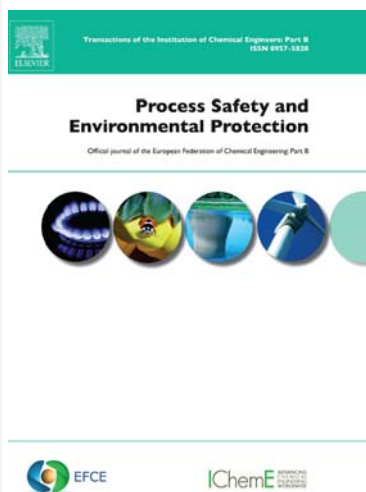
### ЭФФЕКТ ВЗРЫВА ПАРОЖИДКОСТНОГО ДВУХФАЗНОГО Н-ГЕПТАНА ПРИ РАЗЛИЧНЫХ НАЧАЛЬНЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ

Ифань Сун, Ци Чжан (Китай)

С помощью численного метода были проанализированы характеристики взрыва парожидкостного двухфазного н-гептана внутри и снаружи (граница представляет собой соединение предварительно смешанного топлива и воздуха) исходной зоны предварительного смешивания, а также влияние концентрации и начальной температуры на характер развития взрыва. Избыточное давление взрыва увеличивается вместе с расстоянием в определенном диапазоне за пределами зоны предварительного смешивания вместе с изменением концентраций предварительно смешанного парожидкостного двухфазного н-гептана. Пиковое избыточное давление обогащенного топлива больше, чем у обедненного и стехиометрического топлива. Взрыв при высоком содержании топлива за пределами зоны предварительного смешивания приводит к так называемому «вторичному взрыву», а избыточное давление взрыва имеет два пика с одинаковыми значениями. Начальная температура оказывает существенное влияние на протяженность пламени (характеризуемую скоростью горения) взрыва двухфазного н-гептана. Протяженность пламени взрыва обедненного топлива уменьшается с увеличением начальной температуры. При начальной температуре 253 К протяженность пламени в 4,15 раза превышает зону предварительного смешивания. При использовании стехиометрического и обогащенного топлива протяженность пламени увеличивается вместе с начальной температурой в диапазоне 273–333 К, а при 333 К протяженность пламени в 5,26 и 5,99 раза превышает предварительно смешанную зону соответственно.

**Ключевые слова:** *парожидкостный двухфазный н-гептан, начальная температура, диффузия капель, протяженность пламени*

## Process Safety and Environmental Protection 145 (2021): 378–387



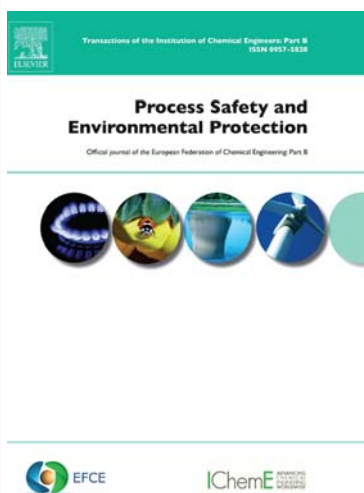
### ПОДАВЛЕНИЕ ВЗРЫВОВ ВОДОРОДНО-ВОЗДУШНЫХ СМЕСЕЙ ГИДРОФТОРУГЛЕРОДАМИ

Менгди Гао, Миншу Би, Лили Е, Яньчао Ли, Хайпэн Цзян, Мингуй Ян, Кайкай Янь, Вэй Гао (Китай)

В данном исследовании экспериментально и численно изучается эффективность подавления взрывов предварительно смешанных водородно-воздушных смесей фторированными соединениями  $\text{CHF}_3$  и  $\text{C}_2\text{HF}_5$ . Результаты показывают, что для стехиометрических и обогащенных водородно-воздушных смесей такие гидрофторуглероды, как  $\text{CHF}_3$  и  $\text{C}_2\text{HF}_5$  могут эффективно снижать коэффициент теплового расширения и увеличивать толщину пламени, а затем уменьшать влияние гидродинамической неустойчивости на ускорение пламени. Скорость ламинарного горения, максимальное давление взрыва, максимальная скорость повышения давления и абсолютное значение импульса давления уменьшаются с увеличением концентрации средства взрывоподавления при различных эквивалентных соотношениях. Максимальное давление взрыва для стехиометрического пламени снижается на 11,54 % при добавлении 2 %  $\text{CHF}_3$  и быстро снижается на 40,39 % при добавлении 2 %  $\text{C}_2\text{HF}_5$ . Смеси, богатые водородом, не могут воспламениться, когда содержание  $\text{C}_2\text{HF}_5$  достигает 10 %. Численное моделирование подтвердило, что как  $\text{CHF}_3$ , так и  $\text{C}_2\text{HF}_5$  могут эффективно снижать концентрацию активных радикалов с порядком уменьшения  $\text{H} > \text{OH} > \text{O}$ .  $\text{C}_2\text{HF}_5$  более эффективен при подавлении взрывов, чем  $\text{CHF}_3$ , за счет превращения большего количества атомов H в HF с образованием элементарных реакций  $\text{CHF}_2 + \text{H} \rightleftharpoons \text{CHF} + \text{HF}$ ,  $\text{CF}_2\cdot\text{O} + \text{H} \rightleftharpoons \text{CF}\cdot\text{O} + \text{HF}$  и  $\text{CF}_2 + \text{H} = \text{CF} + \text{HF}$ .

Ключевые слова: *гидрофторуглероды, подавление взрыва, морфология пламени, давление взрыва, скорость ламинарного горения*

## Process Safety and Environmental Protection 145 (2021): 425–434

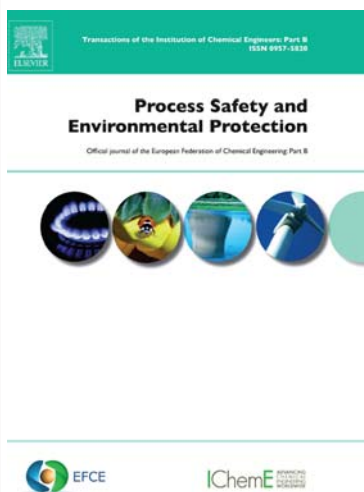


### **ДИНАМИЧЕСКАЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ ОЦЕНКА РИСКА ПОЖАРА НА СКЛАДЕ ОПАСНЫХ ХИМИЧЕСКИХ ВЕЩЕСТВ НА ОСНОВЕ МЕТОДА ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО РАЗРЯДА И УСОВЕРШЕНСТВОВАННОГО МЕТОДА ОПОРНЫХ ВЕКТОРОВ**

Ян Ли, Хао Ван, Кэ Бай, Симэн Чен (Китай)

В Китае часто происходят химические катастрофы из-за неправильного управления рисками безопасности технологических процессов на складах. Динамическая оценка рисков в режиме реального времени позволяет выявить текущие технологические риски и снизить вероятность аварии. Метод опорных векторов (SVM) – это эффективный динамический метод оценки рисков. С целью улучшения динамической оценки рисков методом SVM был использован метод электростатического разряда (ESDA) для оптимизации параметров модели. Данный метод обладает большими возможностями для оптимизации. Было построено улучшенное смешанное ядро (непараметрическое смешанное ядро), которое представляло собой линейную комбинацию новой радиальной базисной функции и полиномиального ядра. Также была предложена интеллектуальная модель оценки динамического риска пожара на складе на основе метода ESDA и улучшенного метода SVM (ESDA-NPSVM). Экспериментальные результаты показали, что предложенная модель обладает отличными характеристиками для динамической оценки риска пожаров на складах опасных химических веществ класса А, что позволяет предположить, что она полезна для практического применения.

Ключевые слова: *технологическая безопасность, оценка риска, алгоритм электростатического разряда, непараметрическое смешанное ядро, метод опорных векторов, склад опасных химических веществ*



## Process Safety and Environmental Protection 146 (2021): 1–8

### ОЦЕНКА И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ БЕЗОПАСНОГО РАССТОЯНИЯ ПРИ АВАРИИ С РАЗЛИВОМ ЖИДКОГО ВОДОРОДА

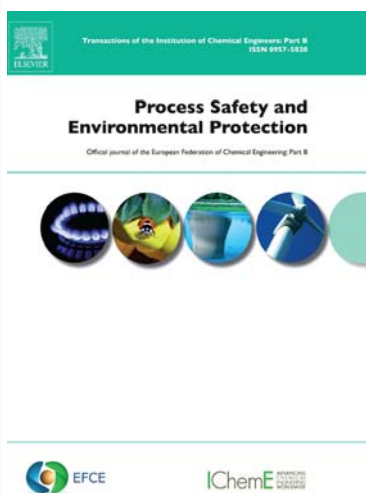
Юаньянь Лю, Чжань Лю, Цзяньцзянь Вэй, Юци Лань, Шеньинь Ян, Тао Цзинь (Китай)

При хранении, транспортировке и применении жидкого водорода крайне важна безопасность. Облако легковоспламеняющихся паров, образующееся при разливе жидкого водорода, представляет серьезную угрозу для жизни и имущества, поэтому крайне важно определить безопасное расстояние (максимальное расстояние по ветру от облака легковоспламеняющихся паров до источника разлива) для оценки риска и сохранения безопасности. В работе выполнено трехмерное CFD-моделирование, прогнозирующее разлив жидкого водорода в открытой среде, а также проанализированы вариационные характеристики безопасного расстояния с различными параметрами. Перенос ветра, атмосферная турбулентность и поперечная сила между облаком и воздухом усиливаются при увеличении скорости ветра, и, следовательно, безопасное расстояние увеличивается в первой фазе, а затем уменьшается со скоростью ветра. Безопасное расстояние прямо связано со скоростью разлива жидкости. Затем устанавливается корреляция между безопасным расстоянием, с одной стороны, и скоростью ветра и интенсивностью разлива, с другой, для оперативного управления в случае аварии с разливом жидкого водорода.

Ключевые слова: *безопасное расстояние, разлив жидкого водорода, скорость ветра, скорость разлива*



## Process Safety and Environmental Protection 146 (2021): 95–107



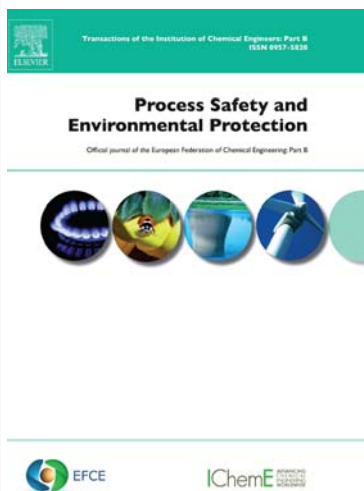
### ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ПРЕПЯТСТВИЙ И МОДЕЛИ ТУРБУЛЕНТНОСТИ НА РАСПРОСТРАНЕНИЕ ПЛАМЕНИ МЕТАНА С ПОМОЩЬЮ ДВУХМЕРНОЙ CFD-МОДЕЛИ

Т. Нгуен, К. Стребингер, Г.Э. Богин-младший, Дж. Брюн (США)

Образование взрывоопасных газовых зон, состоящих из легковоспламеняющихся паров, газов или пыли, представляет собой угрозу безопасности во многих отраслях промышленности. Во многих случаях взрывы могут происходить в замкнутых пространствах с препятствиями на пути распространения пламени. Изучая влияние формы препятствия, модели турбулентности и местоположения искры на характер распространения пламени и его турбулентность, было достигнуто более полное понимание взаимодействия пламени и гидродинамики. Были протестированы модели Навье-Стокса, усредненные по Рейнольдсу, чтобы определить, могут ли эти упрощенные модели турбулентности отражать динамику пламени и скорости его распространения, используя меньшее количество вычислительных ресурсов по сравнению с моделью турбулентности с высокой точностью моделирования больших вихрей. Результаты показали, что по квадратным препятствиям наблюдается более быстрое распространение пламени по сравнению с шестиугольными и круглыми препятствиями. Средняя скорость распространения пламени по квадратному препятствию была на 26 % выше, чем по круглому, а по шестиугольному – на 16 % выше, чем по круглому, при использовании модели  $k-\omega$ . Результаты моделирования показывают, что изменение местоположения искры всего на 10 % от диаметра препятствия может привести к различию в распространении пламени. Выводы о точности модели турбулентности и времени вычислений, а также сравнение формы могут быть применены в будущем при моделировании больших систем, предоставляя важную информацию для планирования безопасности и предотвращения взрывов.

Ключевые слова: *препятствие, взрыв метановоздушной смеси, турбулентность, пламя, CFD-моделирование*

## Process Safety and Environmental Protection 146 (2021): 499–514



### ОБЗОР ПРОИСШЕСТВИЙ, СВЯЗАННЫХ С ВОСПЛАМЕНЯЕМОСТЬЮ АЭРОЗОЛЕЙ И ВЗРЫВАМИ, А ТАКЖЕ СТАНДАРТОВ, ИССЛЕДОВАНИЙ И АНАЛИЗА РИСКОВ

Шуай Юань (США), Чэньси Цзи (США), Гаитян Хань (Китай), Юэ Сун (США), Чад В. Машуга (США)

В перерабатывающей промышленности огнеопасным и взрывоопасным свойствам аэрозолей уделяется меньше внимания по сравнению с газами и пылевыми облаками. Многочисленные происшествия в различных отраслях промышленности выявили явные различия между опасностями жидких нефтепродуктов, хранимых в резервуарах, по сравнению с опасностями аэрозолей. Температура вспышки, как критерий воспламеняемости жидкости, становится несущественной, когда жидкость находится в аэрозольной форме. Необходимо практическое обсуждение критериев оценки опасности воспламеняемости аэрозолей. В отличие от типовых измерений для газовых и пылевых облаков, стандартный метод испытаний на воспламеняемость аэрозолей, такой как ASTM D3065-01, не получил широкого распространения из-за отсутствия количественной оценки. Поэтому важно установить количественные процедуры испытаний воспламеняемости аэрозоля и взрыва аэрозоля. В данной работе всесторонне анализируются методологии получения аэрозолей, как лабораторные, так и крупномасштабные эксперименты по горению и взрыву аэрозолей, а также оценки риска воспламеняемости жидкостей. Кроме того, здесь рассматриваются важные, но малоизученные области, такие как переход от дефлаграции аэрозоля к детонации, а также предлагается систематическая стратегия для исследования сложного механизма и последствий горения и взрывов аэрозолей.

Ключевые слова: *проверка аэрозоля, воспламеняемость, взрыв аэрозоля, образование аэрозоля, анализ риска воспламеняемости аэрозоля*

**Материал (поступил в редакцию 22.07.2022 г.)  
подготовили:**

Ю.В. МЕЛЬНИКОВА, инж.;  
Н.В. САЙГИНА, ст. науч. сотр.;  
Е.Е. АРХИПОВА, ст. науч. сотр.;  
Е.О. СМИРНОВА, науч. сотр.  
(ФГБУ ВНИИПО МЧС России)