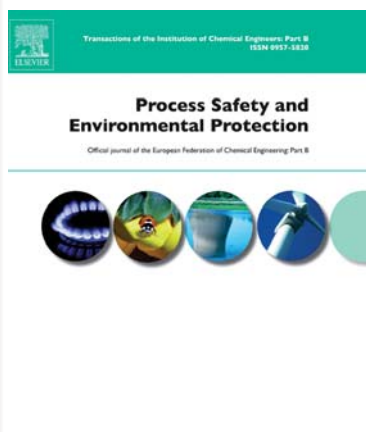


EDN: <https://elibrary.ru/zkkbpj>

РЕФЕРАТИВНЫЙ ОБЗОР ЖУРНАЛА PROCESS SAFETY AND ENVIRONMENTAL PROTECTION, № 159, 160 (2022)

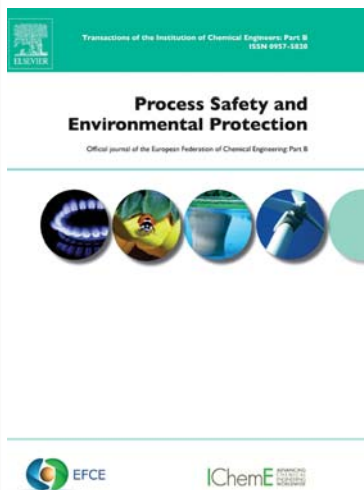


**Vol. 159 (2022):
662-673**

ПРИМЕНЕНИЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ КРУПНЫХ ВИХРЕЙ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ВЗРЫВА СМЕСИ МЕТАН – ВОЗДУХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА УТОЛЩЕНИЯ ПЛАМЕНИ

Кай Чжэн, Цзюньчэн Цзян, Чжисянь Син, Юн Мэй Хао, Минггао Юй, Сюфэн Ян,
Ювэй Тао (Китай)

В данной работе с помощью моделирования крупных вихрей (МКВ) исследуется стехиометрический взрыв смеси метан – воздух с использованием модели утолщения пламени. Для оценки коэффициента полезного действия используется степенная модель, а для горения смеси метан – воздух рассматривается сокращенный двухступенчатый механизм горения. Применяется адаптивное уточнение сетки и моделируются различные коэффициенты утолщения. Численная модель подтверждается сравнением прогнозируемых результатов с экспериментальными данными. Видно, что числовая модель может воспроизводить экспериментальные данные количественно и качественно. Все стадии пламени тюльпанообразной формы хорошо повторяются с помощью МКВ как в 2D, так и в 3D формах. Для пламени тюльпанообразной формы, распространяющегося в гладком воздуховоде, можно пренебречь влиянием коэффициента полезного действия из-за его малого значения. Коэффициент утолщения следует оценивать с учетом тепловой толщины предварительно смешанного пламени, при этом утолщенное пламя должно покрывать не менее пяти ячеек сетки. Радиус воспламенения должен быть больше толщины утолщенного пламени, чтобы обеспечить устойчивое горение предварительно смешанного пламени после воспламенения.

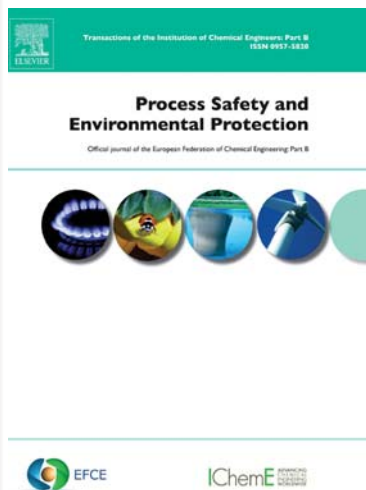


**Vol. 159 (2022):
768-778**

ОПТИМАЛЬНАЯ КОНФИГУРАЦИЯ КЛАПАНА АВАРИЙНОГО ОТКЛЮЧЕНИЯ ДЛЯ ТРУБОПРОВОДОВ ПОД ДАВЛЕНИЕМ

Цзяньхао Ю, Цзяхуань И, Харун Махгеррефтех (Великобритания)

В данной статье представлена разработка и тестирование многоцелевой методики оптимизации для выбора оптимальной конфигурации клапана аварийного отключения (КАО) для транспортных трубопроводов высокого давления. На примере реального газопровода длиной 150,2 км и диаметром 1016 мм, работающего при давлении 80 бар и температуре 307,24 К, данная методика оптимизации применяется для нахождения оптимального баланса между снижением риска, частотой отказов клапанов и финансовыми затратами. Начиная с определения набора из шести важных характеристик клапана и конструкции трубопровода в качестве переменных оптимизации, используется метод главных компонент с целью сокращения числа этих параметров до трех, что снижает вычислительную нагрузку, сохраняя при этом точность. Результаты, полученные с помощью модели многоцелевой оптимизации, представлены с помощью диаграмм рассеяния, обеспечивающих геометрическую визуализацию множества оптимальных решений в пространстве объективных функций. Полученные результаты демонстрируют полезность предложенной методики как эффективного инструмента для принятия решений по выбору оптимальных конфигураций магистральных КАО с учетом типа клапана, габаритных размеров трубопровода, условий эксплуатации и состава транспортируемой жидкости.



**Vol. 159 (2022):
830-841**

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ И КИНЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК ДЕФЛАГРАЦИИ ПЫЛИ ГОРЮЧЕГО СЛАНЦА

Сянбао Мэн, Ян Лю, Цзюньфэн Ван, Чжэн Ван, Кэ Янь (Китай)

С целью изучения характеристик распространения пламени и избыточного давления при взрыве пыли горючего сланца были протестированы образцы пыли горючего сланца из двух разных регионов (горючий сланец из Лункоу (LKOS) и горючий сланец из Хуадянь (HDOS)) с помощью экспериментального устройства Хартмана и 20-литрового сферического экспериментального устройства для взрывов соответственно. Были проанализированы скорость распространения пламени и его яркость, максимальное давление взрыва (P_{\max}) и максимальная скорость нарастания давления ($(dP/dt)_{\max}$), полученные в ходе экспериментов. Исследование по-

казывает, что на начальном этапе взрыва пламя пыли горючего сланца развивается медленно, а скорость распространения пламени постепенно увеличивается по мере его развития. Взрывоопасное пламя пыли LKOS ярче и насыщеннее, чем пламя пыли HDOS с тем же размером частиц, и имеет более высокую скорость распространения и более высокую взрывную силу. P_{\max} и $(dP/dt)_{\max}$ для пыли LKOS выше, чем для пыли HDOS. С увеличением массовой концентрации пыли значения P_{\max} и $(dP/dt)_{\max}$ сначала увеличиваются, а затем уменьшаются. Для расчета и анализа кинетики выделения летучих веществ при пиролизе пыли горючего сланца используется модель распределенной энергии активации. Результаты показывают, что при пиролизе летучих веществ сланца LKOS наблюдается более высокая скорость пиролиза и испарения, а летучие газы высвобождаются быстрее во время реакции взрыва. Это делает реакцию взрывного горения более сильной.



**Process Safety and
Environmental Protection**

Official journal of the European Federation of Chemical Engineering Part B



**Vol. 159 (2022):
1064-1081**

БИБЛИОМЕТРИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ

ТЕНДЕНЦИЙ В ОБЛАСТИ БЕЗОПАСНОСТИ ВОДОРОДА

Жуйчао Вэй, Цзямэй Лань, Липин Лянь, Шэньши Хуан, Чэнь Чжао, Чжужун Дун,
Цзинвэнь Вен (Китай)

Водород играет все более значимую роль в решении проблемы парникового эффекта и энергетического кризиса как экологически чистое топливо, которое можно получать из возобновляемых источников энергии, а также как энергоноситель, который можно хранить. Такие проблемы, как водородное охрупчивание, возгорание и взрыв, на протяжении десятилетий представляли большой интерес для исследователей как необходимые условия для обеспечения безопасности технологических процессов с использованием водорода. На основе библиометрических данных в этой статье представлена структура знаний о публикаци-

ях, связанных с безопасностью при использовании водорода. Информация о 369, 535 и 462 публикациях, связанных с безопасностью при использовании водорода, за период с 1957 по 2021 год была получена из Web of Science Core Collection, Scopus и Lens соответственно. Для проведения библиометрического анализа использовалось программное обеспечение для визуализации VOSviewer. Исследование показало, что в США публикуется больше всего статей среди всех стран; публикации в International Journal of Hydrogen Energy занимают первое место среди всех журналов-источников. В зависимости от периода времени, актуальные темы в исследованиях по безопасности водорода можно разделить на три направления: хранение и обнаружение, горение и взрыв, а также воспламенение и распространение. Результаты дают полное представление об этой области знаний и помогут ученым быстро определить границы исследований и их общее состояние.



**Vol. 159 (2022):
1113-1126**

СРАВНИТЕЛЬНОЕ КИНЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ ТЕРМОГРАВИМЕТРИЧЕСКОГО АНАЛИЗА (ТГ) И ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ СКАНИРУЮЩЕЙ КАЛОРИМЕТРИИ (ДСК) С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БЕЗМОДЕЛЬНОГО И ОСНОВАННОГО НА МОДЕЛЯХ АНАЛИЗА ДЛЯ ОЦЕНКИ СКЛОННОСТИ ИНДИЙСКИХ УГЛЕЙ К САМОВОЗГОРАНИЮ

Сому Мандал, Ниродж Кумар Мохалик, Сантош Кумар Рэй, Асфар Мобин Хан, Дебашиш Мишра, Джай Кришна Пандей (Индия)

Для оценки склонности к самовозгоранию образцов угля, собранных на различных угольных месторождениях Индии, имеющих как огнезащитные, так и негорючие пласты было проведено кинетическое исследование угля с использованием метода синхронного термического анализа. Кинетические параметры были оценены с помощью как безмодельного, так и модельного анализа данных методами ТГ и ДСК. Метод, основанный на модели, включает в себя четыре последовательных этапа реакции, а именно: $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D \rightarrow E$ для процесса самовоспламенения, и для этого исследования был использован второй этап реакции ($B \rightarrow C$). С помощью безмодельного и модельного методов был применен хемометрический анализ для определения взаимосвязи между элементным анализом и энергией активации образцов. Энергия активации для второго этапа реакции в методе, основанном на модели, для данных ТГ и ДСК показала хорошую корреляцию со стандартными методами, то есть температурой точки пересечения (ХРТ) и температурой начала воспламенения образцов (T_{gign}). Это указывает на то, что значения энергии активации на этапе окисления (2-й этап) играют важную роль в склонности угля к самовозгоранию. Исследование также показало, что анализ на основе модели дал более точные результаты по сравнению с анализом без использования модели для оценки склонности угля к самовозгоранию.



**Process Safety and
Environmental Protection**

Official journal of the European Federation of Chemical Engineering Part B



**Vol. 159 (2022):
1203-1214**

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ И ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ ПРИ ПОЖАРЕ РЕЗЕРВУАРА С ПРОТЕКАЮЩИМ И ГОРЯЩИМ МАСЛОМ

Цзиюн Ван, Минъянь Ван, Сяоян Юй, Руовэнь Цзун, Шоусян Лу (Китай)

Пожары в резервуарах с протекающим и горящим маслом, вызванные утечкой масла из резервуаров, наносят значительный ущерб людям и оборудованию. Для изучения поведения при пожаре резервуара с протекающим и горящим маслом была проведена серия экспериментов. Из резервуара в поддон под ним выделялся н-гептан, образуя пламя, которое нагревало резервуар. Размер поддона и диаметр протечки варьировались. Наблюдались разливы, устойчивые очаги горения, кипящие очаги горения и струйные пожары. Результаты показывают, что в определенном диапазоне диаметра протечки (2,5–3,5 мм) максимальное давление увели-

чивалось с уменьшением диаметра протечки. Пары топлива распространялись по дну резервуара, вызывая расширение пламени. Следовательно, размер очага горения был больше, чем фактический размер поддона, что делало максимальное давление и тепловое излучение практически не зависящими от размера поддона. Когда вытекающее масло начало кипеть и гореть, давление быстро возросло, а излучаемый тепловой поток стал самым сильным; таким образом, пожар представлял собой самую серьезную угрозу. Для прогнозирования времени, когда температура вытекающего масла достигнет точки кипения, был использован метод моделирования вычислительной гидродинамики. Прогнозируемые результаты были сопоставлены с экспериментальными, что позволило использовать эти сведения в рамках планов реагирования при чрезвычайных ситуациях.



ОПТИМИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ ВЕНТИЛЯЦИИ ВЗРЫВООПАСНЫХ ПАРОВ В ПРОЦЕССЕ ПРОПИТКИ ПОД ВАКУУМОМ

Юп Ю, Джонхун Лим, Джувон Ли, Джунгван Ким, Хэнтэ Чо (Республика Корея)

Пропитка под вакуумом (ППВ) – это основной процесс, при котором эпоксидная смола пропитывает обмотки статора крупных генераторов и двигателей для улучшения их физических свойств. Однако при испарении эпоксидной смолы в процессе ППВ образуются опасные пары смолы, которые попадают в атмосферу. Эта утечка несет в себе угрозу безопасности и окружающей среде на рабочем месте, так как может привести к пожару, взрыву, а также вызвать у людей респираторные заболевания. Поэтому крайне важно снизить риск, разработав оптимальную систему вентиляции. В этом исследовании предлагается оптимизировать

схему вентиляции взрывоопасных паров в процессе ППВ с помощью метода вычислительной гидродинамики (CFD). Всего было разработано 12 схем вентиляции в зависимости от расположения воздухозаборников и воздуховыпускных отверстий. В этом исследовании использовался метод псевдоперехода и модель турбулентности RNG $k-\epsilon$. С помощью CFD-анализа была определена оптимальная планировка с наибольшей эффективностью вентиляции и наименьшим временем поступления воздуха. При оптимальной компоновке время подачи воздуха составляло 372 с, что примерно на 59 % меньше, чем в модели, представленной в предыдущем исследовании, а эффективность вентиляции была самой высокой – 0,962.



Process Safety and
Environmental Protection

Official journal of the European Federation of Chemical Engineering Part B



**Vol. 160 (2022):
102-115**

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕРХНИХ ПРЕДЕЛОВ ВОСПЛАМЕНЯЕМОСТИ СИНТЕЗИРОВАННЫХ ИЗОПАРАФИНОВ, РЕАКТИВНОГО ТОПЛИВА, А ТАКЖЕ ИХ СМЕСЕЙ С ВОЗДУХОМ ПРИ АТМОСФЕРНОМ ДАВЛЕНИИ И ДАВЛЕНИИ НИЖЕ АТМОСФЕРНОГО

Жан А. Барбоза, Кристиан Дж. Р. Коронадо, Хосе С. де Андраде, Селсо Э. Туна, Маркос Х. Сильва, Жуан А. Карвалью-младший, Андрес З. Мендибуру (Бразилия)

Синтезированные изопарафины (СИП) – это соединения, которые можно смешивать с традиционным авиационным топливом в объеме до 10 % (об.) для сокращения выбросов парниковых газов. Необходимо определить свойства безопасности этих видов топлива, чтобы гарантировать их надежное использование. К таким свойствам относится верхний предел воспламеняемости (ВПВ). Целью эксперимента было опреде-

лить ВПВ в воздухе для СИП, реактивного топлива и смесей, содержащих 10 % (F10) и 50 % (F50) СИП по массе соответственно. Исходные условия включали различные начальные температуры и давления. Экспериментальная конфигурация соответствовала стандарту ASTM E681. Диапазон температур составлял от 420 до 470 К, а диапазон давлений – от 101,3 кПа до 20 кПа. Результаты показывают, что значения ВПВ для исследуемых соединений имеют тенденцию второго порядка в зависимости от давления и постоянной температуры. Смесь F10 демонстрирует значительное снижение ВПВ при 20 кПа. Экспериментальные результаты были обработаны с помощью регрессионных моделей и эмпирических корреляций, которые позволяют определять ВПВ при различных начальных температурах и давлениях.



Process Safety and
Environmental Protection

Official journal of the European Federation of Chemical Engineering Part B



**Vol. 160 (2022):
153-165**

ЧИСЛЕННОЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОЖАРОВ ЛИТИЙ-ИОННЫХ АККУМУЛЯТОРОВ ТИПА 21700 ВЫСОКОЙ ПЛОТНОСТИ ЭНЕРГИИ

Чандра М.Р. Вендра, Ашиш В. Шелк, Джонатан Э.Х. Бастон, Джейсон Гилл,
Дэниел Ховард, Эллиотт Рид, Ахмед Абаза, Брайан Купер,
Дженнифер Икс. Вен (Великобритания)

Литий-ионные аккумуляторы (ЛИА) высокой плотности энергии хорошо подходят для электромобилей, так как обеспечивают увеличенный запас хода. Однако их пожароопасность вызывает беспокойство у ученых. Для разработки защитных мер и мер по смягчению последствий возгораний требуется более детальное изучение проблемы. Настоящее исследование посвящено цилиндрическим LiNixCoyMnzO (NMC) ЛИА емкостью 4,8 Ач типа 21700 при 100%-м уровне заряде с целью

разработки надежного прогностического инструмента для моделирования возгорания ЛИА, количественной оценки скорости тепловыделения и эволюции температуры во время теплового разгона ЛИА. Для разработки модели и получения входных параметров были проведены испытания на термическое воздействие с использованием расширенной объемной ускоряющей калориметрии (EV-ARC) и конусной калориметрии. В некоторые ячейки были встроены температурные датчики для измерения внутренней и внешней температуры на месте. Средние пиковые значения скорости выделения тепла, температуры поверхности и внутренней температуры ячеек были экспериментально определены как 3,6 кВт, 753 °С и 1080 °С соответственно. Была разработана аналитическая модель для прогнозирования изменения внутреннего давления в ячейке ЛИА после открытия вентиляционного отверстия. Модель использует в качестве входных данных измеренную внутреннюю температуру ячейки и давление в контейнере EV-ARC. Прогнозы модели служат в качестве граничных условий при трехмерном вычислительном гидродинамическом моделировании (CFD) пожара, вызванного тепловым разгоном, с использованием открытого кода OpenFOAM. Прогнозируемая скорость выделения тепла в переходном режиме хорошо согласуется с результатами конусных калориметрических испытаний. Прогнозирование также проводилось для открытого кластера с целью оценки вероятности распространения теплового разгона при отсутствии разрыва со стороны ячейки. Представленный подход к моделированию может служить полезным инструментом для оценки тепловых и экологических рисков, связанных с пожарами, вызванными тепловым разгоном, и оптимизации мер по смягчению последствий в закрытых кластерах/модулях.



Process Safety and
Environmental Protection

Official journal of the European Federation of Chemical Engineering Part B



**Vol. 160 (2022):
232-241**

четырёх концентрациях кислорода (от 21 до 3 %) и трёх скоростях нагрева (1, 2 и 5 °С/мин). С помощью термогравиметрического анализа (ТГА) и дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) были получены результаты для образца битуминозного угля из Внутренней Монголии, Китай. С учетом предположения о глобальной реакции были определены параметры макрокинетики (кажущаяся энергия активации, предэкспоненциальный коэффициент и функция кинетической модели). На профилях кажущейся энергии активации (E_a) наблюдались три пика, которые физически интерпретируются как истощение летучих веществ, образование пластичной массы и истощение угля соответственно. Эта интерпретация была подтверждена характерными температурами, полученными на основе экспериментальных данных. При снижении концентрации кислорода с 21 до 9 % два пиковых значения постепенно уменьшаются. В случае с концентрацией кислорода 3 % наблюдается почти монотонное снижение E_a , это указывает на то, что при таких условиях диффузия кислорода является единственным ограничивающим фактором на всех стадиях реакций угля с кислородом. Функции наиболее подходящей кинетической модели предполагают, что стадия окисления угля переходит в режим, контролируемый кинетикой, при концентрации кислорода всего 9 %. Для стадии горения летучих веществ установлено, что универсальный индекс воспламенения (F_z) эффективно связан с режимом реакции для различных сортов угля. Полученные количественные результаты могут быть интегрированы в любые мультифизические модели вычислительной гидродинамики в качестве подмодели химической кинетики.

ИССЛЕДОВАНИЕ МАКРОКИНЕТИКИ РЕАКЦИЙ УГЛЯ С КИСЛОРОДОМ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ КОНЦЕНТРАЦИЯХ КИСЛОРОДА: ПУТЬ К ПОНИМАНИЮ ХАРАКТЕРИСТИК ГОРЕНИЯ ПРИ ПОДЗЕМНЫХ ПОЖАРАХ НА УГОЛЬНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЯХ

Инань Ян, Цзюнь Ли (Китай)

Типичным режимом горения при подземных пожарах на угольных месторождениях (ППУМ) является тление, при котором зона реакции не подвергается воздействию постоянной концентрации кислорода. Понимание макрокинетики реакций угля с кислородом при различных концентрациях кислорода, особенно в условиях сильного дефицита кислорода, имеет как теоретическое, так и практическое значение для борьбы с ППУМ и их тушения. С учетом реальных условий ППУМ были проведены термические испытания при

Статью подготовили:

Ю.В. МЕЛЬНИКОВА, науч. сотр.;
Н.В. САЙГИНА, ст. науч. сотр.;
О.Г. КАСПИНА, нач. сектора;
Е.Е. АРХИПОВА, ст. науч. сотр.
(ФГБУ ВНИИПО МЧС России)

**Поступила в редакцию 13.01.2025 г.;
принята к публикации 14.02.2025 г.**