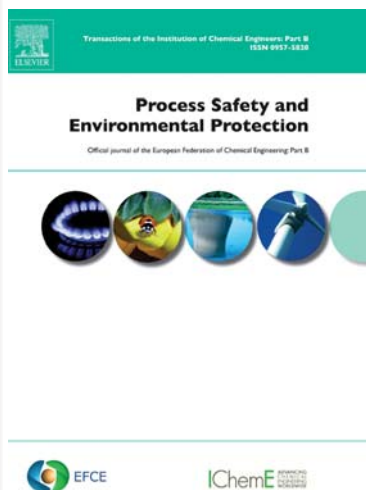


## РЕФЕРАТИВНЫЙ ОБЗОР ЖУРНАЛА PROCESS SAFETY AND ENVIRONMENTAL PROTECTION, № 151, 152 (2021)



**Vol. 151 (2021):  
39-50**

### ТЕРМИЧЕСКИЙ И КИНЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПИРОЛИЗА И ГОРЕНИЯ САМОНАГРЕВАЮЩИХСЯ ЧАСТИЦ БИОМАССЫ

Лиан Лю, Юньхуэй Панг, Дун Лв, Канг Ванг, Ян Ванг (Китай)

Вопросы использования топлива из биомассы, являющегося возобновляемым видом топлива, привлекают все большее внимание. Основными проблемами безопасности в процессе хранения топлива из биомассы является возможность возникновения пожара и взрыва. Исследование характерных показателей и кинетический анализ пиролиза и горения имеют большое значение для обеспечения безопасного хранения топлива из биомассы. В данной работе с помощью термогравиметрического анализа (ТГА) были получены характеристики пиролиза и горения порошка из кукурузной соломы, тополиной щепы и рисовой шелухи в азоте и воздухе соответственно. Профиль термогравиметрия – дифференциальная термогравиметрия (ТГ-ДТГ) показывает, что процесс пиролиза подобных биомасс включает следующие три стадии – сушку, пиролиз и карбонизацию, а процесс горения – три таких стадии, как сушка, выход летучих веществ и сжигание кокса. Основная стадия реакций пиролиза и горения биомассы протекает при температурах 170~400 °С и 180~530 °С соответственно. С увеличением скорости нагрева профили ТГ и ДТГ смещаются в сторону высоких температур. Кроме того, на основании экспериментальных термогравиметрических данных был проведен кинетический анализ с использованием методов Киссинджера – Акахиры – Сунозы, Флинна – Уолла – Озавы, Фридмана и Коатса – Редферна. Показано, что энергия активации процесса пиролиза биомассы находится в пределах 70~100 кДж/моль. Расчетное значение энергии активации процесса горения биомассы, полученное изоконверсионным методом, составляет 140~180 кДж/моль. Расчетное значение по методу CR находится в пределах 80~150 кДж/моль, причем энергия активации стадии горения кокса больше, чем стадии выхода летучих веществ. Наконец, был разработан и проведен эксперимент по самовозгоранию частиц биомассы, который показал, что порошок из кукурузной соломы более склонен к самовозгоранию, на втором и третьем местах находятся рисовая шелуха и тополиная щепа, что соответствует результатам анализа энергии активации. Также был проведен анализ пожарной опасности частиц биомассы по типовым показателям. Данная работа позволяет получить фундаментальные данные, способствующие развитию технологий хранения и безопасного производства частиц биомассы.



Transactions of the Institution of Chemical Engineers Part B  
1526-9577 (2021)

Official journal of the European Federation of Chemical Engineering Part B



**Vol. 151 (2021):  
128-140**

## **ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕТРИИ КАНАЛА И ПОРИСТОГО ПОКРЫТИЯ НА УСКОРЕНИЕ ПЛАМЕНИ В СМЕСИ ВОДОРОД – ВОЗДУХ**

Г.Ю. Бивол, С.В. Головастов, В.В. Голуб (Российская Федерация)

Было проведено экспериментальное исследование распространения пламени в смеси водород – воздух в присутствии пористых материалов в каналах различных размеров и поперечных сечений. В данной работе для изучения распространения пламени в стехиометрических водородно-воздушных смесях при комнатной температуре и атмосферном давлении были проведены эксперименты в прямоугольном канале с одной или двумя стенками, покрытыми пористым материалом. В зависимости от конфигурации канала площадь пористого покрытия внутренних стенок составляла от 1/4 до 1/2 площади канала. Для покрытия стенок ка-

нала использовались четыре типа пенополиуретана с количеством пор на дюйм (PPI) от 10 до 80. Распространение пламени визуализировалось с помощью аппарата Шлирена и высокоскоростной камеры. Наибольшее ускорение пламени в пористом канале по сравнению со сплошным наблюдалось в канале размером 20 × 20 мм. Отношение скоростей в пористом канале к скоростям в сплошном канале составляло 6–7 для пористого материала с самыми крупными (2,5 мм) порами. В том случае, когда размер канала составлял 10 × 10 мм, скорость пламени в пористом канале превышала скорость пламени в сплошном канале через 350 мм только при использовании пористых покрытий с порами 2,5 и 1,3 мм. При использовании пористого покрытия с меньшими порами скорость пламени была ниже, чем в сплошном канале. На снимках с аппарата Шлирена показаны различные стадии распространения пламени от турбулентного до сверхзвукового с ударными волнами.



Transactions of the Institution of Chemical Engineers Part B  
ISSN 0957-5538

**Process Safety and  
Environmental Protection**

Official journal of the European Federation of Chemical Engineering Part B



IChemE

**Vol. 151 (2021):  
141-150**

## ВОДОРОДНО-ВОЗДУШНЫЙ ВЗРЫВ С ГРАДИЕНТАМИ КОНЦЕНТРАЦИИ В КУБИЧЕСКОМ СОСУДЕ

Шэнчао Жуй, Чанг цзян Ван, Шу Шэн, Линь Цзин, Гуань Ли (Китай)

При утечке водорода образуется неоднородная водородно-воздушная смесь, а случайное возгорание достаточной силы может спровоцировать взрыв. Было проведено экспериментальное исследование влияния различных градиентов концентрации водорода на характер пламени и избыточное давление в закрытом кубическом сосуде объемом 0,125 м<sup>3</sup>. Поперечные градиенты концентрации водорода, поступающего с верхней стенки сосуда, регистрировались с помощью пяти датчиков кислорода. С помощью высокоскоростной фотосъемки фиксировалась динамика формы пламени и определялась скорость языка пламени. Три пьезо-

электрических датчика давления были установлены на верхней и боковых стенках для измерения зависимости давления по времени. Результаты показывают, что максимальное избыточное давление в однородных смесях больше, чем в неоднородных, что справедливо для водородно-воздушных смесей с низким содержанием топлива. Однако максимальное избыточное давление в неоднородных смесях соответствует давлению в однородных смесях или превышает его, что справедливо для водородно-воздушных смесей с высоким содержанием топлива. Вследствие большой разницы между скоростями восходящего и нисходящего пламени в неоднородных водородно-воздушных смесях регистрируется грибовидная форма пламени в смесях с малым и небольшим содержанием топлива в водородно-воздушной смеси. В неоднородных топливосодержащих смесях скорость пламени в двух направлениях имеет практически одинаковое значение. Средняя скорость пламени в неоднородных смесях значительно больше, чем в гомогенных, что справедливо для водородно-воздушных смесей с высоким содержанием топлива.



Transactions of the Institution of Chemical Engineers Part B  
ISSN 0950-4230

**Process Safety and  
Environmental Protection**

Official journal of the European Federation of Chemical Engineering Part B



**Vol. 151 (2021):  
208-221**

## **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ И ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВЫСОТЫ НЕЗАПОЛНЕННОГО ОБЪЕМА НА СТРУЮ ПЛАМЕНИ И ХАРАКТЕРИСТИКИ ГОРЕНИЯ ПРИ ПОЖАРЕ ПРОЛИВА ТОПЛИВА**

Чуньсян Лю (Китай, Великобритания), Мехди Джанги (Великобритания), Цзе Цзи (Китай), Лонгсинг Ю (Китай), Лонг Динг (Китай)

Как известно, пожары проливов топлива на нефтехранилищах и химических заводах часто вызывают эффект домино. Огненный шлейф является причиной ущерба, наносимого пожарами проливов топлива. Целью данного исследования является изучение влияния высоты незаполненного объема (расстояния между поверхностью топлива и верхней кромкой резервуара) на течение огненного шлейфа и характеристики горения, которое проводилось путем экспериментальных и численных методов. Высота незаполненного объема

постепенно изменялась от нуля до значения, при котором происходит самозатухание пламени. Результаты моделирования были подтверждены как усредненными по времени, так и мгновенными экспериментальными измерениями. С точки зрения динамики размера основания пламени по отношению к размеру выходного отверстия резервуара были выделены следующие три класса. Класс I: Основание пламени закрепляется вблизи верхней границы резервуара, а горение происходит в основном по классическому типу диффузионного горения; класс II: Основание пламени входит в резервуар, но не сливается с его содержимым; класс III: Основание пламени входит в резервуар и сливается вдоль средней оси содержимого. Было показано, что снижение давления вблизи выходного отверстия из резервуара побуждает пламя входить в бассейн по мере увеличения высоты незаполненного объема. Согласно хронологии развития огненного шлейфа, были выявлены три модели огненного шлейфа при различных значениях высоты незаполненного объема, которые объясняли эволюцию структуры пламени. Было показано, что с увеличением высоты незаполненного объема увеличивается процент сгорания предварительной смеси. Такое поведение объясняется повышенным поступлением и перемешиванием свежего воздуха в основании пламени.



Transactions of the Institution of Chemical Engineers Part B  
ISSN 0957-5828

**Process Safety and  
Environmental Protection**

Official journal of the European Federation of Chemical Engineering Part B



**Vol. 152 (2021):  
536-548**

## **ПРОЦЕСС ИЗГОТОВЛЕНИЯ И СВОЙСТВА МИКРОКАПСУЛ ГИДРОТАЛЬЦИТА ДЛЯ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ САМОВОЗГОРАНИЯ УГЛЯ**

Янни Чжан, Пань Шу, Фангян Чжай, Шаокан Чен, Кай Ванг, Цзюнь Дэн, Фуру Канг,  
Леле Ли (Китай)

Микрокапсульные материалы – это новый тип композиционных огнетушащих материалов, которые показывают хорошие результаты при предотвращении самовозгорания угля. В данной работе в качестве материала стенки микрокапсулы был выбран полиэтиленгликоль 6000 (ПЭГ6000), а в качестве материала ядра микрокапсулы – гидротальцит (СДГ). Микрокапсулированные образцы СДГ с различным соотношением ядра и стенки были получены методом плавильного диспергирования и конденсации. Для характеристики морфологии поверхности, дисперсности, покрытия, пиролиза и дру-

гих характеристик микрокапсул использовались сканирующая электронная микроскопия в сочетании с энергодисперсионной спектроскопией, Фурье-спектроскопия, термогравиметрия/дифференциальная сканирующая калориметрия (ТГ/ДСК) и другие эксперименты. Для целей исследования микрокапсулы были механически перемешаны с образцом угля для приготовления химически ингибированного образца угля. На основе ТГ/ДСК-экспериментов было изучено влияние микрокапсул с различным соотношением размера ядра и стенки на характеристики самовозгорания угля. В сочетании с термокинетическими параметрами был проанализирован механизм подавления самовозгорания угля микрокапсулами с различным соотношением размера ядра и стенки. В результате были изготовлены микрокапсулы СДГ-ПЭГ6000 с требуемыми характеристиками. Тепловая реактивность и механизм ингибирования микрокапсул с различным соотношением сердцевины и стенок оказались разными, а наилучший эффект был получен при соотношении размеров ядра и стенок 1:5. Этот микрокапсульный материал может снизить скорость потери веса и уменьшить тепловыделение угля, повысить критическую температуру и температуру максимальной скорости потери веса на 8,8 °С и 33,6 °С соответственно, а также увеличить как кажущуюся энергию активации стадии испарения воды и десорбции газа на 13,42 кДж/моль, так и стадию термического разложения и стадию горения на 88,64 кДж/моль. Устойчивые микрокапсулы могут эффективно подавлять реакцию самовозгорания угля. Кроме того, данное исследование дает новые идеи для решения проблемы самовозгорания угля в пласте, вызванного полностью механизированной технологией обрушения верхнего слоя угля, а также предлагает новые технические средства для предотвращения пожаров.



**Process Safety and  
Environmental Protection**

Official journal of the European Federation of Chemical Engineering Part B



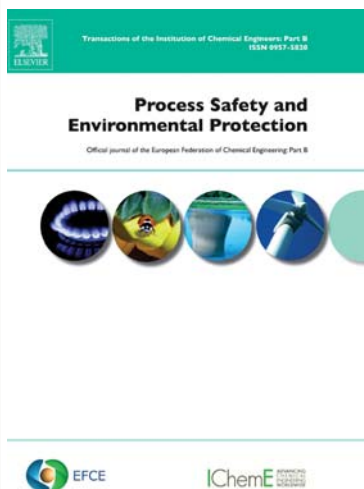
**Vol. 152 (2021):  
549-567**

## **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СКОРОСТИ ГОРЕНИЯ И ТЕМПЕРАТУРНОГО ПРОФИЛЯ ПРИ ПОЖАРЕ ПРОЛИВА В ИЗОГНУТОМ ТОННЕЛЕ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ МЕСТА ПОЖАРА**

Ронглианг Пан (Финляндия, Китай), Гоцин Чжу (Китай), Ганг Ху (Китай),  
Хин Лиу (Китай)

Для анализа влияния изогнутого потолка и расположения очага пожара на характеристики горения в тоннеле инженерных коммуникаций было проведено экспериментальное и теоретическое исследование скорости горения и температурного профиля, возникающего при пожаре пролива под изогнутым потолком. Результаты показали, что поступление кислорода и тепловая обратная связь с окружающей средой создают альтернативный механизм, определяющий динамику скорости горения. Для изучения этого механизма был проведен

качественный анализ. По мере приближения очага пожара к боковой стене положительное влияние тепловой обратной связи постепенно компенсируется отрицательным влиянием ограничения подачи кислорода. Кроме того, было установлено, что величина снижения скорости горения вблизи стены положительно соотносится со скоростью тепловыделения источника огня. Было определено типовое значение наклонного угла для замены изменяющегося наклонного угла изогнутого потолка вдоль траектории потолочной струи. На основе определения понятия типового «наклонного угла» с помощью эмпирической модели была унифицирована зависимость температурного профиля под осевой линией изогнутого потолка от высоты тоннеля и горизонтального положения относительно очага пожара. Максимальная температурная задержка под осевой линией изогнутого потолка, возникающая при пожаре пролива, была проанализирована с помощью радиального потока и одномерного потока. Предложенные модели радиального и одномерного потоков подтвердились и позволили эффективно прогнозировать максимальную температурную задержку, что может быть использовано при проектировании противопожарной защиты тоннелей инженерных коммуникаций.



**Vol. 152 (2021):  
614-629**

## **CFD-ИССЛЕДОВАНИЕ И АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТОНКОРАСПЫЛЕННОЙ ВОДЫ ПРИ ТУШЕНИИ ПОЖАРА ПРОЛИВА**

Анкит Дасготра (Индия), Гутхам Рангараджан (Канада), С.М. Таузеф (Индия)

Случайные пожары ежегодно приводят к большим материальным потерям, наносят ущерб окружающей среде и влекут за собой большое число погибших. Когда топливо скапливается в виде лужи и горит, это называется пожаром пролива. Пожары проливов могут гореть изолированно – не взаимодействуя друг с другом, или как одиночные пожары проливов (ОПП), или пламя от нескольких пожаров проливов может объединяться, образуя так называемые множественные пожары проливов (МПП). Если с одиночными пожарами проливов достаточно трудно бороться, то пожары нескольких

одновременно горящих проливов потушить еще сложнее. По сравнению с ОПП, МПП, как правило, имеют гораздо более высокую пламя и, по имеющимся данным, обладают чрезвычайной тепловой интенсивностью. Случайные пожары проливов на складах, в коммерческих и жилых зданиях могут влиять друг на друга, что приводит к возникновению взаимовлияющих пожаров проливов. Для тушения пожаров в таких помещениях, как складские, коммерческие или жилые здания, обычно используются спринклеры. Поэтому в данной работе представлено численное моделирование, проведенное с целью анализа эффективности спринклеров с тонкораспыленной водой при тушении МПП. Соответствующее CFD-моделирование проводилось с использованием программы Fire Dynamics Simulator (FDS), и таких инструментов FDS, как программные компоненты Pyrosim (препроцессор) и Smokeview (постпроцессор). В данной работе тщательно проанализировано влияние отношения расстояния между проливами ( $S$ ) к диаметру пролива ( $D$ ) на общую эффективность пожаротушения спринклера с тонкораспыленной водой в зависимости от расхода тонкораспыленной воды и высоты потолка. Анализ, представленный в данной статье, поможет решить проблемы, связанные с эффективностью работы спринклера с тонкораспыленной водой при пожарах на складах с точки зрения технологической безопасности.

***Материал (поступил в редакцию 01.08.2023 г.)  
подготовили:***

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