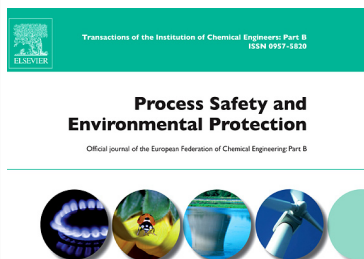


ОБЗОР НАУЧНОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

EDN: <https://elibrary.ru/suovck>

РЕФЕРАТИВНЫЙ ОБЗОР ЖУРНАЛА PROCESS SAFETY AND ENVIRONMENTAL PROTECTION, № 163–165 (2022)



IChemE

**Vol. 163 (2022):
321-329**

ИССЛЕДОВАНИЕ РИСКА ВЫДЕЛЕНИЯ ВОДОРОДА И МЕТОДОВ ПОДАВЛЕНИЯ ОБРАЗОВАНИЯ ПЫЛИ ИЗ ОТХОДОВ СПЛАВА Mg–Al/Mg–Zn ВО ВЛАЖНОМ ПЫЛЕСБОРНИКЕ

Ююань Чжан, Кайли Сюй, Цзи Гэ, Бо Лю (Китай)

При производстве изделий из магниевых сплавов пыль, образующаяся в процессе производства, может вступать в реакцию с водой, что влечет за собой выделение водорода и может привести к пожарам или взрывам. Во-первых, с точки зрения управления безопасностью, в данной статье последовательно изучается влияние разницы в количестве выделяемого водорода из частиц пыли, образующихся в результате использования сплава на основе магния (Mg–Al/Mg–Zn), на риск использования влажного пылесборника в различных условиях окружающей среды. В рамках исследования

была построена двухэтапная модель выделения водорода. Во-вторых, с технической точки зрения для подавления реакции выделения водорода в магниевых сплавах предлагается использовать экологически чистый и экономически выгодный фосфат натрия. Морфология частиц пыли магниевых сплавов до и после реакции была исследована с помощью сканирующей электронной микроскопии, рентгеновской дифракции и моделирования химической динамики, после чего были определены соответствующие механизмы реакции. Результаты исследования могут стать эффективным техническим руководством по предотвращению взрывов водорода на предприятиях по производству магниевых сплавов.

Ключевые слова: частицы пыли из сплава Mg–Al; выделение водорода; частицы пыли из сплава Mg–Zn; фаза сплава; взрыв водорода



Process Safety and Environmental Protection

Official journal of the European Federation of Chemical Engineering Part B



**Vol. 163 (2022):
368-383**

ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ВОДОРОДНО-ВОЗДУШНОГО И АЦЕТИЛЕНОВО- ВОЗДУШНОГО ПЛАМЕНИ ЧЕРЕЗ ПОРИСТЫЕ СРЕДЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИНФРАКРАСНОЙ ВИЗУАЛИЗАЦИИ

Г.Ю. Бивол, С.В. Головастов, В.В. Голуб (Россия)

Одной из современных проблем энергетической безопасности является обеспечение взрывобезопасности при работе с горючими газами. Для этого используются различные методы, такие как активные химические ингибиторы и пассивное подавление горения. Среди пассивных методов подавления горения преобладает использование различных пористых материалов. Данное исследование было посвящено экспериментальному изучению распространения воздушно-водородного и воздушно-ацетиленового пламени через пенополиуретан и пустой канал.

Использование высокоскоростной инфракрасной камеры позволило визуализировать распространение пламени внутри пористого материала. Были использованы два типа диагностических каналов с размерами диагностической секции 16×20 мм и 40×20 мм. Длина пенополиуретана составляла 120 мм. В водородно-воздушных смесях в образцах с полиуретановой пеной плотностью 10 пор на дюйм (PPI) скорость распространения пламени была выше, чем в пустом канале. В смеси с коэффициентом избытка воздуха $ER = 0,3$ пламя гасло, но в смесях с $ER = 0,4$ и $ER = 0,5$ средняя скорость распространения пламени была выше, чем в пустом канале. В смесях ацетилена и воздуха скорость пламени в пенополиуретане обычно была ниже и достигала скорости пламени в пустом канале только при $ER = 0,8$ и 10 PPI. На основе полученных экспериментальных данных были рассчитаны критические числа Пекле, которые позволяли пламени распространяться через пористые материалы. Критические числа Пекле составили 23-24 для воздушно-водородной смеси и 37-38 для воздушно-ацетиленовой смеси. Канал был открыт вблизи точки воспламенения, что позволило уменьшить зависимость полученных результатов от длины канала. Информация, полученная в ходе этой работы, может быть использована для совершенствования средств обеспечения взрывобезопасности, в том числе в области ядерной энергетики и транспорта, использующего водород.

Ключевые слова: водород; ацетилен; пористый материал; тушение пламени; взрывобезопасность; инфракрасная визуализация



**Process Safety and
Environmental Protection**
Official journal of the European Federation of Chemical Engineering Part B



ICHEME
ADVANCING
SAFETY AND
SUSTAINABILITY

**Vol. 164 (2022):
50-56**

АНАЛИЗ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ДИНАМИКИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЛАМИНАРНОГО НЕУСТОЙЧИВОГО ПЛАМЕНИ В ПРЕДВАРИТЕЛЬНО ПЕРЕМЕШАННОЙ ВОДОРОДНО-ВОЗДУШНОЙ СМЕСИ

Эльянов А.Е., Гавриков А.И., Голуб В.В., Микушкин А.Ю., Володин В.В. (Россия)

Оценка рисков и последствий взрывов газов основывается на данных о потенциальных скоростях горения и импульсах давления. Указанные вопросы должны учитываться при проектировании любой инфраструктуры, связанной с использованием или производством водорода, а также объектов, где возможны внезапные выбросы газа, ввиду высокой воспламеняемости и взрывоопасности водорода. В работе представлены результаты экспериментального и теоретического исследования неопределенности динамики распространения ламинарного неустойчивого фронта пламени

в предварительно перемешанной водородно-воздушной смеси и выполнен соответствующий статистический анализ. Основной целью работы являлось количественное определение возможных скоростей распространения фронта пламени водородно-воздушной смеси. Эксперименты проводились с многократным повторением (до 30 раз) для смесей с содержанием водорода от 10 до 60 % (об.). На основе полученных данных оценен разброс значений в зависимости от концентрации водорода в смеси. Ряд подтверждающих результатов был получен с использованием численного интегрирования уравнения Сивашинского, описывающего распространение пламени. Полученные результаты могут быть использованы при актуализации правил, руководств, нормативных документов и стандартов по водородной безопасности.

Ключевые слова: водородное пламя; неопределенность скорости пламени; неустойчивое сферическое пламя; уравнение Сивашинского; сферически расширяющееся пламя



**Process Safety and
Environmental Protection**

Official journal of the European Federation of Chemical Engineering Part B



ICHEME

**Vol. 164 (2022):
129-141**

ВЛИЯНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА БЛОКИРОВКИ ОТВЕРСТИЯ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ВЗРЫВА МЕТАНОВОЗДУШНОЙ СМЕСИ, ПОДАВЛЯЕМОГО ПОРИСТЫМИ СРЕДАМИ

Ван Цзянь, Лю Гуйлун, Чжэн Лиган, Пань Жункунь, Лю Чан, Ван Янь, Фань Цзыяо,
Чжао Юнсянь (Китай)

Взрыв газа является распространенной серьезной аварией в условиях подземных угольных шахт и на промышленных производствах. Пористые среды благодаря своей ячеистой структуре оказывают существенное влияние на подавление распространения давления и фронта пламени, что позволяет эффективно снижать взрывную опасность. В настоящем исследовании экспериментально изучено и сравнительно проанализировано взрывоподавляющее действие пенометаллов Fe-Ni и Cu с различными размерами пор (20 и 40 пор на дюйм (PPI)) при коэффициентах блокировки отверстия

(КБО), равных 0,36; 0,64 и 0,84 соответственно. Результаты показывают, что пена Fe-Ni с 20 PPI гасит пламя только при КБО = 0,84, что свидетельствует о том, что с увеличением коэффициента блокировки эффективность подавления взрыва возрастает. Однако при КБО = 0,64 пористая среда обеспечивает повышенную эффективность подавления пламени и минимальное время тушения. Кроме того, при относительно большой площади вентиляционного отверстия препятствующее воздействие пористой среды преобладает над ее способностью к поглощению давления, что приводит к повышению давления в зоне взрыва. Наименьшая степень ослабления пикового избыточного давления (-25,9 %) зафиксирована для пены Fe-Ni с 40 PPI при КБО = 0,36. В целом, коэффициент блокировки отверстия положительно коррелирует со способностью к снижению давления. Среди всех рассмотренных в исследовании случаев пена Cu с 20 PPI демонстрирует наибольшие степени ослабления пикового избыточного давления выше и ниже по потоку при трёх значениях КБО, составляющих 0,86 % и 6,33 % соответственно.

Ключевые слова: взрыв при вентилируемом объеме; искаженные тюльпанообразные формы пламени; тушение; избыточное давление; подавление взрыва



**Process Safety and
Environmental Protection**
Official journal of the European Federation of Chemical Engineering Part B



ICHEME
ADVANCING
INDUSTRIAL
ENGINEERING

**Vol. 164 (2022):
271-282**

ЧИСЛЕННАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ РАСЧЕТА МИНИМАЛЬНОЙ ЭНЕРГИИ ЗАЖИГАНИЯ ОБЛАКОВ ЧИСТОЙ И СМЕСЕВОЙ ПЫЛИ

Тэнфэй Чэнь, Йо Ван Канэгем, Ян Дегрэв, Филип Верплэтсен, Ян Бергманс,
Маартен Ваниершот (Бельгия)

Разработана численная модель для расчета минимальной энергии зажигания (МЭЗ) облаков чистой и смесевой пыли с учетом влияния распределения частиц по размерам. Исходное распределение размеров на основе числа частиц приближается к медианным размерам (среднемассовое число d_{50}) поддиапазонов, полученных путем разбиения исходного диапазона распределения. МЭЗ рассчитана для 5 видов чистой пыли, 2 смесей горючих пылей и 2 смесей горючей и инертной пыли. Для облаков чистой пыли с увеличением числа поддиапазонов и, следовательно, коли-

чества значений d_{50} , характер изменения МЭЗ в зависимости от концентрации пыли (MIE(conc)) постепенно трансформируется из формы «V» в форму «U» или «ванны», сопровождаясь ростом концентрации, при которой достигается минимальное значение МЭЗ облака пыли (минимальное значение MIE(conc)). Кроме того, расчетный параметр МЭЗ демонстрирует флуктуации при меньшем числе значений d_{50} , но постепенно стабилизируется по мере дальнейшего увеличения их количества. Рассчитанные зависимости МЭЗ качественно согласуются с экспериментальными данными. Однако вследствие неопределенностей, связанных с формированием облака пыли и разрядом искры в экспериментальных испытаниях, различий в определении d_{50} в разных исследованиях, а также высокой степени идеализации численной модели, наблюдаются расхождения между абсолютными экспериментальными и расчетными значениями МЭЗ.

Ключевые слова: минимальная энергия зажигания; облака пыли; смеси пылей; теоретическая модель



**Process Safety and
Environmental Protection**

Official journal of the European Federation of Chemical Engineering Part B



IChemE

**Vol. 164 (2022):
629-638**

КОМБИНИРОВАННЫЙ ПОДХОД К ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОМУ ОБНАРУЖЕНИЮ И ПРОГНОЗИРОВАНИЮ ПОЖАРОВ В РЕАЛЬНОМ ВРЕМЕНИ НА ОСНОВЕ МЕТОДОВ КОМ- ПЬЮТЕРНОГО ЗРЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КАМЕР

Пин Хуан, Мин Чэнь, Кэсинь Чэнь, Хао Чжан, Лунсин Юй, Чуньсян Лю (Китай)

Пожар является одной из наиболее распространенных опасностей в промышленности. До настоящего времени большинство систем пожарной сигнализации обладали весьма ограниченной функциональностью. Как правило, срабатывает лишь простой сигнал тревоги без предоставления какой-либо конкретной информации о характере пожара, не говоря уже о прогнозировании его развития. В настоящей работе рассматривается комбинированный подход к интеллектуальному обнаружению и прогнозированию пожаров в реальном времени с использованием камер, основанный на вы-

явлении и прогнозировании характеристик развития пожара. Для описания динамики пожара используются три параметра: положение фронта распространения пламени, скорость распространения пламени и ширина пламени. Созданы две нейронные сети: RCNN – сверточная нейронная сеть – для извлечения характеристик пожара посредством его обнаружения и ResNet – остаточная нейронная сеть – для прогнозирования развития пожара. Путем проведения двенадцати серий экспериментов с кабельными пожарами в различных условиях развития возгорания были оценены точности извлечения параметров пожара и их прогнозирования. Результаты показали, что средняя относительная погрешность (СОП) извлечения с использованием RCNN для трех указанных параметров составляет приблизительно 4–13 %, 6–20 % и 11–37 % соответственно. В то же время средняя относительная погрешность прогнозирования с использованием ResNet для трех параметров составляет около 4–13 %, 11–33 % и 12–48 % соответственно. Полученные результаты подтверждают, что предложенный подход может служить практически реализуемым решением для количественной оценки развития пожара и повышения уровня промышленной пожарной безопасности, в частности, для прогнозирования тенденций развития пожара, оценки тяжести аварий, расчета потерь от аварий в реальном времени, а также для выработки рекомендаций по тактике тушения пожара и проведению спасательных работ.

Ключевые слова: промышленная пожарная безопасность; обнаружение пожара; прогнозирование пожара; анализ пожара; искусственный интеллект



Transactions of the Institution of Chemical Engineers Part B
ISSN 0957-5820

**Process Safety and
Environmental Protection**
Official journal of the European Federation of Chemical Engineering Part B



IChemE
INSTITUTION OF CHEMICAL ENGINEERS

**Vol. 165 (2022):
77-92**

ИНДЕКС ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ ОТ ПОЖАРОВ И ВЗРЫВОВ (FEEL): НОВЫЙ ПОДХОД К КОЛИЧЕСТВЕННОЙ ОЦЕНКЕ ЭКОНОМИЧЕСКОГО УЩЕРБА ОТ АВАРИЙ НА ОБЪЕКТАХ ХРАНЕНИЯ УГЛЕВОДОРОДОВ

Хулио Ариэль Дуэньяс Сантана (Италия, Куба), Янелис Куба Арана (Куба),
Орельвис Гонсалес Гомес (Куба), Даниэль Фурка (Словакия),
Самуэль Фурка (Словакия), Хесус Луис Ороско (Куба),
Альмеринда Ди Бенедетто (Италия), Данило Руссо (Италия),
Мария Портарапилло (Италия), Хонатан Серрано Феблес (Куба)

Экономика является сферой, наиболее подверженной негативному влиянию пожаров и взрывов. Подобные катастрофы приводят к прямым экономическим убыткам, что влечет за собой отток капитала на восстановление пострадавших объектов. Кроме того, имеют место косвенные экономические потери, такие как перерывы в хозяйственной деятельности предприятий и репутационные убытки. В настоящее время наиболее полной

методологией количественной оценки экономических потерь является индекс пожаро- и взрывоопасности компании Dow (F&EI-DOW). Тем не менее, индекс F&EI-DOW ориентирован на оценку опасного потенциала технологических установок и не дает общего критерия опасного потенциала всей промышленной площадки с учетом таких аспектов, как «эффект домино», вероятностная оценка риска, актуализация инструментов анализа риска с применением новых методов искусственного интеллекта, а также количественная оценка репутационных потерь. В связи с этим авторами предложена разработка нового индекса экономических потерь от пожаров и взрывов (FEEL-Index), который включает в себя индекс F&EI-DOW с дополнительными факторами, такими как площадь поражения, вероятность аварии и репутационные потери. Применительно к рассматриваемому примеру расчета совокупные потери, определенные с помощью интегрального индекса FEEL, прогнозируют значение, превышающее значение, полученное с использованием индекса F&EI-DOW. Результаты, полученные на примере объекта хранения углеводородов, показывают, что применение индекса FEEL является значимым для повышения восприятия риска, а также служит руководством к действию при организации мероприятий по предотвращению, смягчению последствий и управлению рисками при чрезвычайных ситуациях в отраслях перерабатывающей промышленности.

Ключевые слова: экономическое воздействие; пожар; взрыв; эффект домино; искусственный интеллект; анализ риска



**Process Safety and
Environmental Protection**

Official journal of the European Federation of Chemical Engineering Part B



IChemE

**Vol. 165 (2022):
102-113**

РАСПРОСТРАНЕНИЕ ДИФфуЗИОННОГО ПЛАМЕНИ ВНУТРИ И СНАРУЖИ РАЗЛИЧНЫХ ТРЕХХОДОВЫХ ТРУБ ПОСЛЕ САМОВОСПЛАМЕНЕНИЯ ВОДОРОДА ПОД ДАВЛЕНИЕМ

Имин Цзян (Китай, Соединенное Королевство), Сюйхай Пань (Китай),
Минь Хуа (Китай), Тао Чжан (Китай), Цинъюань Ван (Соединенное Королевство),
Чжилэй Ван (Китай), Юньюй Ли (Китай), Аньдун Юй (Соединенное Королевство),
Цзюньчэн Цзян (Китай)

Аварийная утечка водорода под давлением в трубопровод часто сопровождается возникновением диффузионного самовоспламеняющегося пламени, при этом сложная конфигурация трубопровода оказывает влияние на распространение пламени. В настоящем исследовании изучено распространение самовоспламеняющегося водородного пламени в различных трехходовых трубах, а также проведено сравнение эволюции пламени вблизи двух выходных отверстий. Исследовано влияние

длины трубы и расположения точки разветвления. Результаты показывают, что структура разветвления оказывает влияние на интенсивность пламени и ударной волны, снижая их, причем в ответвлениях трубопровода это влияние более выражено. Однако интенсивность пламени может вновь возрасти после точки разветвления в магистральном трубопроводе, причем это возрастание не является непрерывным и вновь снижается по мере увеличения длины трубы. Кроме того, эволюция пламени вблизи двух выходных отверстий трубы может различаться. При смещении точки разветвления вниз по потоку вблизи выходного отверстия ответвленного трубопровода увеличивается число дисков Маха и время, необходимое для формирования устойчивого пламени. Несмотря на различную эволюцию пламени, его морфология и распространение зависят от структуры ударных волн до образования вихря. После образования вихря пламя резко меняется и быстро разрастается, формируя устойчивое отрывное пламя.

Ключевые слова: безопасность водорода; самовоспламенение; распространение диффузионного пламени; трехходовая труба; ударная волна



**Process Safety and
Environmental Protection**
Official journal of the European Federation of Chemical Engineering Part B



IChemE

**Vol. 165 (2022):
266-277**

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ И ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ФОРМЫ ЗАРЯДА НА ВЗРЫВНУЮ НАГРУЗКУ, ВОЗНИКАЮЩУЮ ПРИ ВЗРЫВАХ В БЛИЖНЕЙ ЗОНЕ

Яньчао Ши, Нин Ван, Цзянь Цуй, Чанхуэй Ли, Сюэцзе Чжан (Китай)

Бризантные взрывчатые вещества – это опасные материалы, которые часто используются в промышленном производстве, что сопряжено со многими проблемами безопасности и риска. Чтобы исследовать влияние формы заряда взрывчатого вещества на ударные нагрузки в ближней зоне (в данном исследовании $< 1,0 \text{ м/кг}^{1/3}$), было проведено 12 испытаний со взрывами в полевых условиях. Были измерены и проанализированы отраженные избыточные давления в 1 кг тротила при различных формах заряда на расстоянии 800 мм и падающие избыточные давления

на расстоянии 1310 мм. С помощью высокоскоростной камеры были зафиксированы огненные шары, образовавшиеся в результате взрывов, затем было проведено их сравнение друг с другом. Результаты показывают, что огненный шар от взрывчатого вещества с пространственной симметрией распределен неравномерно, что указывает на то, что высвобождаемая энергия также неоднородна. Влияние формы заряда было дополнительно исследовано с использованием проверенной численной модели. Экспериментальные и численные результаты показывают, что форма заряда оказывает существенное влияние на ключевые параметры взрывных нагрузок, такие как падающее избыточное давление, отраженное избыточное давление и импульс. Однако влияние формы заряда уменьшалось с увеличением масштабируемого расстояния. Когда масштабируемое расстояние превышает $5,0 (6,0) \text{ м/кг}^{1/3}$, влиянием полусферической (цилиндрической) формы заряда на отраженное пиковое избыточное давление и импульс можно пренебречь.

Ключевые слова: взрывные нагрузки; форма заряда; отраженное избыточное давление; взрывостойкая конструкция; полевые испытания на взрывостойкость



Transactions of the Institution of Chemical Engineers Part B
ISSN 0957-5820

**Process Safety and
Environmental Protection**

Official journal of the European Federation of Chemical Engineering Part B



**Vol. 165 (2022):
532-544**

Однако при утечке природного газа в некоторых случаях скорость вытекающего газа может быть крайне высокой, что приводит к существенным возмущениям в окружающем потоке, а также к большой ошибке в оценке параметров источника. В этой статье байесовский вывод для оценки параметров источника получает дальнейшее развитие на основе поля возмущенного потока. Результаты показывают, что при высокой скорости утечки использование полей невозмущенного потока для оценки приведет к большим ошибкам (с максимальной погрешностью около 46 %), тогда как расчетные результаты ближе к истинным значениям при использовании полей возмущенного потока с конечной погрешностью в пределах 5 %. Наконец, безразмерная скорость утечки используется в качестве показателя для количественной оценки возмущающего воздействия. Считается, что поля возмущенного потока необходимы для оценки параметров источника, когда безразмерная скорость утечки превышает 1.

Ключевые слова: оценка параметров источника; байесовский вывод; поле возмущенного потока; утечка природного газа; сопряженные уравнения

ОЦЕНКА УТЕЧЕК ПРИРОДНОГО ГАЗА В ПОДЗЕМНЫХ ИНЖЕНЕРНЫХ КОММУНИКАЦИЯХ С ПОМОЩЬЮ БАЙЕСОВСКОГО ВЫВОДА НА ОСНОВЕ ДАННЫХ О ПОТОКАХ С ВОЗМУЩЕНИЯМИ В ВИДЕ ГАЗОВЫХ СТРУЙ

Фую Ван (Китай), Сюань Чжоу (Китай), Цзянь Хуан (Китай), Хэндун Ван (Китай),
Хидэки Кикумото (Япония), Чэньюнь Дэн (Китай)

Во влажной среде подземных инженерных туннелей трубопроводы природного газа могут подвергаться коррозии, что приводит к утечке из небольших отверстий. Учитывая огнеопасные и взрывоопасные свойства природного газа, точное и быстрое определение места утечки газа и интенсивности утечки имеет решающее значение для аварийного ремонта. Предыдущие исследования предполагали, что утечка из источника не вызывает возмущений в окружающем его потоке. Од-

Статью подготовили:

Ю.В. Мельникова, науч. сотр.;
Н.В. Сайгина, ст. науч. сотр.;
Е.Е. Архипова, ст. науч. сотр.;
О.Г. Каспина, нач. сектора
(ФГБУ ВНИИПО МЧС России)

**Поступила в редакцию 07.07.2026 г.;
принята к публикации 10.08.2026 г.**