

УДК 614.841.11

ОСОБЕННОСТИ РАЗВИТИЯ ПОЖАРА В ЗАМКНУТЫХ ПОМЕЩЕНИЯХ ЖИЛЫХ И АДМИНИСТРАТИВНЫХ ЗДАНИЙ*канд. техн. наук О.Г. ЛИСИЦЫНА, С.Н. БАРДУШКА**(Институт переподготовки и повышения квалификации МЧС Республики Беларусь, пос. Светлая Роца)*

Отмечена недостаточная изученность процессов, характерных для закрытых пожаров. Рассмотрена динамика процессов, протекающих при возникновении пожара в закрытом помещении. Представлена методика расчетов с использованием программы Excel основных показателей процесса горения, выявлены проблемы, возникающие перед спасателями при ликвидации чрезвычайных ситуаций такого вида.

Процесс горения (пожара) в закрытых помещениях проходит через ряд стадий, которые по отношению к количеству имеющегося для протекания реакции окисления кислорода можно разделить на следующие:

- при избытке кислорода;
- при стехиометрическом соотношении;
- при недостатке кислорода.

Горение на этих стадиях будет проходить различно и по дымообразованию, и по количеству выделяемого тепла, и по объему пламени, и по скорости его распространения и т.д.

В литературных источниках пожары в жилых, административных и торговых помещениях (кроме подвалов) чаще всего рассматриваются как процессы горения с избытком кислорода. Это обусловлено тем, что после вскрытия остекления при температуре около 350...400 °С дальнейший процесс рассматривается как протекающий при избытке воздуха, который зависит от величины оконных и дверных проемов.

Горение же при недостатке кислорода рассматривается только с точки зрения образования продуктов неполного сгорания, хотя действительная картина, происходящая при этом, намного сложнее.

В настоящее время сильно изменилась устойчивость строительных материалов к тепловому воздействию, в том числе изменилась и устойчивость остекления. Современные массово выпускаемые стеклопакеты с гелевыми наполнителями, полимерными пленочными покрытиями гарантированно могут выдерживать стандартный температурный режим, принятый для пожара, без потери целостности и герметичности минимум 15 минут (нижний класс пожаростойкости EI 15) [1]. Быстро растет количество помещений с остеклением из подобных стеклопакетов. Одновременно с этим происходит увеличение массы горючей загрузки, плотности ее размещения. Пожар в таких условиях может отличаться в развитии от стандартно принятого (вскрытие остекления и переход в открытый пожар).

Рассмотрим процессы, которые будут протекать в помещении, со стандартной горючей загрузкой (только деревянные изделия), если в помещении окна и двери, выполненные из современных материалов, выдерживают температуру до 600 °С и пожар возник в отсутствие людей (окна и двери закрыты).

Если принять стандартную комнату в квартире площадью 18 м² и высотой 2,8 м, то количество содержащегося в ней кислорода станет равным $18 \cdot 2,8 \cdot 0,21 = 10,58$ (м³). Для окончания пламенного горения необходимо, чтобы прореагировало 3,53 м³ кислорода, т.е. остаточная концентрация кислорода снизилась до 14 %.

Горючая загрузка в комнате представлена:

- письменным деревянным (древесностружечный материал) столом массой 30 кг;
- шкафом платяным (100 кг);
- диваном, имеющим деревянные элементы, массой 65 кг;
- стульями мягкими (2 штуки по 5 кг каждый);
- коврами изделиями на полу и стенах общим весом 40 кг,
- полкой с книгами около 20 кг, столом журнальным или тумбочкой под телевизор – 15 кг [2].

Общая масса деревянных изделий составит 280 кг, горючая нагрузка равна 15,55 кг/м², или $15,55 \cdot 14,1 = 219,3$ МДж/м² (с учетом полимерных и иных горючих материалов пожарная нагрузка достигает 577 МДж/м²) [3].

Предположим, произошло возгорание письменного стола от неисправной электролампы, стоящей на краю стола (рисунок). В первые секунды поверхность горения имеет форму круга, фронт горения распространялся симметрично от центра возникновения горения, так как отсутствует направленное движение воздушной массы извне (сквозняк, ветер). По достижении края стола пламя распространялось в длинную сторону стола (приняли стандартный размер стола 0,8×1,2).

Воспользуемся следующими табличными значениями величин [4]:

- массовая скорость выгорания мебели: $v_m = 0,0135$ кг/м²·с;
- линейная скорость распространения пламени по мебели: $v = 0,0154$ м/с;
- потребление кислорода при горении древесины – 1,288 кг/кг,
- выделение монооксида углерода – 0,0367 кг/кг;
- образование диоксида углерода – 1,55 кг/кг;
- теплотворная способность деревянных материалов – 14,1 МДж/кг.

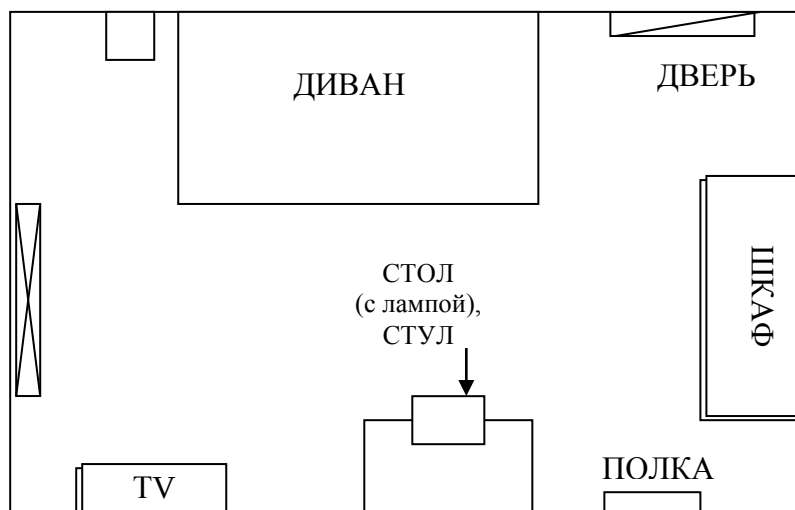


Схема расположения горючей загрузки в помещении

Для расчетов использовали программу Excel следующим образом.

В столбце А – время горения от начала пожара (τ), с, (шаг контроля основных показателей через 10 с).

В столбце В – радиус поверхности, охваченной горением r , м (где $r = A \cdot v$ [= 00154*A1]).

В столбце С – площадь горения $S = \pi r^2$, м², [=СТЕПЕНЬ (В1;2)*3,14*0,25], начиная с 50 секунд было учтено, что фронт горения распространяется только по длине стола и расчет площади горения производили по формуле: [= 0,154*0,8 + С5]. Начиная с 90 секунды, площадь горения считаем ограниченной поверхностью стола, пренебрегая увеличением площади за счет движения вниз, а учитывая это лишь при расчете массы выгоревшего материала.

В столбце D – масса выгоревшего материала за каждые 10 секунд с учетом роста поверхности горения, m_{10} , кг, [= C1*10*0,0135] и т.д.

В столбце E – масса выгоревшего материала за время горения от начала пожара, m , кг, [E1], а затем [= E1 + D2] и т.д.

В столбце F – количество выделившегося тепла при горении стола на данный момент от начала пожара, Q , МДж, [= 14,1*E1] и т.д.

В столбце G – масса выделившегося монооксида углерода за время пожара на данный момент времени, $m(\text{CO})$, кг, [= 0,0367*E1] и т.д.

В столбце H – объем монооксида углерода, выделившегося при горении стола за время от начала пожара $V(\text{CO})$, м³, [= G1*22,4/28].

В столбце I – масса кислорода, пошедшего на горение стола от начала пожара, $m(\text{O}_2)$, кг, [= 1,288*E1].

В столбце J – объем кислорода, пошедшего на горение стола от начала пожара, $V(\text{O}_2)$, м³, [= I1*22,4/32].

В столбце K – масса диоксида углерода, образовавшегося при горении стола от начала пожара, на данный момент времени, $m(\text{CO}_2)$, кг, [= 1,55*E1].

В столбце L – объем диоксида углерода, выделившегося при горении стола на данный момент времени, $V(\text{CO}_2)$, м³, [= K1*22,4/44].

В столбце M – тепловой поток от пламени на находящийся через два метра предмет – журнальный столик, Q , Вт, [= 5,67*(СТЕПЕНЬ(1080/100; 4) – СТЕПЕНЬ((273 + N1)/100; 4))*0,85].

Выражение было составлено на основе применения зависимости теплообмена между двумя телами, произвольно расположенными в пространстве [5]:

$$Q = 5,67\varepsilon \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right],$$

где T_1 и T_2 – температуры поверхности пламени и нагреваемого столика.

Так как в большинстве случаев поглощение лучистой энергии происходит в тонких поверхностных слоях твердых тел, то теплообменом излучением внутри этих тел мы пренебрегаем. Далее рассматривали процесс как стационарный в данные 10 с, а затем скачком изменяющийся с использованием температуры окружающей среды по прошествии 10 с горения. Таким образом, можно принять рассмотрен-

ный нами процесс как динамический. Температура каждого предмета в комнате, его поглощательная и отражательная способности предполагаются одинаковыми во всех точках поверхности, одинаково удаленных от фронта пламени.

В столбце N – средняя температура в помещении в результате выделившегося при горении стола тепла с учетом теплоемкости и объема образовавшихся продуктов горения T, K:

$$[= 20 + F1*1000*0,6/(L1*1,5998 + 1,2992*N1 + (10,584 - J1)*1,3059 + 39,816*1,2981 + E1*0,06*22,4*1,495/2)].$$

Результаты изменения контролируемых величин

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
10	0,2	0,019	0,003	0	0,04	9E-05	7E-05	0,0032	0,002	0,004	0,002	65212	20,32
20	0,3	0,074	0,01	0,01	0,18	5E-04	0,0004	0,0162	0,011	0,019	0,01	65205,6	21,62
30	0,5	0,168	0,023	0,04	0,5	0,001	0,001	0,0453	0,032	0,055	0,028	65191	24,54
40	0,6	0,298	0,04	0,08	1,06	0,003	0,0022	0,0971	0,068	0,117	0,059	65164	29,72
50	0,8	0,465	0,063	0,14	1,95	0,005	0,0041	0,178	0,125	0,214	0,109	65119	37,81
60	0,9	0,589	0,079	0,22	3,07	0,008	0,0064	0,2804	0,196	0,337	0,172	65057	48,01
70	1,1	0,712	0,096	0,31	4,42	0,012	0,0092	0,4042	0,283	0,486	0,248	64973,9	60,31
80	1,2	0,835	0,113	0,43	6,01	0,016	0,0125	0,5494	0,385	0,661	0,337	64864,5	74,68
90	1,2	0,96	0,13	0,56	7,84	0,02	0,0163	0,7163	0,501	0,862	0,439	64721,4	91,14
100	1,2	0,96	0,13	0,69	9,67	0,025	0,0201	0,8832	0,618	1,063	0,541	64558,3	107,5
110	1,2	0,96	0,13	0,82	11,5	0,03	0,0239	1,0501	0,735	1,264	0,643	64373,5	123,8
120	1,2	0,96	0,13	0,94	13,3	0,035	0,0277	1,2171	0,852	1,465	0,746	64165,5	140,1
130	1,2	0,96	0,13	1,07	15,2	0,039	0,0315	1,384	0,969	1,666	0,848	63932,5	156,3
140	1,2	0,96	0,13	1,2	17	0,044	0,0354	1,5509	1,086	1,866	0,95	63672,9	172,4
150	1,2	0,96	0,13	1,33	18,8	0,049	0,0392	1,7178	1,202	2,067	1,052	63384,8	188,4
160	1,2	0,96	0,13	1,46	20,6	0,054	0,043	1,8848	1,319	2,268	1,155	63066,6	204,3

Приняли, что на повышение среднеобъемной температуры пошло 60 % выделившегося тепла, и верхняя поверхность стола принимает среднеобъемную температуру продуктов горения.

Таким образом, заложили контроль над изменением основных параметров: содержанием кислорода, диоксида углерода, образованием монооксида углерода, количеством выделившейся теплоты при сгорании данной массы деревянного стола с учетом роста площади поверхности, охваченной пламенем, с шагом, равным 10 с. Нашли, что по истечении 20 мин при данной массовой скорости выгорания сгорит 13,6 кг стола (т.е. стол сгорит ещё не полностью), а через 350 с (5,8 мин) горения концентрация кислорода снизится до 14 %, затем процесс пламенного горения прекратится и перейдет в тление.

По окончании пламенного горения стола, к тому моменту, когда концентрация кислорода снизится до 14 %, (сгорит 3,92 кг стола, теоретическая температура в помещении достигнет более 800 °С, если принять, что тепло, пошедшее на нагревание газов, равно общей теплоте, выделившейся при сгорании стола, за вычетом тепла, пошедшего на тепловое излучение, то тогда температура будет равна 490 °С. Такая температура в помещении дает возможность протекать вторичной реакции между обуглероженной поверхностью стола и диоксидом углерода, накопившимся в атмосфере помещения в результате процесса горения. Кроме того, продолжает происходить процесс тления – этого сложного, до конца не изученного процесса, с выделением тепла, со скоростью тления (обугливания), максимально равной $1,7 \cdot 10^{-3}$, средней $1,0 \cdot 10^{-3}$ см/с [6].

По проведенным нами расчетам на расстоянии 2 м от горящего стола температура на поверхности деревянного изделия достигает 200 °С по истечении 4,5 мин; на расстоянии 3 м по истечении 7 мин; на расстоянии 4 м по истечении 10,5 мин (если бы до этого времени продолжалось бы пламенное горение, но так как процесс перешел в тление, рост температуры на поверхности удаленных предметов будет происходить по другим зависимостям).

Определили, что по истечении 12 мин температура на всех деревянных поверхностях, которые не экранированы от прямого попадания на них теплового излучения от пламени, будут подготовлены для воспламенения при достаточном количестве кислорода.

При воздействии теплового потока на изделия из древесины она воспринимает теплоту и нагревается. При нагревании до 110 °С начинает происходить обезвоживание древесины и уже в незначительном количестве начинают выделяться смолистые продукты. Заметный пиролиз древесины начинается со 130 °С; при 150 °С начинает изменяться цвет древесины. До 200 °С продукты разложения древесины состоят в ос-

новном из паров воды и диоксида углерода. Деревянные лакированные изделия из древесины ведут себя подобным образом, а именно: происходит обезвоживание деревянного изделия, а пары воды и диоксида углерода, покидая массу древесины, вспучивают лакокрасочное покрытие, и в зависимости от вида лакокрасочного покрытия оно также начинает разлагаться с выделением соответствующего мономера.

По истечении указанного времени (250 с) плюс индукционный период, на достаточно глубокое обезвоживание, начинает разлагаться клетчатка. Выделяющиеся при этом газы содержат в достаточном количестве монооксид углерода, водород, пары иных органических горючих веществ. Выделяющиеся горючие газообразные продукты начинают накапливаться до концентрации, как минимум равной нижнему концентрационному пределу возгорания хотя бы по одному из горючих компонентов. Выход горючих веществ при температуре воздействия около 270 °С достигает 40 %, при 400 °С выход достигает 70 %.

Рассмотрим более подробно, что происходит при нахождении деревянных изделий в помещении при температуре, близкой к 400 °С.

При действии на древесину высокой температуры в зависимости от конкретных условий происходят различные процессы:

- сухая перегонка или пиролиз древесины при нагревании без доступа воздуха;
- энергохимическая переработка древесины в условиях ограниченного доступа воздуха.

При температуре 275...450 °С происходят главные реакции распада веществ, составляющих древесину. При температуре 270...280 °С начинается экзотермический распад древесины. Количество теплоты, выделяемой при экзотермических реакциях распада, достаточно для практического проведения процесса до конца без подогрева извне при условии исключения потерь тепла в окружающую среду. При такой и несколько выше температуре реакции распада сопровождаются выделением большого количества СО и СО₂ и жидкого дистиллята, содержащего вначале уксусную кислоту, ее гомологи и метанол, а под конец – смолы.

Завершающая стадия происходит при температуре 450...550 °С с удалением остатка летучих веществ.

Продукты термического разложения древесины: древесный уголь, жидкий дистиллят и газы. Выход основных продуктов при пиролизе зависит от породы древесины и от вида полимерного материала, нанесенного на поверхность или склеивающего древесностружечную плиту.

В составе отстоявшейся жижи установлено более 60 органических соединений. Среди них: уксусная кислота, метиловый спирт, растворители – метилацетат и ацетон. Наибольшее количество этих веществ получается при пиролизе древесины лиственных пород. Смола состоит из продуктов термического разложения древесины, не растворимых в водном дистилляте, и представляет собой сложную смесь многих органических соединений. Наиболее важной частью древесных смол являются фенолы. Легкие масла с плотностью меньше 1 г/см³ составляют около 5 %. Креозотные масла имеют плотность выше единицы и в основном состоят из фенолов [7].

Газообразные продукты пиролиза в основном состоят из неконденсируемых газов. Состав газов, выделяющихся в процесс воздействия высокой температуры, представлен углекислым газом, окисью углерода, водородом, метаном, этиленом.

Эти вещества, в основном, и определяют условия воспламенения изделий из древесины. Одной их характеристик термического разложения вещества является квазистатический выход летучих, представляющий собой выход того или иного продукта термолиза при заданном температурном уровне процесса горения и длительной выдержке в бескислородном пространстве. Квазистационарный выход летучих может служить характеристикой процесса при относительно медленном его протекании, что и наблюдается при слабом выделении энергии во время тления в недостаточном количестве кислорода в помещении. Количество выделившихся продуктов зависит от их содержания в исходном материале и от скорости разрушения отдельных групп связей. При изотермических условиях суммарное количество летучих V , которое может выделиться к моменту времени τ , составит:

$$V = V_0 \sum C_{oi} \left[1 - e^{(1-k_i \tau_i)} \right], \quad (1)$$

где V_0 – суммарное количество летучих веществ, которое может выделиться к моменту полного завершения процесса термолиза; i – число групп реакций, учитываемых при описании процесса термолиза; C_{oi} – количественная характеристика определенной группы летучих, причем $C_{o1} + C_{o2} + \dots + C_{oi} = 1$; k_i – константа скорости соответствующей реакции разложения; считаем, что она подчиняется зависимости Аррениуса:

$$k_i = k_0 e^{\left(\frac{-E}{R \times T} \right)}. \quad (2)$$

Для описания процесса термоллиза чаще всего применяют одно- и двухкомпонентные схемы, при этом в уравнении (2) i принимают равным 1 или 2. Более точной считается многокомпонентная схема.

Температура воспламенения древесины колеблется в широких пределах и обусловлена такими факторами, как размеры и степень измельчения, скорость нагревания и удаления летучих продуктов. Самая низкая величина зафиксирована на уровне 190...230 °С.

С учетом этой величины (230 °С) и предположением, что потери тепла могут происходить только через ограждающие конструкции (для нашего стандартного помещения: $18 \cdot 2 + 43 = 79$; $\{18/5 = 3,6; 5 + 3,6 = 8,6; 8,6 \cdot 2 \cdot 2,5\} = 79 \text{ м}^2$), можно определить время в течение которого может продержаться температура в помещении без дополнительного подогрева, если имел место предварительный прогрев в результате сгорания стола до 400 °С.

Это время много больше 2-х часов, поэтому расчет количества выделившихся при пиролизе горючих веществ будем вести из расчета того, что пожарно-спасательное подразделение прибыло через 20 мин после возникновения пожара (с учетом времени на обнаружение соседями пожара и времени движения транспорта до места пожара). Подставляя в приведенные уравнения (1) и (2) соответствующие величины для древесины: $E = 32300 \text{ Дж/моль}$, температуру 270 °С и время 720 с (время между прибытием спасателей и прогревом деревянных изделий до температуры более 270 °С) и принимая максимальный выход летучих, равный 62 %, получаем:

$$V = V_0 \sum C_{oi} \left[1 - e^{(1-k_i \tau_i)} \right] = 62 \cdot 1 \cdot \left[1 - e^{(1-0,1043 \cdot 720)} \right] \approx 62 (\%)$$

Количество горючих компонентов равно 39 % от исходной массы древесины [8]. Считая, что при низкой теплопроводности древесины прогрелось не более 0,1 см по всем поверхностям деревянных предметов, и учитывая суммарную поверхность всех предметов из древесины в комнате, находим, что общее количество горючих веществ при пиролизе составит 17 кг.

С учетом выделившегося при горении древесины монооксида углерода получаем общую массу горючих, равную 17,5 кг. Что от общего количества газообразных веществ, находящихся в помещении, составит величину, превосходящую высшие концентрационные пределы по всем горючим веществам, выделяющимся при пиролизе древесины.

Температура самовоспламенения – низшая начальная температура, при которой в благоприятных условиях материал самопроизвольно разогревается, пока не вспыхнет. Она определяется, главным образом, теми условиями, при которых реакции разложения становятся экзотермическими. Для древесины это в среднем 270...280 °С.

Таким образом, проделанные расчеты показали, что общая картина при горении в отсутствии притока свежего воздуха приведет к накоплению в помещении комнаты горючих веществ, которые при вскрытии данного помещения (например, при проникновении спасателей для поиска очага горения через дверной или оконный проемы) разбавятся до концентраций, находящихся внутри концентрационных пределов, и произойдет самовоспламенение всей поверхности предварительно прогретого от источника горения и находящихся горячих газов материала. Опасность при этом заключается в том, что локальный очаг горения чрезвычайно быстро переходит в пламенное горение в значительном объеме помещения (практика показывает, что не более 20 с). Учитывая, что время реакции человека даже для падения на пол при обнаружении угрожающего сигнала – не менее 1,5 с [9], вероятность, что спасатель окажется в зоне непосредственного воздействия пламени и избыточного давления, почти полная.

В связи с вышеизложенными положениями имеется объективная необходимость уточнить последовательность действий спасателей при ведении разведки на нескрытых объектах с указанными условиями развития пожара, далее разработать методику пошаговой тренировки личного состава дежурных смен пожарных аварийно-спасательных подразделений в целях повышения эффективности и безопасности их боевой работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Борулько В.И., Борулько П.В. Стекло и защита от огня // Окна, двери, витражи. – 2005. – № 3.
2. Ми Зуи Тхань, Корольченко А.Я. Моделирование пожаров в жилых зданиях // Пожарная безопасность. – № 5. – 2005. – С. 42 – 50.
3. Ми Зуи Тхань. Горючая нагрузка в современных жилых помещениях // Пожарная безопасность. – № 4. – 2005. – С. 30 – 37.
4. Кошмаров Ю.А. Прогнозирование опасных факторов пожара в помещении: Учеб. пособие. – М., 2000. – 102 с.
5. Теплотехнический справочник. Т. 2. – М.: Энергия, 1976. – С. 189.
6. Баратов А.Н., Румянцев Л.В., Цариченко С.Г. К вопросу о механизме горения и пожаротушении тлеющих материалов // Пожарная безопасность. – № 1. – 2002. – С. 96 – 97.

7. Шламм Е.Е. Дреvesиноведение. – [Electronic resource]. – Mode of access: <http://drevo.boom.ru/>
8. Демидов П.Г. Основы горения веществ. – М.: Изд-во Мин-ва ком. хоз. РСФСР, 1951. – С. 113.
9. Еникеев М.И. Общая и социальная психология: Учебник для вузов. – М., 1999.