

УДК 614.841.44 (075)

ПОЖАРНАЯ ОПАСНОСТЬ ПРОЦЕССОВ ТЛЕНИЯ ЦЕЛЛЮЛОЗЫ И РАСТИТЕЛЬНОГО СЫРЬЯ

Л. ВОГМАН, д-р техн. наук, ФГБУ ВНИИПО МЧС России
E-mail: vniipo-3.5.3@ja.ru

В настоящей работе выполнен обзор исследований процессов тления целлюлозных и растительных материалов как наиболее распространенных органических соединений природного происхождения. Экспериментально исследованы причины возникновения и условия протекания процессов зарождения и образования очагов тления в материалах растительного происхождения в хранилищах большого объема. Рассмотрены процессы подавления горения целлюлозных материалов в компактном состоянии (древесина) и в дисперсном виде (растительное сырье, древесные опилки, стружка).

Ключевые слова: целлюлозные, растительные материалы, тление, скорость распространения волны тления, тушение.

Тление как вид горения органических волокнистых горючих веществ и материалов, в том числе блочных и мелкодисперсных, характеризуется скрытым очагом и медленным распространением горения [1–5]. К тлению склонны, как правило, пористые или измельченные целлюлозные материалы: бумага, опилки, растительное сырье, в том числе жмыхи, шроты, зерно и комбикорма, а также слоистые древесные плиты, резина, натуральная кожа, пенополиуретаны, некоторые композиционные материалы, терморезистивные пластики и др. Пенопласты с открытой структурой ячеек в большей мере склонны к тлению, чем пенопласты с замкнутой структурой ячеек.

Древесина, хлопок, зерно, корма и другие растительные материалы являются природными органическими соединениями, которые содержат в своем составе целлюлозу, гемицеллюлозу, лигнин и другие высокомолекулярные вещества: пентозаны, гексозаны. Элементный состав материалов включает углерод, водород, кислород. Например, целлюлоза представляет собой продукт следующего элементного состава: С — 44,4%, Н — 6,17%, О — 49,39% [1].

Несмотря на существующие различия между целлюлозными и растительными материалами по составу и внешнему виду, у них много общих свойств. При нагревании они подвергаются разложению. Входящие в их состав вы-

сокомолекулярные вещества (целлюлоза, лигнин и др.) уже при умеренно повышенных температурах оказываются малоустойчивыми и распадаются. Общее направление этого распада таково, что из сложных веществ, обладающих высоким молекулярным весом, образуются более устойчивые и простые соединения. Тлению способствует диффузия кислорода воздуха в зону реакции, а также кислород, содержащийся в составе молекул вещества, материала, и низкий уровень теплопотерь из зоны реакции. Основным свойством вещества и материалов, определяющим склонность к тлению, является способность их при нагревании образовывать жесткий карбонизированный (углистый) остаток. Плавающие материалы, которые при нагревании не образуют такой остаток (например, смолистые жидкие продукты), не склонны к тлению.

Keywords: cellulose, vegetable materials, corruption, speed of propagation of corruption, suppression.

сокомолекулярные вещества (целлюлоза, лигнин и др.) уже при умеренно повышенных температурах оказываются малоустойчивыми и распадаются. Общее направление этого распада таково, что из сложных веществ, обладающих высоким молекулярным весом, образуются более устойчивые и простые соединения.

Тлению способствует диффузия кислорода воздуха в зону реакции, а также кислород, содержащийся в составе молекул вещества, материала, и низкий уровень теплопотерь из зоны реакции.

Основным свойством вещества и материалов, определяющим склонность к тлению, является способность их при нагревании образовывать жесткий карбонизированный (углистый) остаток. Плавающие материалы, которые при нагревании не образуют такой остаток (например, смолистые жидкие продукты), не склонны к тлению.

Анализ процессов и условий тления целлюлозных и растительных материалов

Выделение тепла и повышение температуры происходит главным образом за счет окисления продуктов разложения целлюлозных материалов, среди которых можно назвать твердые (углерод), жидкие (уксусная кислота, метиловый спирт, ацетон, деготь, вода), газообразные (водород, оксид и диоксид углерода, метан) вещества. Эти продукты

могут в свою очередь претерпевать дальнейшее разложение. Так, при температуре свыше 350°C происходит расщепление уксусной кислоты и метилового спирта с образованием горючих газообразных продуктов: оксида углерода, углеводородов предельного и непредельного ряда, альдегидов, кетонов и др. При пиролизе целлюлозы и растительного сырья образуются горючие газо- и парообразные продукты, содержащие в своем составе атомы углерода, водорода и кислорода: H_2 , CO , C_2H_4 , CH_4O , CH_4 , $\text{C}_2\text{H}_6\text{O}$, C_7H_{10} , C_2H_6 , C_8H_{10} , $\text{C}_4\text{H}_{10}\text{O}$, C_6H_6 , $\text{C}_2\text{H}_4\text{O}_2$, $\text{C}_4\text{H}_8\text{O}_2$, $\text{C}_2\text{H}_6\text{O}$, $\text{C}_3\text{H}_6\text{O}$, $\text{C}_2\text{H}_4\text{O}$ [2]. Процесс разложения и окисления целлюлозных материалов в присутствии кислорода направлен в конечном счете на образование простейших продуктов разложения — CO_2 и H_2O .

Многие из продуктов пиролиза имеют низкие значения нижнего концентрационного предела распространения пламени (НКПР), некоторые из них являются легковоспламеняющимися: температура самовоспламенения ниже или близка к температуре тления (около 900 K). Например, температура самовоспламенения $\text{C}_2\text{H}_6\text{O}$ составляет 673 K , $\text{C}_4\text{H}_{10}\text{O}$ — 613 K . И значения минимальной энергии зажигания для многих из них весьма низкие: для H_2 — $0,006\text{ МДж}$, для CH_4O — $0,14\text{ МДж}$.

Одинаковые свойства целлюлозных материалов проявляются и в том, что из единицы массы какого-либо из них выделяется сравнительно одинаковое количество тепла — приблизительно $18\ 000\text{--}20\ 000\text{ кДж/кг}$ [6], однако скорость выделения тепла неодинаковая и определяется различием в объемном весе материалов.

Решающий фактор для возгорания материалов — их температура. Для различных горючих целлюлозных материалов воспламенение наблюдается в интервале температур от 210 до 250°C , а самовоспламенение — от 300 до 430°C . Так, температура тления высушенной травы влажностью $7,3\%$ (об.) составляет 204°C , а температура воспламенения высушенных стеблей пшеницы (соломы) — 200°C [1, 7].

Процесс горения целлюлозных материалов имеет гетерогенный характер, поэтому важную роль в нем играют размеры и природа поверхности твердой фазы [4, 5]. В работе [8] предложено разделять процессы тлеющего горения на три вида: тление компактного углеродсодержащего материала (древесины) после выгорания летучих компонентов; тление мелкодисперсных или мелкоячеистых материалов, содержащих в своем составе летучие вещества; тление мелкодисперсного углерода (без летучих). Для первого вида тлеющего горения теплоотвод превышает тепловыделение, что приводит после завершения пламенного горения к быстрому прекращению тления, если тлеющие поверхности не экранируют друг друга и не снижают теплопотери. Второй вид тлеющего горения характеризуется большими величинами реакционной поверхности горения и сравнительно небольшими значениями теплоотвода из внутренних слоев горючего. При этом значительная часть тепла отводится за счет испарения и пиролиза летучих ком-

понентов. Лимитирующей стадией процесса тлеющего горения второго и третьего вида является процесс диффузии кислорода к внутренним слоям горючего.

В качестве импульса для нагревания и воспламенения целлюлозных материалов могут служить тепловые, химические и микробиологические процессы. Тепловой импульс реализуется тремя способами: теплопроводностью (кондукцией) — при непосредственном соприкосновении материала с источником тепла; радиацией — при воздействии лучистого тепла от источника нагрева; конвекцией — при передаче тепла материалу посредством воздуха или иного газа, находящегося в движении. Основными видами источников теплового импульса являются: открытое пламя, нагретая поверхность, искра. Кроме перечисленных видов источников зажигания для целлюлозных материалов следует упомянуть и самовозгорание как маломощный источник зажигания, в результате воздействия на материал теплового, а также химического и микробиологического видов источников нагревания и воспламенения горючих сред [4, 5]. Следовательно, тление возможно при воздействии на горючие материалы источников различной мощности, а возникновения пожара от маломощного источника без процесса тления как промежуточной стадии пожара перед пламенным горением быть не может.

В этой связи представляет интерес остановиться на зажигании маломощным источником (см. Методическое пособие «Исследование пожаров, связанных с источником малой мощности (в виде тлеющего табачного изделия)», разработанного Испытательной пожарной лабораторией МЧС России г. Красноярск).

Пожарная опасность тлеющих табачных изделий определяется температурой и временем тления, которые зависят в основном от теплофизических свойств табачных изделий и подвода воздуха в зону тления. Сигареты высшего качества, содержащие до 100% масс. льняного волокна, обладают высокой тлеющей способностью — длительность тления $18\text{--}27$ мин. Сигареты второго сорта и папиросы тлеют всего $4\text{--}5$ мин. Температура в зоне контакта $380\text{--}530^{\circ}\text{C}$. Сравнивая эти данные с показателями пожарной опасности материалов целлюлозы, например древесины сосны (температура воспламенения 390°C , температура воспламенения 250°C [1, 6]), можно предположить, что ее зажигание от источника малой мощности возможно при благоприятных условиях теплообмена.

Время возникновения горения для различных твердых материалов при контакте с тлеющими табачными изделиями колеблется в широком диапазоне — от 3 до 120 мин. Например, опилки, в зависимости от наличия или отсутствия воздействия воздушного потока, воспламеняются через $20\text{--}50$ мин, а стружка упаковочная или бумага — через $2\text{--}35$ мин.

Отличие химического и микробиологического импульсов от теплового заключается в том, что при их воздействии начальными условиями для выделения тепла являются хи-

мическая реакция, физико-химический процесс или жизнедеятельность бактерий, микробов, микроорганизмов. В дальнейшем (при температуре свыше 100°C) при самонагревании и химический, и микробиологический импульсы реализуются при благоприятных условиях аккумуляции тепла в веществе (материале) как тепловой и приводят к их самовозгоранию.

Всякое горение начинается со стадии возгорания или самовозгорания, а затем переходит в собственно горение. Для большинства целлюлозных и растительных материалов помимо возгорания в мелкодисперсном состоянии при развитой поверхности и в больших скоплениях характерным является процесс самонагрева и самовозгорания. Возгорание целлюлозных материалов в большинстве случаев сопровождается появлением пламени, представляющим собой светящуюся газовую оболочку, в которой происходит экзотермическая реакция взаимодействия горючих газообразных продуктов разложения материала с кислородом воздуха. Пламя излучает большое количество энергии, что играет важную роль в распространении огня. Если при разложении материала выделяется недостаточное количество паров и газов (характерно в определенных условиях для пористых целлюлозных материалов), он будет гореть без пламени, непосредственно на поверхности (процесс тления).

В процессе нагрева целлюлозных материалов до температуры воспламенения их разложение осуществляется ступенчато. При 110°C целлюлозные материалы высыхают и начинают выделять летучие вещества. При $110\text{--}150^{\circ}\text{C}$ наблюдается пожелтение этих материалов и более сильное выделение летучих веществ. При $150\text{--}210^{\circ}\text{C}$ целлюлозные материалы в результате обугливания получают коричневую окраску. При $210\text{--}280^{\circ}\text{C}$ они выделяют большое количество газообразных продуктов, воспламеняющихся на воздухе [1].

На процесс горения материалов оказывают влияние их физические свойства: объемная масса, теплопроводность, теплоемкость, а также такие факторы, как дисперсность, влажность, соотношение между реагирующей поверхностью и объемом или массой материала, положение его в тепловом потоке, скорость воздушного потока или тяга, степень аккумуляции тепла при горении [2–5].

В работах [2, 3, 5] рассмотрена феноменология процесса тления. Исследуется процесс тления газопроницаемого слоя с образованием в нем карбонизированной углистой и смолистой массы, являющейся основным горючим компонентом тлеющего материала, энергия сгорания которого обеспечивает в нем протекание всех других процессов термической и термоокислительной деструкции.

В связи с тем, что образовавшаяся карбонизированная масса обладает пониженной газопроницаемостью, продукты пиролиза через слой еще не карбонизированного (газопроницаемого) слоя попадают в пограничную с очагом тления (не менее 630 K) около очага тления в газопроницаемых слоях возникает поток естественной конвекции,

благодаря которому около поверхности очага тления образуется гидродинамический пограничный слой. В этих условиях очаг тления (нагретые продукты пиролиза) омывается окислительной газовой средой, что обеспечивает за счет конвективной диффузии доставку окислителя с периферии к поверхности очага тления. В нагретой смеси возникают экзотермические реакции окисления продуктов пиролиза, вследствие чего вокруг очага образуется высокотемпературная оболочка, термостатирующая весь очаг тления. Поскольку для постоянного существования термостатирующей оболочки необходима непрерывная поставка в зону смешения газообразных продуктов пиролиза и окислителя, пиролиз можно считать лимитирующим процессом в распространении зоны тления внутри массива мелкодисперсного газопроницаемого слоя. Следовательно, фронт тления обусловлен взаимосвязанными процессами, что обеспечивает его продвижение в компактном состоянии (без расширения и утончения) и будет характеризовать скорость распространения тления. При изменении газодинамических условий процесса тления волна тления может изменять направление, и профиль ее движения может приобретать причудливые формы в виде пальцев (finger) [9, 10].

Характер распределения температур в материале в период его подготовки к горению служит одним из дополнительных доказательств, позволяющих различать процессы возгорания и самовозгорания. При возгорании более высокие температуры создаются на поверхности материала в месте действия источника зажигания, с тенденцией распространения пламени внутрь его массы. При самовозгорании наблюдается обратный процесс: внутри массы продукта температура выше, чем на его поверхности. Если для процесса возгорания целлюлозных и растительных материалов решающим фактором является источник зажигания, удовлетворяющий определенным требованиям, то для процесса самовозгорания основное значение приобретают факторы аккумуляции тепла в массе скопления материала и диффузии окислителя к очагу самовозгорания.

В области сравнительно невысоких температур (ниже 200°C), при которых происходит тепловое самовозгорание целлюлозных материалов, интенсивность выделения тепла, передаваемого от источника нагревания материалу, не обеспечивает достаточной скорости разложения и окисления материала с поверхности, необходимой для самовозгорания. Это достигается лишь в результате активизации медленных процессов термической и термоокислительной деструкции, происходящих внутри массы материала, в которой создаются более благоприятные условия для накопления тепла в результате экзотермических реакций [4, 5]. Поэтому увеличение массы материала повышает вероятность его самовозгорания вследствие лучшей теплоизоляции очага. В монографии [4] приводятся расчетные данные критической температуры при хранении и транспортировании некоторых видов материалов растительного

происхождения, в частности сена и силоса. Для малого объема насыпей этих материалов температура самовозгорания равна 139–152°C, для большого объема (вагон, штабель) — не ниже 72°C.

Для самонагревающегося материала период времени с момента повышения температуры до температуры окружающей среды и достижения самовозгорания может быть достаточно велик. Объясняется это условиями накопления тепла в твердом теле [4, 5], а также весьма низкими скоростями распространения волны тления, которые могут составить от 10^{-3} до 10^{-6} м/с [2]. Такой разброс значений скорости объясняется тем, что она зависит от многих факторов: плотности, дисперсности, влажности материала, наличия и скорости окисления газовой среды, пространственной ориентации образца, равномерности его нагревания (симметричный или не симметричный) и др. В работе [2] с учетом известных литературных данных о физико-химических свойствах целлюлозных материалов представлены номограмма и таблица значений скорости распространения зоны тления в зависимости от значений предэкспоненциального множителя и энергии активации этого процесса. Показано снижение расчетного значения скорости распространения зоны тления во фронте очага тления внутри массива газопроницаемого целлюлозного материала с увеличением энергии активации при заданном значении предэкспоненциального множителя. Данные расчетов и номограммы укладываются в диапазон известных из литературы данных о скорости распространения зоны тления и могут быть использованы в расчетах этого показателя при известных физико-химических и кинетических параметрах исследуемого горючего материала, склонного к самовозгоранию.

Повышение температуры в материале при самонагревании и самовозгорании может прекратиться и даже начать падать в случае уравнивания скоростей выделения и рассеивания (диссипации) тепла или превышения второй скорости над первой. В таких условиях начавшиеся в материале реакции окисления завершаются лишь самонагреванием без перехода в самовозгорание [2, 4, 5].

Результаты экспериментальных исследований процессов тления и самовозгорания растительных материалов

Образование очага тления обусловлено аккумуляцией тепла и доступом окислителя в благоприятном для этого месте. Внутри насыпи очаг может иметь вид сферы или пласта (горизонтального, наклонного, вертикального). Расположение его (ближе к поверхности насыпи, в глубинных или пристеночных местах) также обусловлено теплообменом и поступлением окислителя.

Схематически различные варианты подготовки условий и развития очагов тления в хранилищах растительного сырья (силосы и бункеры объемом до нескольких тысяч кубов), провоцирующие взрыв, представлены в работе [5].

Сферический очаг может возникать в любой части насыпи. Предпосылкой к его образованию могут служить: локальные скопления влажной массы продукта или участки с повышенным содержанием гнилостных примесей и, следовательно, микроорганизмов; совместное нахождение резко разнородных по своей природе материалов; жизнедеятельность микроорганизмов, скопление насекомых и клещей на одном участке.

Пластовый очаг в виде вертикального (шурфа) или горизонтального слоя возникает в верхней, нижней или боковой частях хранилища. Верховой очаг характеризуется появлением греющегося слоя продукта на глубине 70–150 см от поверхности зерновой массы и чаще всего наблюдается осенью или весной, когда имеется большой градиент температур в ночное и дневное время, приводящий к образованию конденсата и увлажнению продукта в поверхностных слоях. Низовой очаг развивается горизонтальным пластом в нижней части хранилища и обусловлен, при наличии некондиционного зерна, потоком воздуха, вызываемого тягой через неплотности в зерновой массе и разгрузочный люк бункера. Причиной вертикально-пластового очага является обогрев и охлаждение наружной стены хранилища или передача тепла от соседнего хранилища, а также залегание продукта на стенках в течение длительного периода.

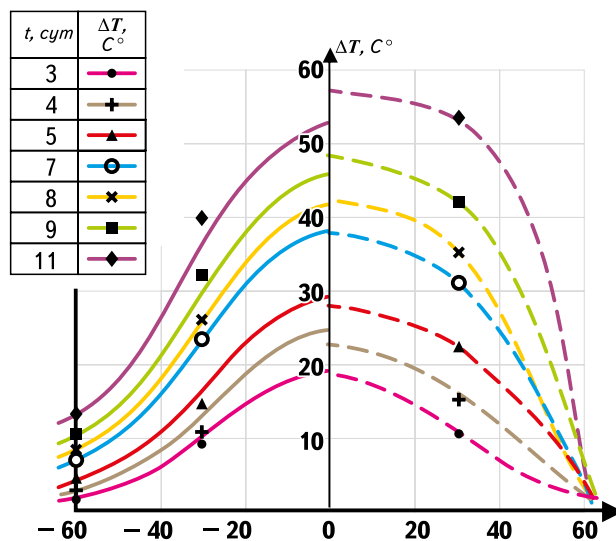
Скорость реакции в материале мелкодисперсного состояния складывается из скоростей на различных участках поверхности внутреннего объема тел, характеризующихся различной степенью доступности к ним кислорода, поставляемого диффузией из окружающей среды. Строгая математическая формулировка самовоспламенения пористых материалов базируется на одновременном учете переноса тепла и вещества, и для анализа процесса в этом случае необходимо рассматривать решение системы из двух уравнений: уравнения теплопроводности и уравнения диффузии [5]. Можно считать, что в процессе реакции окисления продукта концентрация кислорода внутри пористых тел (за пределами частиц или в порах) остается неизменной в течение всего процесса химического превращения, вплоть до момента самовоспламенения. Иначе говоря, расходование компонентов в процессе реакции горения не зависит от распределения концентрации кислорода в насыпи и определяется только скоростью реакции.

Представляют интерес исследования, выполненные на лабораторной установке [5], на которой сквозь нагретый до заданной температуры продукт (травяная мука, хлопковый шрот) пропускали с определенной скоростью (1, 24 и 60 л/с) воздух или азот и отбирали пробы на хроматографический анализ (прибор «Газохром 3101») по газам: O_2 , N_2 , CO , CO_2 , CH_4 . В ходе эксперимента реакционный сосуд заполняли над сеткой продуктом с контролируемой плотностью, сосуд нагревали со скоростью 1°C/мин и отбирали пробы в диапазоне температур от 20 до 600°C через каждые 50°C.

Результаты показали, что при одной и той же скорости потока (60 л/с) в азотной атмосфере при термическом разложении растительного сырья в небольших количествах образуется лишь оксид углерода при температуре выше 250°C, в то время как в потоке воздуха при температуре 250°C и выше образуются все анализируемые горючие газы в концентрациях, существенно превышающих концентрацию CO в потоке азота. Эти данные свидетельствуют о том, что диффундирующий к очагу тления воздух играет определяющую роль в процессе окисления. Кислород, который входит в состав растительных материалов, также участвует в термическом разложении продуктов. Однако выход продуктов разложения весьма мал, и кислород из элементного состава целлюлозных материалов в реакциях термического и термоокислительного разложения не может конкурировать с кислородом воздуха, которого существенно больше, чем в составе вещества (материала), и в среде которого протекают процессы тления.

Анализ представительных данных, полученных в полигонных опытах на установке вместимостью 35 м³ по исследованию температурных полей и полей газовой выделенности при образовании очага самонагрева и его развитии в течение 11 суток, позволил использовать их в решении практических задач для обоснования сроков хранения зерна и комбикормов в зависимости от интенсивности тепловыделения очагов самонагрева [5]. Результаты экспериментов сопоставлены с расчетом в предположении о распространении тепла от очага путем теплопередачи, в основном за счет теплопроводности [5]. При пластовом очаге решается задача с плоским источником тепловыделения, удельная интенсивность которого является непрерывной функцией координаты: $q = q(x)$. При гнездовом очаге нахождение температурных полей сводится к симметричной задаче. Хорошее совпадение расчетных значений температур с экспериментальными данными в случаях пластового и гнездового очагов позволяют считать выбранную модель расчета верной. Вместе с тем изображение полей температуры в крупномасштабных экспериментах для пластового очага, показанное на рисунке, получилось несимметричным относительно центральной оси, и со временем с повышением температуры расчетная кривая в очаге заметно расходится с экспериментальной [5]. Это обстоятельство является следствием усиления роли конвекции при самовозгорании в реальных очагах с течением времени с момента образования очага и с ростом температуры, вызванной градиентом температур между нижним и верхним слоями насыпи продукта.

На основе математической модели процесса самонагрева, которая подтверждается экспериментальными данными, решена задача определения скорости распространения температурного фронта в растительном сырье. Под скоростью распространения температурного фронта понимается скорость движения некоторой фиксированной температуры в объеме насыпи в направлении распространения теплового потока.



Температурные поля при пластовом очаге самовозгорания (сплошные линии — расчет, пунктирные — эксперимент)

Для пластового очага как наиболее опасного при самовозгорании численно решалась задача нахождения размера области R_F , внутри которой температура выше некоторой критической T_{F^*} , то есть $T(x, t) > T_{F^*}$. В результате решения системы уравнений с граничными условиями [5] получены временные зависимости роста размера области $|x| \leq R_F$, внутри которой температура $T(x, t) \geq T_{F^*}$ для различных значений T_{F^*} , интенсивностей тепловыделений и характерных размеров очага.

Номограммы роста размера очага травяной муки с начальной температурой $T_0 = 0^\circ\text{C}$ составлены при различных значениях удельной интенсивности тепловыделения q_0 для характерной толщины пластового очага $2R = 0,5 \text{ м}$. В качестве граничных температур счета были выбраны значения: $T_F = 35^\circ\text{C}$ (наиболее благоприятная температура для жизнедеятельности микроорганизмов), $T_F = 100^\circ\text{C}$ (температура, соответствующая началу газовой выделенности) и $T_F = 250^\circ\text{C}$ (температура в центре очага, соответствующая температуре тления). С течением времени рост размера очага приобретает стационарный характер, поэтому скорость роста очага определяется по тангенсу угла наклона прямолинейного участка кривой.

Оценочные расчеты показывают, что скорость продвижения фронта температур в очаге составляет приблизительно 0,4 см/мин ($6,6 \cdot 10^{-4} \text{ м/с}$) и находится в диапазоне, указанном в литературном источнике [2]. Качественные изотермы вокруг и в очаге тления травяной муки объемом около 15 м³ в периоды самонагрева, самовозгорания, тления и горения травяной муки в полигонной установке вместимостью 35 м³ [5] показывают, что очаг развивался в нижнюю зону в сторону разгрузочного бункера (температура в нижней части экспериментальной установки была выше, чем в верхней зоне) навстречу потоку воздуха.

С изменением температуры в очаге изменялся состав и количество выделяющихся в процессе тления газов. ➔

При температуре до 200°C выход горючих газов регистрируется в незначительных количествах. Образование стабильного очага горения приводит и к стабилизации газовой выделения, а уменьшение содержания кислорода в нем до 1% (об.) не вызывает его самозатухания. Подтверждением этого служит то, что образовавшийся очаг сохранял температуру до 260°C в течение пяти суток без каких-либо внешних воздействий, а количество выделяющихся горючих газов не изменялось.

Толчком к развитию тления и росту температуры стала подача воздуха в центральную часть насыпи с расходом 30 л/с в течение одного-двух часов, что привело в области очага к увеличению содержания водорода до 20% (об.), оксида углерода — до 11% (об.), метана — до 14% (об.).

Анализ динамики изменения температуры в насыпи травяной муки в полигонной установке свидетельствует о градиенте температур в узкой области вблизи расположения очага тления (от 160–200°C до 400–600°C). О локальном характере процессов термического разложения продукта можно судить по отсутствию значительного газовой выделения из верхнего слоя насыпи.

Периодическая подача воздуха в очаг тления привела к устойчивому его горению с температурой 800°C. При этом объем очага вырос с 1 м³ до 15 м³.

Теплота сгорания горючих материалов в режиме тления реализуется не полностью, поэтому с точки зрения теплового воздействия на окружающую среду она существенно ниже, чем при пламенном горении. Вместе с тем неполное сгорание материалов при тлении ведет к образованию весьма токсичных и горючих продуктов термоокислительной и термической деструкции. При этом на пожаре возникают пробежки пламени уже погашенного материала и общая вспышка, которые приводят к повторному возобновлению пожара или возникновению взрыва. Опасность тлеющего горения дополняется его относительной скрытностью [4, 5]. Как уже отмечалось [2, 4, 5, 8], скорость распространения тлеющего очага весьма низкая. Зачастую он залегает в глубине насыпи дисперсной массы, и пожар определяется тогда, когда очаг становится значительных размеров или выходит на поверхность насыпи.

Эффективность пожаротушения тлеющих компактных и дисперсных веществ и материалов различается [8]. Для компактного материала, например древесины, тушение достигается при изоляции тлеющего материала от атмосферного кислорода воздуха различными огнетушащими составами (вода, водопенные или порошковые составы). Основная сложность тушения дисперсных материалов — необходимость подавления вяло протекающих процессов тления в условиях пониженного, по сравнению с атмосферным, содержания кислорода воздуха внутри слоя материала. Такое горение поддерживается довольно длительное время не только кислородом воздуха, находящимся в порах, но и кислородом, структурно связанным в молекуле вещества (материала).

Сложность и низкая эффективность тушения таких материалов обусловлены размерами очага и условиями поступления кислорода в зону реакции. Успешные действия по тушению очагов горения, залегающих в глубине насыпи, могут быть достигнуты при охлаждении очага и его удалении из насыпи дисперсного материала.

Главное отличие в тактике тушения пожаров на предприятиях отрасли хлебопродуктов, при возникновении очагов в хранилищах силосного типа, заключается в том, что время тушения не является определяющим параметром. К тому же применение традиционных средств, в частности воды, водопенных составов низкой и средней кратности, в таких случаях может оказаться неприемлемым.

Важной стадией пожаротушения является подготовительная, которая может длиться часами и даже днями; в этих условиях отсутствует привычный ритм работы пожарных. Основная задача заключается в том, чтобы как можно быстрее выгрузить продукт из силосов и бункеров и при этом исключить создание взрывоопасной ситуации.

Литература

1. Таубкин, С.И. Основы огнезащиты целлюлозных материалов / С.И. Таубкин — М: МКХ РСФСР, 1960. — 347 с.
2. Баратов А.Н. Горение на пожаре / А.Н. Баратов, И.С. Молчадский — М.: ВНИИПО, 2011. — 502 с.
3. Мелихов, А.С. Модель распространения фронта тления внутри мелкодисперсного газопроницаемого материала и условий тушения очага тления / А.С. Мелихов, А.Н. Баратов, Л.П. Вогман [и др.]. // Тезисы докладов XXI Международной науч.-практ. конф. «Актуальные проблемы пожарной безопасности», — М.: ВНИИПО, 2009. — С. 35–40.
4. Горшков, В.И. Самовозгорание веществ и материалов / В.И. Горшков — М: ФГУ ВНИИПО МЧС России, 2003. — 444 с.
5. Вогман, Л.П. Пожарная безопасность элеваторов / Л.П. Вогман, В.И. Горшков, А.Г. Дегтярев — М: Стройиздат, 1993. — 298 с.
6. Пожарная опасность веществ и материалов и средства их тушения. Справочник в 2 томах / под ред. Баратова А.Н. и Корольченко А.Я. — М.: Химия, 1990.
7. Таубкин, С.И. Справочник пожароопасности твердых веществ и материалов / С.И. Таубкин, А.Н. Баратов, Н.С. Никитина — М.: МКХ РСФСР, 1961. — 148 с.
8. Бухтояров, Д.В. Тлеющее горение: особенности. Модельный очаг / Д.В. Бухтояров, С.Н. Копылов, А.В. Казаков, А.В. Попов // Пожарная безопасность. — 2008. — №3. — С. 63–67.
9. Алдушин, А.П. Фингер — эффект при фильтрационном горении / А.П. Алдушин, Б.Ш. Браверман // Тезисы докладов XIV Симпозиума по горению и взрыву, — Черногловка: РАН, 2008. — С. 11.
10. Салганский, Е.А. Пиролиз полимерных материалов в зоне фильтрационного горения / Е.А. Салганский, Е.В. Полианчук, Г.Б. Манелис // Тезисы докладов XIV Симпозиума по горению и взрыву, — Черногловка: РАН, 2008. — С. 160. ■