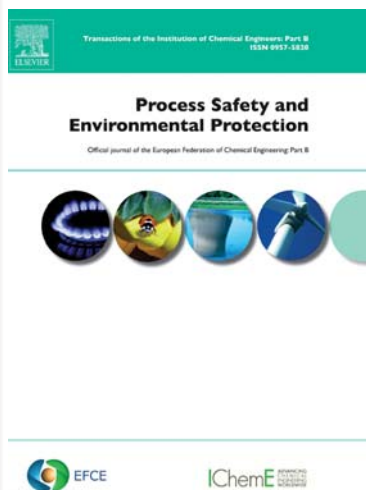


## РЕФЕРАТИВНЫЙ ОБЗОР ЖУРНАЛА PROCESS SAFETY AND ENVIRONMENTAL PROTECTION, № 156 (2021)



Vol. 156 (2021):  
1-16

### ХАРАКТЕРИСТИКИ САМОВОСПЛАМЕНЕНИЯ И ТЛЕНИЯ СЛОЯ УГОЛЬНОЙ ПЫЛИ, РАСПОЛОЖЕННОГО НА НАКЛОННОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Сюэ Цян Ши, Сяо Чэнь, Юань Чжан, Юань Чжан, Чжичэн Ши,  
Бо Че, Шанвэнь Ся (Китай)

В реальных промышленных условиях горючее вещество угля и угольная пыль не всегда располагаются в виде горизонтальных пластов, а находятся на наклонных поверхностях. Для изучения характеристик самовоспламенения и тления слоев угольной пыли в зависимости от угла их наклона была разработана двухмерная численная модель реакции окисления угля. Для решения проблемы взаимосвязи реакции окисления угля и характеристик воздушного потока были рассмотрены воздействия силы тяжести и тепловой плавучести. Результаты показывают, что ко-

эффициенты роста минимальной температуры воспламенения угольной пыли толщиной 6,4 мм, 12,7 мм, 19,1 мм и 25,4 мм составляют  $0,117\text{ }^{\circ}\text{C}/^{\circ}$ ,  $0,0467\text{ }^{\circ}\text{C}/^{\circ}$ ,  $0,033\text{ }^{\circ}\text{C}/^{\circ}$  и  $0,033\text{ }^{\circ}\text{C}/^{\circ}$  соответственно. При повышении температуры теплового источника угол наклона расположения угольной пыли может значительно сократить время задержки воспламенения (ВЗВ). ВЗВ угла наклона угольной пыли при  $60^{\circ}$  на  $128\text{ }^{\circ}\text{C}$  больше, чем при  $0^{\circ}$ . Точка высокой температуры угольной пыли на стадии развития самонагрева перемещается на графике изнутри наружу, а на стадии затухания – снаружи внутрь. Кроме того, были обнаружены некоторые интересные явления в процессе самовоспламенения и тления угля. Влияние угла наклона угольной пыли на ее самонагревание в основном отражается на расположении точек высокой температуры и распространении тления. Это исследование полезно для понимания особенностей самовоспламенения угольной пыли и распространения тления при ее наклонном расположении и может помочь в предотвращении самовоспламенения угольной пыли.

**Ключевые слова:** угольная пыль, численное моделирование, самовоспламенение, углы наклона, тление



**Process Safety and  
Environmental Protection**

Official journal of the European Federation of Chemical Engineering Part B



**Vol. 156 (2021):  
43-56**

## **СОСТАВ ГАЗА, ПОЛУЧАЕМОГО ПРИ ПРЯМОМ СЖИГАНИИ И ПИРОЛИЗЕ БИОМАССЫ**

Д.О. Глушков (Россия), Г.С. Няшина (Россия), Р. Ананд (Индия),  
П.А. Стрижак (Россия)

Биомасса считается одним из наиболее доступных и перспективных возобновляемых источников энергии. Пиролиз и сжигание являются наиболее распространенными способами использования биомассы. Ранее никогда не проводился комплексный многокритериальный анализ для определения наиболее перспективной технологии использования различных видов биомассы. Данное исследование сосредоточено на сравнении двух типичных методов использования сельскохозяйственной и лесной биомассы для получения биоэнергии. В этой статье были экспериментально изучены прямое сжигание и пиролиз биомассы. Экологические

и энергетические показатели исследуемых процессов были определены для отдельных компонентов биомассы (листьев, соломы, опилок) и группы смесей из них. Установлено, что сжигание смесей биомассы обладает лучшими экологическими характеристиками. Таким образом, основные техногенные выбросы понизились в диапазоне от 8–66 %. Кроме того, пиролиз смеси биомассы из группы компонентов приводит к увеличению выхода горючих газов на 30 %. Анализ относительных показателей эффективности двух процессов, в которых биомасса использовалась в качестве энергетического ресурса, показал, что композитное топливо, полученное из биомассы, более эффективно, чем его отдельные компоненты.

**Ключевые слова:** биомасса, пиролиз, сжигание, выработка электроэнергии, окружающая среда, эффективность



## СТРУЙНЫЕ ПОЖАРЫ С ВЫБРОСОМ ГАЗА И ТВЕРДЫХ ЧАСТИЦ

Куйбин Чжоу, Сюань Ние, Чао Ван, Яндонг Ван, Хуичан Ниу (Китай)

Утечка газа под высоким давлением из подземного трубопровода может увлечь за собой близлежащие почвы и грунты и таким образом вызвать струйное возгорание газотвердых смесей. Кроме того, тепловой разгон литий-ионных аккумуляторов также может привести к возникновению типичного струйного диффузионного пламени газотвердого топлива. По сравнению со струйным диффузионным пламенем газа и струйным пламенем предварительно смешанного газа с воздухом, особенности струйного диффузионного пламени газотвердого топлива изучены недостаточно. Для изучения пожаротушения диффузионного пламени газотвердого топлива было разработано новое

оборудование, состоящее из устройства струйного пожаротушения и устройства подачи песка. Для предлагаемой установки была подтверждена повторяемость испытаний. Разъяснены динамические различия между струйными пожарами газов и газотвердого топлива. Установлено, что струйное пламя газотвердого топлива имеет большую высоту отрыва, меньшую видимую высоту пламени и меньшую долю излучения, чем струйное пламя газов в чистом виде. В частности, при струйном пожаре газотвердого топлива при высоких скоростях истечения высота отрыва пламени увеличивается, но видимая высота пламени и доля излучения, по-видимому, уменьшаются, поскольку размер частиц песка уменьшается, что приводит к увеличению высоты струи песка. Внутри объема пламени песок играет роль теплоотвода, снижая температуру пламени и, следовательно, скорость горения. Кроме того, в области отрыва пламени песок разбавляет газообразное топливо и изолирует окружающий кислород, препятствуя горению. Оба вида песка приводят к увеличению высоты отрыва пламени, особенно это касается песка с мелкими частицами. Большая высота отрыва пламени означает увеличение массы воздуха, поднимаемого от основания пламени или от части предварительно смешанного пламени, до основного объема пламени. Кроме того, поток, насыщенный частицами песка, значительно увеличивает скорость захвата окружающего воздуха шлейфом пламени. Оба явления приводят к уменьшению видимой высоты пламени. Количество предварительно смешанного пламени увеличивается в нижней его части, что уменьшает общее количество сажи во всем объеме пламени. Снижение температуры пламени и общего количества сажи уменьшает долю излучения. Песок существенно влияет на геометрию пламени и долю излучения, что изменяет распределение теплового потока и затрудняет разработку модели теплового излучения для струйных пожаров газотвердого топлива. Кроме того, для точного прогнозирования распределения теплового потока излучения при струйном пожаре газотвердого топлива была пересмотрена модель излучения линейного источника, представленная в литературе.

**Ключевые слова:** струйное пламя, газотвердая смесь, высота отрыва, высота пламени, доля излучения, модель излучения



Process Safety and  
Environmental Protection

Official journal of the European Federation of Chemical Engineering Part B



**Vol. 156 (2021):  
231-243**

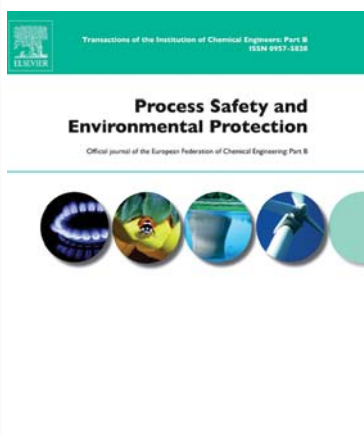
## **ОГНЕСТОЙКОСТЬ ВЕРТИКАЛЬНОГО НЕФТЯНОГО РЕЗЕРВУАРА, ПОДВЕРГШЕГОСЯ ТЕПЛОВОМУ ВОЗДЕЙСТВИЮ ПОЖАРА ПРОЛИВА ТОПЛИВА ПОСЛЕ ПОПАДАНИЯ В НЕГО ОСКОЛКА НА ВЫСОКОЙ СКОРОСТИ**

Юньхао Ли, Цзюньчэн Цзян, Юань Юй, Жиронг Ван,  
Чжисян Син, Цинву Чжан (Китай)

Комбинированное воздействие деформации осколком и теплового излучения в результате пожара пролива на вертикальный резервуар из стали марки Q345 обычно не рассматривалось из-за комплексного характера воздействия комбинированных нагрузок на цельные стальные конструкции. В данном исследовании применяется метод последовательного соединения. Исследуется комбинированное влияние деформации осколком и теплового излучения на режим отказа и огнестойкость вертикального стального резервуара. Кроме

того, изучено влияние размера осколка, его формы, а также расстояния между резервуарами. Результаты показывают, что по сравнению с резервуаром со стационарной крышей без деформации осколком, деформация резервуара приводит к концентрации напряжений в области пластической деформации. Уровень напряжения в деформированном резервуаре выше, а огнестойкость деформированного резервуара ниже. Кроме того, с увеличением размера деформации уровень напряжений, вызывающих термическое смятие деформированного резервуара, снижается за пределами зоны пластической деформации. Вдобавок снижается огнестойкость. Помимо этого, при уменьшении расстояния между резервуарами уровень напряжения в цилиндрической оболочке увеличивается. В таком случае огнестойкость деформированного резервуара резко снижается. Понимание режима разрушения позволяет предложить меры пожаро- и взрывобезопасности в нефтехимической промышленности, чтобы снизить или устранить риск возникновения эффекта домино и ущерб от происшествия. Кроме того, данные по огнестойкости помогут улучшить управление пожарными и спасательными службами, что, несомненно, сыграет важную роль в реагировании на чрезвычайные ситуации и спасении людей, а также повысит уровень безопасности технологических процессов в целом.

**Ключевые слова:** комбинированные нагрузки, тепловое излучение, деформация осколком, режимы разрушения, огнестойкость, вертикальный стальной резервуар



**Vol. 156 (2021):  
340-360**

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОСЛЕДСТВИЙ И АНАЛИЗ СИНЕРГЕТИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА ДОМИНО НА ОСНОВЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ГИДРОДИНАМИКИ ДЛЯ ПОЖАРОВ ПРОЛИВОВ ТОПЛИВА**

Сяофэн Ли (Китай), Гуохуа Чен (Китай), Конгсин Хуан (Канада), Тао Цзэн (Китай), Синьюй Чжан (Китай), Пэн Ян (Китай), Мулин Се (Китай)

Синергетическое воздействие пожаров проливов топлива при авариях с эффектом домино, вызванных пожаром, может привести к большему ущербу, чем одиночный пожар пролива топлива. Существующие исследования в основном используют метод суперпозиции, основанный на упрощенных предположениях, для анализа влияния синергетического эффекта пожаров проливов топлива на действие эффекта домино. Поэтому подобный синергетический эффект не изучался в достаточной степени. В данном исследова-

нии разработан новый метод вычислительной гидродинамики для моделирования синергетического эффекта пожаров проливов топлива. Были проведены тематические исследования на примере двойного пожара пролива топлива. Было проведено количественное исследование влияния ключевых факторов, таких как скорость ветра, вертикальное расположение пожара, тип топлива и расстояние между пожарами. Результаты показали, что предложенный подход на основе вычислительной гидродинамики помогает более полно моделировать последствия пожаров проливов топлива и более точно оценивать эффект домино при синергетическом эффекте, чем традиционный метод суперпозиции. По сравнению с единственным пожаром пролива топлива, синергетический эффект двойного пожара пролива топлива может увеличить вероятность возникновения эффекта домино для соседних резервуаров с подветренной стороны на шесть порядков. Кроме того, замечено, что максимальный тепловой поток излучения и вероятность эскалации в резервуаре-мишени в подветренном направлении увеличиваются с ростом скорости ветра. В то время как максимальный тепловой поток излучения, получаемый резервуарами-мишенями, и вероятность эскалации уменьшаются с увеличением расстояния разграничения и при вертикальном расположении пожара. Более того, в соответствии с минимальным безопасным расстоянием, рекомендованным современными стандартами проектирования, синергетический эффект двойных пожаров в резервуарных парках дизельных хранилищ приведет к более высокой вероятности эскалации близлежащего оборудования, чем в резервуарных парках бензиновых хранилищ. Данное исследование может быть использовано для прогнозирования последствий аварий и оценки эффекта домино при синергетическом воздействии пожаров проливов топлива, а также для оптимизации планировки территории резервуаров для хранения химических веществ.

**Ключевые слова:** синергетический эффект, пожары проливов топлива, вычислительная гидродинамика, моделирование последствий, эффект домино, тепловой поток излучения



## Process Safety and Environmental Protection

Official journal of the European Federation of Chemical Engineering Part B



**Vol. 156 (2021):  
405-416**

## ВЛИЯНИЕ ДВИЖЕНИЯ ВОЗДУШНЫХ ПОТОКОВ НА МИГРАЦИЮ МЕТАНА В ЗАВАЛАХ УГОЛЬНЫХ ШАХТ ПРИ СПОНТАННОМ ГОРЕНИИ УГЛЯ

Линь Ли (Китай), Ботао Цинь (Китай), Цзишань Лю (Австралия),  
Йи-Квонг Леонг (Австралия), Вай Ли (Австралия), Цзе Цзэн (Австралия),  
Дун Ма (Китай), Хуэй Жуо (Китай)

Было доказано, что спонтанное горение угля приводит к накоплению и взрывам метана в завалах угольных шахт. Во избежание возможных взрывов метана в угольных шахтах предлагается организовывать такие инженерные меры безопасности, как разбавляющая вентиляция, хотя ее механизм предотвращения аварии не очень хорошо изучен. С помощью экспериментального и численного моделирования был изучен эффект суперпозиции утечки воздуха и вытяжного эффекта, вызванного горением угля, с целью выявления меха-

низма предотвращения аварии при разбавляющей вентиляции. Результаты исследований показывают, что высокотемпературная область сгорания угля устойчива и может обеспечить непрерывную выталкивающую силу для формирования восходящего потока воздуха даже при разбавляющей вентиляции; наблюдается дрейфовое накопление метана при суперпозиции эффекта утечки воздуха и восходящего потока воздуха; разбавляющая вентиляция может уменьшить и даже устранить скопление метана путем преодоления вытяжного эффекта, но повышение температуры сгорания угля усилит восходящий поток воздуха вытяжного эффекта, что снова вызовет скопление метана. Противостояние между вытяжным эффектом, вызванным сжиганием угля, и утечкой воздуха позволяет по-новому взглянуть на изучение миграции метана для процесса прогнозирования и предотвращения аварий.

**Ключевые слова:** вытяжной эффект, противостояние воздушных потоков, скопление метана, утечка воздуха, разбавляющая вентиляция



Process Safety and  
Environmental Protection

Official journal of the European Federation of Chemical Engineering Part B



**Vol. 156 (2021):  
521-530**

## **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЖАРА ВЕРТИКАЛЬНОГО РАЗЛИВА ТРАНСФОРМАТОРНОГО МАСЛА В УСЛОВИЯХ НЕПРЕРЫВНОГО РАЗЛИВА**

Лиян Ли, Сюй Чжай, Цзюньцай Ван, Пэн Чэнь, Конглин Ши (Китай)

Пожар с вертикальным разливом топлива – одно из типичных явлений на пожарах, которое обычно возникает при использовании и хранении жидкого топлива и может представлять угрозу безопасности технологических процессов. В данном исследовании на стальной экспериментальной установке был проведен ряд испытаний с непрерывным возгоранием трансформаторного масла для выявления характеристики возгорания вертикального разлива трансформаторного масла или топлива, схожего по свойствам с трансформаторным маслом. В процессе распространения пламени были

зарегистрированы данные о форме пламени, температуре и излучении. В зависимости от изменения площади горения процесс формирования и развития пожара вертикального разлива можно разделить на четыре стадии. Была проанализирована связь между площадью горения и скоростью утечки топлива на стадии квазистабильного горения и создана модель прогнозирования площади горения при вертикальном пожаре разлива трансформаторного масла. Была создана модель излучения пожара вертикального разлива трансформаторного масла в зависимости от скорости утечки. На основе анализа теплообмена получена и проверена экспериментальными данными модель массовой скорости выгорания.

**Ключевые слова:** пожар разлива, трансформаторное масло, вертикальная плоскость, распространение пламени

**Материал (поступил в редакцию 23.04.2024 г.)  
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)