

Министерство Российской Федерации  
по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям  
и ликвидации последствий стихийных бедствий

Академия Государственной противопожарной службы

**Образование, распространение и воздействие  
на человека токсичных продуктов горения  
при пожаре в помещении**

Монография

*Под редакцией заслуженного деятеля науки РФ,  
доктора технических наук, профессора С. В. Пузача*

Одобрено редакционно-издательским советом  
Академии ГПС МЧС России

Москва  
2017

УДК 614.841.41.001.572-052  
ББК 38.960.2-1  
О-23

Рецензенты:

*В. М. Есин*, заслуженный деятель науки РФ,  
доктор технических наук, профессор;  
*В. И. Зыков*, заслуженный работник высшей школы РФ,  
доктор технических наук, профессор

О-23 Образование, распространение и воздействие на человека токсичных продуктов горения при пожаре в помещении. Монография / под ред. С. В. Пузача; С.В. Пузач, В.М. Доан, Т.Д. Нгуен и др. – М.: Академия ГПС МЧС России, 2017. – 130 с.

Издано в авторской редакции.

ISBN 978-5-9229-0148-2

В монографии проведен анализ характеристик пожарной нагрузки современных зданий. Рассмотрены влияние токсичных продуктов горения на организм человека, принципы оценки токсичности продуктов горения, математические модели определения токсичности продуктов горения и выбор критических концентраций токсичных газов. Предложен метод расчета критических времен воздействия монооксида углерода на человека. Проведена оценка адекватности показателя токсичности в мелкомасштабной экспериментальной установке и крупномасштабном помещении. Предложены новые подходы к экспериментальному определению удельного коэффициента образования монооксида углерода в модифицированной мелкомасштабной установке и к расчету концентраций токсичных газов при пожаре в помещении.

Монография ориентирована на научных и инженерных работников, специализирующихся в области пожарной безопасности и теории тепломассообмена в сложных термогазодинамических условиях, а также для научных и практических работников пожарной охраны, преподавателей и слушателей высших образовательных учреждений пожарно-технического профиля.

ББК 38.960.2-1  
УДК 614.841.41.001.572-052

ISBN 978-5-9229-0148-2

© Академия Государственной противопожарной  
службы МЧС России, 2017

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение .....	4
1. Характеристики пожарной нагрузки и современных строительных материалов .....	5
2. Влияние токсичных продуктов горения на организм человека при горении современных строительных материалов .....	26
3. Принципы оценки токсичности продуктов горения .....	41
4. Математические модели определения токсичности продуктов горения .....	44
5. Критические концентрации токсичных газов .....	48
6. Критические времена воздействия монооксида углерода на человека при пожаре в помещении .....	58
7. Оценка адекватности показателя токсичности в мелкомасштабной установке и крупномасштабном помещении .....	66
8. Некоторые особенности расчета концентраций токсичных газов .....	79
9. Сопоставление результатов расчета концентраций токсичных газов с использованием аналитических решений, интегральной и полевой моделей .....	84
10. Экспериментальное определение удельного коэффициента образования монооксида углерода в модифицированной мелкомасштабной установке .....	98
11. Новый теоретико-экспериментальный подход к расчету распространения токсичных газов при пожаре в помещении .....	109
Заключение .....	124
Литература .....	125

## ВВЕДЕНИЕ

По статистике [1] более чем в 80 % случаев причинами смерти людей на пожарах явилось отравление продуктами горения. Поэтому и в связи с расширением использования материалов и изделий на основе полимеров, горение и тление которых сопровождается выделением большого количества токсичных продуктов горения, разработка эффективных противопожарных профилактических мероприятий на основе определения показателя токсичности становится все более актуальной.

Экспериментально найденные показатели токсичности, определяющиеся величинами плотностей токсичных газов и кислорода, а также температуры, получены, как правило, из результатов мелкомасштабных экспериментов [2, 3], которые не воспроизводят полномасштабных термогазодинамических условий протекания пожара в реальных помещениях. Поэтому определение показателя токсичности по данным химического анализа необходимо проводить в таких термогазодинамических условиях, чтобы величины опасных факторов пожара (концентрации токсичных газов, пониженная концентрация кислорода и повышенная температура) были одинаковыми в смесях продуктов горения и воздуха, полученных в мелкомасштабной экспериментальной установке и полномасштабном реальном помещении.

Из-за невозможности полного выполнения положений теории подобия при переходе от мелкомасштабной модели к натурному помещению [4] необходимо установить связь между плотностями токсичных газов и удельными коэффициентами их образования, а также с плотностью кислорода и температурой при сгорании одного и того же горючего материала в разных термогазодинамических условиях в помещениях с существенно отличающимися размерами.

Количество выделяющихся токсичных газов определяется химическим составом и концентрацией газообразных продуктов газификации твердых и жидких горючих веществ и материалов, а также термогазодинамическими условиями пожара [5, 6]. В настоящее время эта проблема не решена с теоретической и с экспериментальной точек зрения из-за сложности физико-химических условий протекания процессов газификации и горения, а также вследствие неопределенности химического состава современных строительных материалов.

Научно-обоснованные методы расчета удельных коэффициентов выделения токсичных газов с учетом конкретных термогазодинамических условий пожара (температуры, концентрации кислорода и т.д.) отсутствуют.

Величины удельных коэффициентов выделения токсичных газов при пожаре значительно отличаются друг от друга в различных базах дан-

ных (например, в работах [6] и [7]), а сведения о теплофизических и химических показателях для многих современных материалов отсутствуют.

В данной работе:

- выполнен анализ характеристик пожарной нагрузки и современных строительных материалов, принципов оценки токсичности продуктов горения, математических моделей определения токсичности продуктов горения и выбора критических концентраций токсичных газов при пожаре в помещении;

- предложена физико-математическая модель выбора и расчета критических времен воздействия монооксида углерода на человека при пожаре в помещении;

- предложен новый подход к экспериментальному определению удельного коэффициента образования монооксида углерода в модифицированной мелкомасштабной установке;

- разработан новый теоретико-экспериментальный метод расчета концентраций токсичных газов при пожаре в помещении;

- представлены результаты теоретического и экспериментального исследования величин концентраций токсичных газов (на примере монооксида углерода) и температуры в смесях продуктов горения и воздуха, образующихся в мелкомасштабной экспериментальной установке, и рассмотрения возможности распространения полученных результатов на реальное полномасштабное помещение.

## **1. ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОЖАРНОЙ НАГРУЗКИ И СОВРЕМЕННЫХ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Вещества и материалы, используемые в строительной индустрии, имеют различную степень пожарной опасности [8, 9].

Наиболее распространенной отделкой помещений являются древесина и полимеры, а также всевозможные изделия из них (ДВП, ДСП, мебель, бумага, линолеум, провода, кабели, покрытия и т.д.) [8]. В результате пиролиза и горения этих материалов выделяется большое количество токсичных продуктов.

Исследования влияния ОФП на человека и окружающую среду представляют большой интерес с научной и практической точки зрения и активно ведутся во всем мире.

В настоящее время получено большое количество экспериментальных и теоретических данных о динамике ОФП в зданиях и сооружениях. Представленные в литературе результаты показывают существенную зависимость термогазодинамических характеристик пожаров (температуры, концентраций токсичных газов, скоростей газовых потоков и т.д.) от объемно-

планировочных и конструктивных решений зданий, состава горючих веществ и материалов, условий горения, работы систем пожаротушения и дымоудаления, оборудования, использованного при измерениях величин параметров, и ряда других факторов. Состав продуктов горения определяется природой отделочных и строительных материалов, условиями горения, температурой окружающей среды и другими условиями.

С целью изучения характеристик газовой среды при пожаре специалистами НИИ медицины труда и экологии человека – АФ ГУ НЦМЭ ВСНЦ СО РАМН были проведены исследования пожаров в г. Ангарске по качественному и количественному определению токсичных веществ, выделяющихся при горении. Измерения производились на промышленных и бытовых объектах, предприятиях транспорта. Результаты измерений представлены в виде табл. 1.1 [10].

Исследования показали, что наиболее опасными (преобладающими в количественном отношении) являются монооксид углерода, хлороводород, акролеин, циановодород, бензол, формальдегид, окислы азота и серы.

В США существуют различные стандарты по оценке воздействия токсичных газов на пожарных [11]. Для наиболее типичных ситуаций разработаны три руководства по оценке воздействия вредных примесей.

База данных предельно-допустимых концентраций (пороговых значений) загрязнений в воздухе производственного помещения при краткосрочной предельно-допустимой концентрации основана на безопасном уровне в течение 15 минутной экспозиции от одной вредной примеси (Американская Конференция Гигиенистов при Федеральной Промышленности (ACGIH)).

Во втором стандарте действующая опасная концентрация для жизни и здоровья (IDLH) применяется при определении необходимости использования средств защиты органов дыхания и зрения и определяется как концентрация, при которой человек в течение 30 минут может покинуть опасное помещение без использования средств защиты без дальнейших последствий для здоровья (Национальный институт охраны труда и здоровья – Администрация по охране труда и здоровья).

Для пожарных подходящим руководством является краткосрочная (10 мин.) смертельная концентрация (STLC) [11].

На реальных пожарах в г. Бостоне (США) специалистами Департамента научных исследований окружающей среды и здоровья изучался вред, наносимый пожарным от воздействия токсичных газов, в частности, мониторингу подвергли CO, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, HCl, NO<sub>2</sub>, HCN и микрочастицы (твердая и жидкая фаза), которые, по результатам ранее проведенных замеров и исследований, оказывают наиболее вредное воздействие на организм пожар-

ного [11]. Специально для этих исследований было разработано нагрудное устройство отбора проб, которое прикреплялось к боевой одежде пожарного.

Таблица 1.1 [10]

Результаты определения проб воздуха на содержание токсичных веществ при пожарах

Место отбора проб	Концентрации веществ, мг/м <sup>3</sup> (класс опасности ГН 2.2..5-686-98)				
	Оксид углерода ПДК = 20 (IV)	Сумма углеводородов C <sub>2</sub> – C <sub>10</sub> ПДК = 300 (IV)	Диоксид серы ПДК = 10 (III)	Оксиды азота (в пересчёте на N <sub>2</sub> O) ПДК = 5 (III)	Хлороводород ПДК = 5 (II)
Горение деревянных домов (n = 30)	$\frac{29,1 - 2720}{639,2 \pm 120}$	$\frac{8,1 - 678}{197,5 \pm 29,9}$	$\frac{0,017 - 201,1}{61,5 \pm 8,9}$	$\frac{0,025 - 19,8}{8,2 \pm 0,9}$	$\frac{2,7 - 44,4}{21,9 - 1,9}$
Горение гаражей (n = 30)	$\frac{13,9 - 25500}{2496,7 \pm 113,9}$	$\frac{17,7 - 407}{122,2 \pm 17,4}$	$\frac{18,7 - 46,2}{97,3 \pm 1,2}$	$\frac{2,1 - 25,7}{19,0 \pm 1,1}$	$\frac{5,8 - 103,2}{39,7 \pm 4,4}$
Горение подвалов, кладовок (n = 24)	$\frac{18,9 - 336}{94,9 \pm 16,9}$	$\frac{11,8 - 395,4}{66,7 \pm 20,5}$	$\frac{23,8 - 121,8}{57,5 \pm 5,2}$	$\frac{6,6 - 33,1}{12,4 \pm 1,4}$	—
Горение мусора (n = 30)	$\frac{3,13 - 44,4}{25,3 \pm 2,2}$	$\frac{1,6 - 124,6}{48,1 \pm 6,6}$	$\frac{6,3 - 35,4}{21,1 \pm 1,5}$	$\frac{4,3 - 25,2}{13,9 \pm 1,1}$	$\frac{5,9 - 7,6}{6,8 \pm 0,1}$
Пожар в квартире многоэтажного дома (n = 6)	$\frac{28,1 - 32,5}{30,3 \pm 1,8}$	$\frac{1,5 - 6}{2,8 \pm 1,9}$	—	$\frac{2,1 - 4,6}{3,5 \pm 1,5}$	—
Пожар на складе с видеоаппаратурой (n = 6)	$\frac{198 - 263}{225 \pm 27,5}$	$\frac{39,9 - 56,8}{46 \pm 7,1}$	$\frac{16,6 - 18,4}{17,5 \pm 0,8}$	$\frac{32,6 - 39,6}{36,1 \pm 3,1}$	$\frac{49,5 - 52,5}{51,0 \pm 1,3}$
Нефтехимический объект (горение нефтепродуктов, n = 6)	$\frac{18 - 24,6}{21,3 \pm 2,8}$	$\frac{146,2 - 182,2}{164,1 \pm 14,3}$	н/о	н/о	—
РМЗ – цех лакирования древесины (ДСП, ЛВЖ, n = 6)	$\frac{98,6 - 111}{104,6 \pm 5,2}$	$\frac{60,6 - 63,2}{61,6 \pm 1,1}$	—	$\frac{11,5 - 14,6}{12,3 \pm 1,3}$	н/о
БВК – завод (горение парафиновых бочек, n = 6)	$\frac{5180 - 6135}{5600 \pm 42,2}$	$\frac{1300 - 1421}{1382 \pm 51}$	$\frac{112,7 - 150,4}{137,3 \pm 16,1}$	—	—
Горение автобуса (n = 6)	$\frac{4137 - 4435}{4268,7 \pm 126}$	$\frac{716,4 - 734,7}{724,5 \pm 7,7}$	—	$\frac{11,6 - 25,3}{18 \pm 5,7}$	$\frac{78,8 - 100}{87,6 \pm 9,4}$

Окончание таблицы 1.1 [10].

Результаты определения проб воздуха на содержание токсичных веществ при пожарах

Место отбора проб	Концентрации веществ, мг/м <sup>3</sup> (класс опасности ГН 2.2..5-686-98)				
	Формальдегид ПДК = 0,5 (II)	Ацетон (пропан 2-ОН) ПДК = 200 (IV)	Бензол ПДК = 15 (II)	Толуол ПДК = 150 (III)	Хлороформ ПДК = 5 (II)
Горение деревянных домов ( <i>n</i> = 30)	$\frac{3,6 - 28,1}{15,6 \pm 1,1}$	–	–	–	$\frac{0,9 - 3,2}{2,5 \pm 0,1}$
Горение гаражей ( <i>n</i> = 30)	$\frac{8,2 - 234,4}{69,2 \pm 10,1}$	$\frac{51,48 - 60,4}{55,9 \pm 0,4}$	$\frac{14,9 - 38,4}{25,0 \pm 1,2}$	$\frac{7,5 - 28,9}{16,2 \pm 0,9}$	$\frac{2,5 - 4,4}{4,0 \pm 0,1}$
Горение подвалов, кладовок ( <i>n</i> = 24)	$\frac{2 - 53,3}{16,1 \pm 2,7}$	$\frac{19,4 - 28,8}{22,7 \pm 0,5}$	$\frac{2,1 - 3,0}{2,7 \pm 0,1}$	$\frac{2,1 - 3,1}{2,6 \pm 0,1}$	$\frac{0,38 - 0,5}{0,45 \pm 0,01}$
Горение мусора ( <i>n</i> = 30)	$\frac{4,3 - 29,8}{14,7 \pm 1,4}$	$\frac{20,1 - 34,5}{27,3 \pm 0,8}$	$\frac{11,8 - 24,8}{17,9 \pm 0,7}$	$\frac{116,0 - 18,4}{17,0 \pm 0,1}$	$\frac{2,8 - 4,5}{4 \pm 0,7}$
Пожар в квартире многоэтажного дома ( <i>n</i> = 6)	$\frac{14,6 - 17}{15,7 \pm 1,0}$	–	–	–	–
Пожар на складе с видеоаппаратурой ( <i>n</i> = 6)	$\frac{4,6 - 5,3}{5 \pm 0,3}$	–	–	–	$\frac{3,5 - 5,8}{4,9 \pm 1,1}$
Нефтехимический объект (горение нефтепродуктов, <i>n</i> = 6)	–	–	–	–	–
РМЗ – цех лакирования древесины (ДСП, ЛВЖ, <i>n</i> = 6)	$\frac{25,2 - 53,9}{36,2 \pm 12,1}$	–	–	–	н/о
БКЗ – завод (горение парафиновых бочек, <i>n</i> = 6)	$\frac{93,5 - 193,1}{153,7 \pm 15,2}$	–	–	–	н/о
Горение автобуса ( <i>n</i> = 6)	$\frac{138,7 - 280,4}{203,9 \pm 60,0}$	–	–	–	$\frac{3,0 - 6,4}{4,9 \pm 1,4}$

Примечания: значения концентраций приводятся, как  $\frac{\text{min} - \text{max}}{\text{среднее}}$  ;

н/о – не образуется при горении; – - нет данных

В табл. 1.2 представлены предельно-допустимые концентрации загрязнений в воздухе [4].



Результаты исследований [11] показывают (рис. 1.1–1.6):

- «HCN» - уровень концентраций не достигает значительного уровня во всех измерениях (рис. 1.1);
- «акролеин» - в половине случаев концентрации превышали STEL и в 10 % случаев концентрации превышали 3 ppm. (рис. 1.2), очевидно, что акролеин является одним из опасных веществ на пожаре, вызывающий раздражающий эффект;
- «CO» - присутствует при всех замерах на пожарах (рис. 1.3), уровень превышения составил: STEL (400 ppm) – 16 случаев, IDHL (1500 ppm) – 4 случая;
- «HCl» - может достигать высоких концентраций и оказывать раздражающее действие, но не в количествах вызывающих острые отравления (рис. 1.4);
- «NO<sub>2</sub>» - распределение концентраций за 5 минут не вызывает отравлений и условий для образования высоких концентраций в жилых зданиях недостаточно (рис. 1.5);
- «микрочастицы» - достигают концентраций, которые оказывают раздражающее действие (рис. 1.6);
- «CO<sub>2</sub>» - не наносит существенного вреда пожарным, но присутствует во всех замерах: в трёх случаях превысил STEL (15 000 ppm) и в одном превысил IDHL (50 000 ppm) из 89 произведённых проб.

Таблица 1.2 [11]

ПДК токсичных веществ

Соединения	STEL (15 мин), ppm	IDHL (30 мин), ppm	STLC (10 мин), ppm
Двуокись азота	5	50	>200
Хлороводород	5	100	>500
Циановодород	15	50	350
Акролеин	0,3	5	30-100
Монооксид углерода	400	1 500	5 000
Двуокись углерода	15 000	50 000	100 000
Бензол	–	2 000	20 000

Примечания к рис. 1.1–1.6: STLC – кратковременная смертельная концентрация; IDHL – действующая опасная концентрация для жизни и здоровья человека; STEL – краткосрочная предельно-допустимая концентрация.

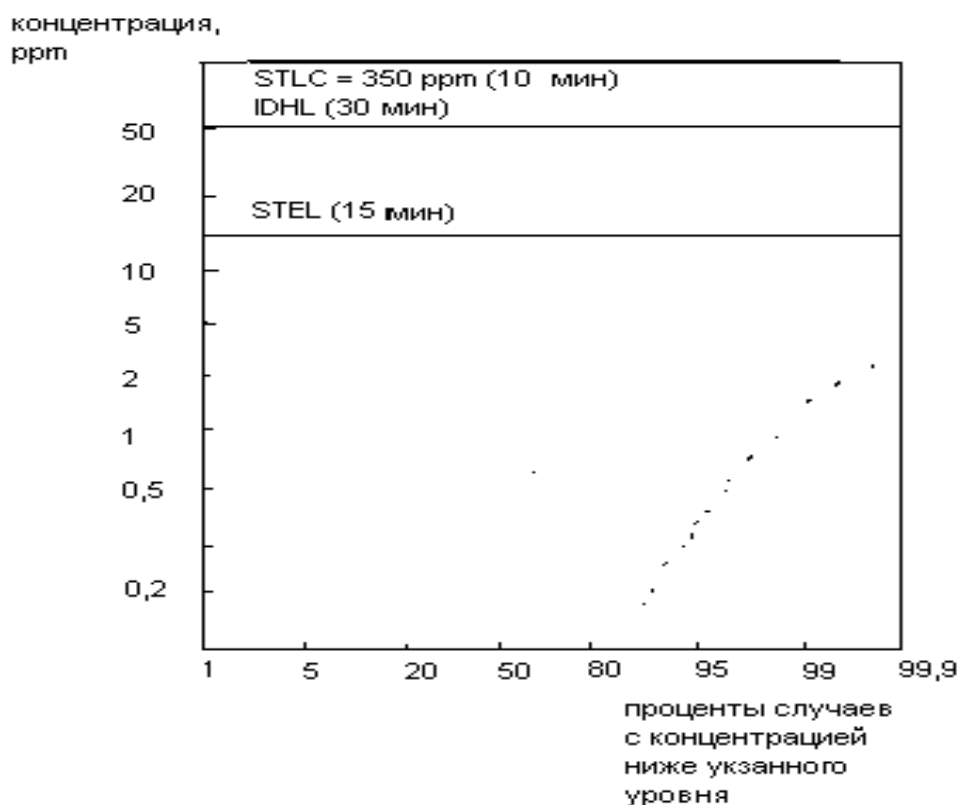


Рис. 1.1. Распределение концентраций циановодорода [11]

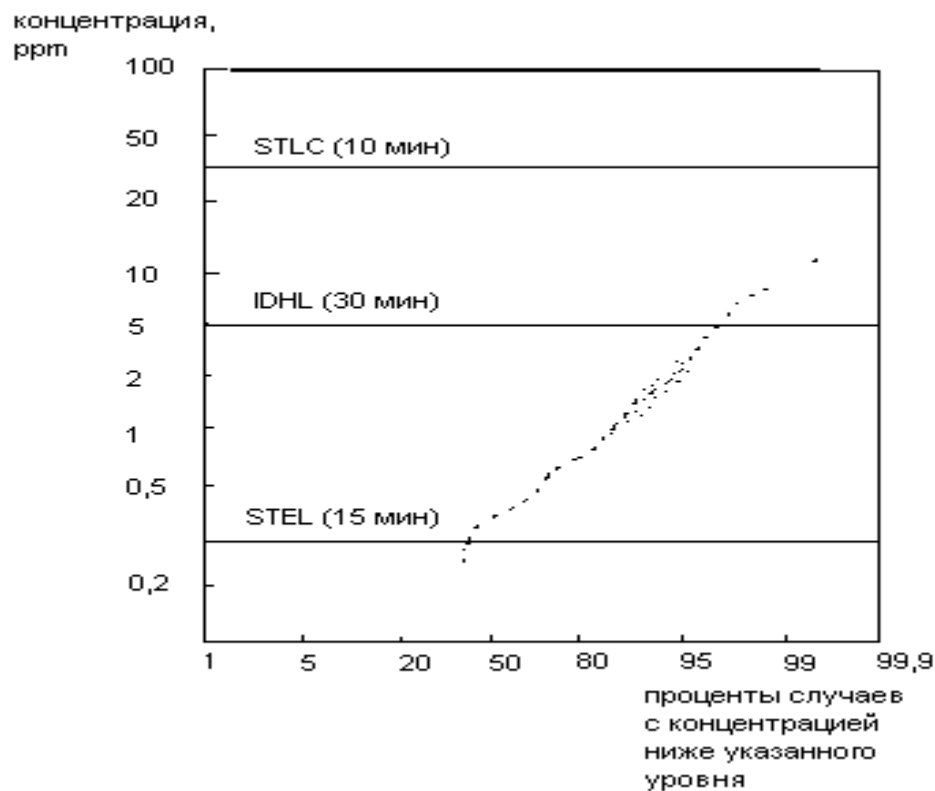


Рис. 1.2. Распределение концентраций акролеина [11]

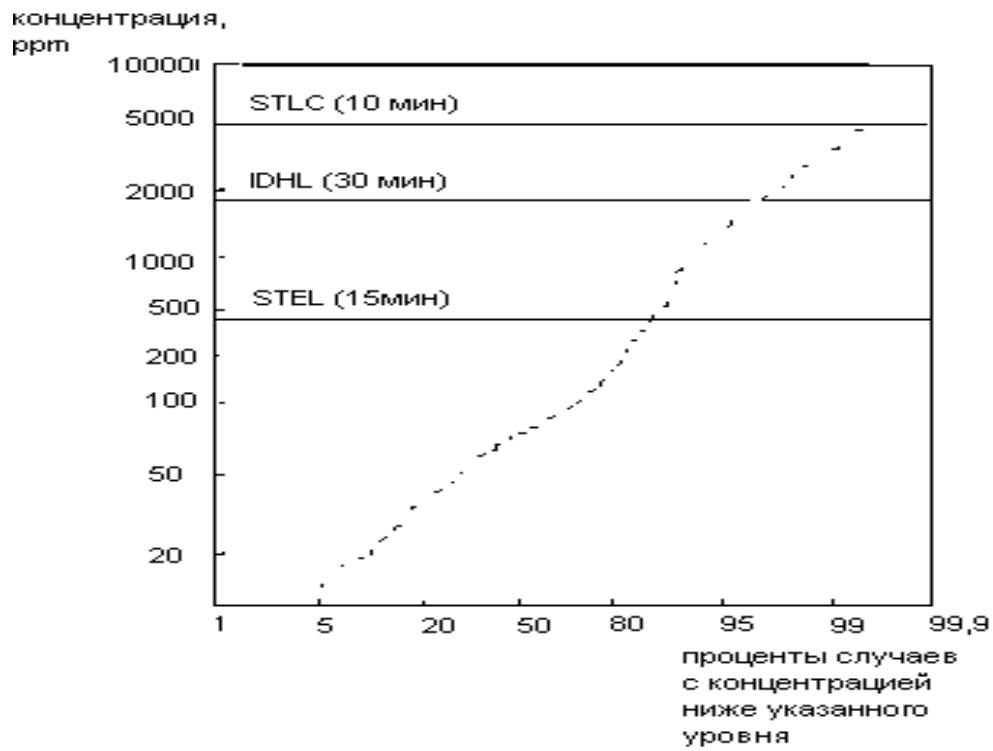


Рис. 1.3. Распределение концентраций монооксида углерода [11]

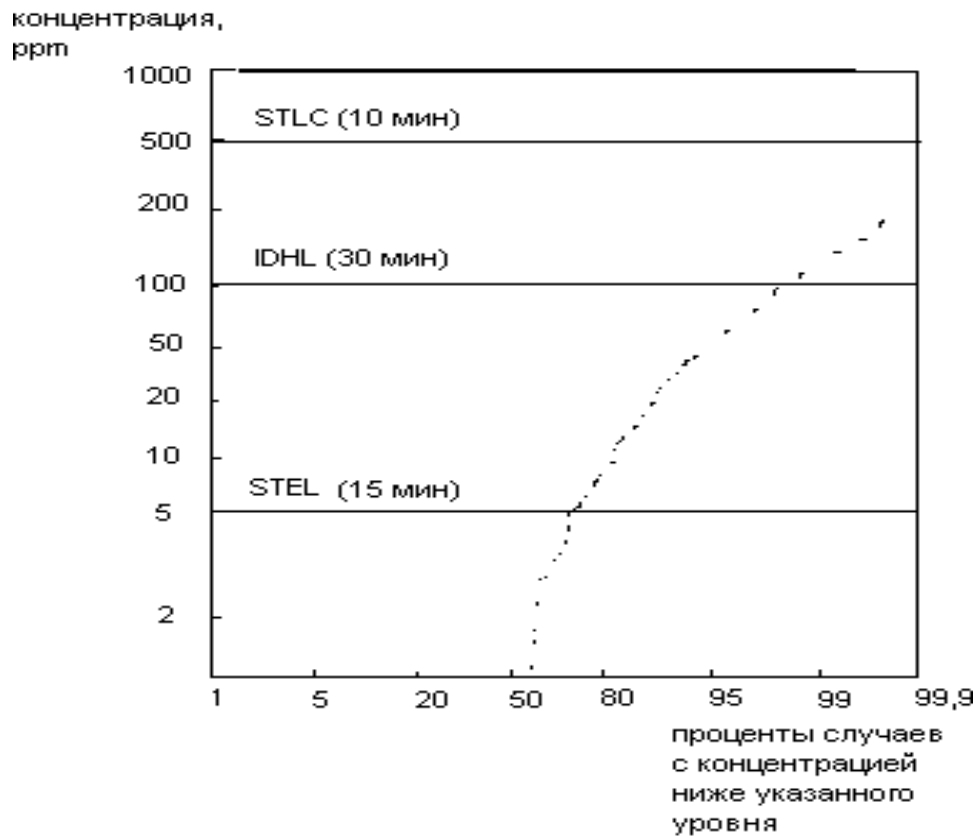


Рис.1.4. Распределение концентраций хлороводорода [11]

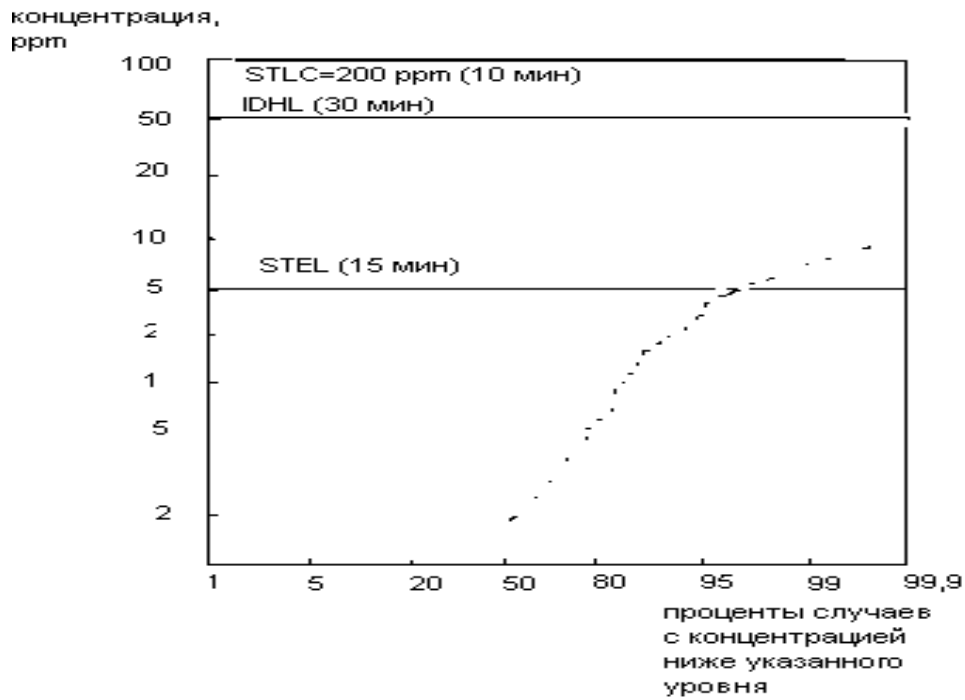


Рис. 1.5. Распределение концентраций двуокиси азота [11]

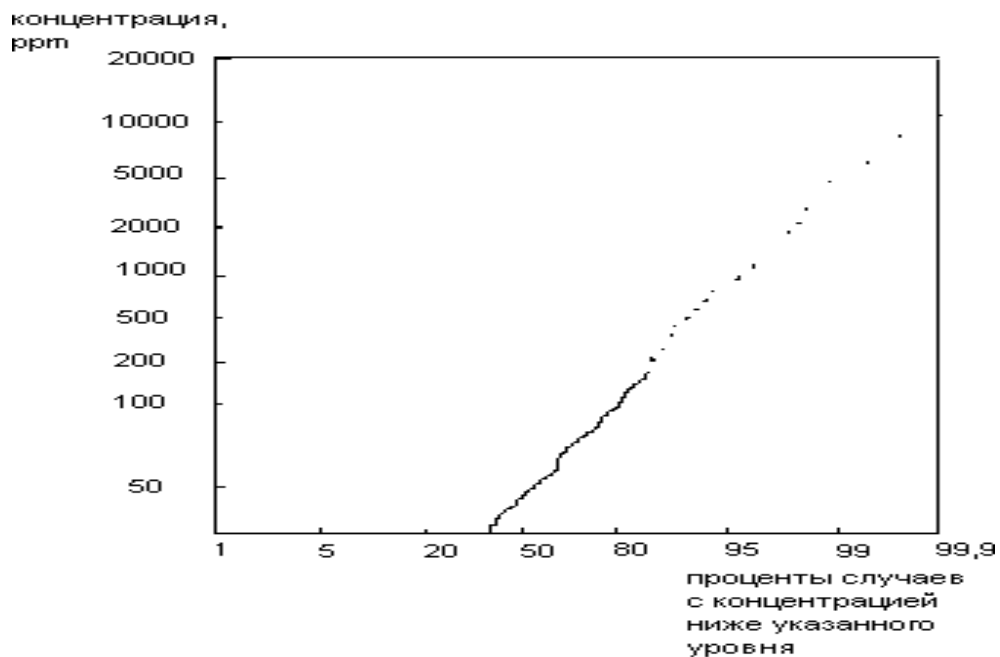


Рис. 1.6. Распределение концентраций микрочастиц [11]

Для анализа пожарной опасности веществ и материалов, применяющихся при строительстве, отделке и в быту, рассмотрим их подробнее.

Большое количество статистических данных и их анализ представлено в [8, 12]. В табл. 1.3 представлены результаты анализа состава продуктов горения пожарной нагрузки помещений по работе [8] с пересчетом в массовые концентрации.

Таблица 1.3.

## Состав продуктов горения пожарной нагрузки помещений

№	Наименование горючего материала	Удельное выделение, кг/кг											
		Дву-окись углерода, $L_{CO2}$	3	4	Дым, $L_D$	5	6	7	8	9	10	11	12
		Оксид углерода, $L_{CO}$	Синильная кислота, $L_{HCN}$	Соляная кислота, $L_{HCl}$	Оксиды азота, $L_{NOx}$	Углеродороды, $L_{UV}$	Амины, $L_{AM}$	Альдегиды, $L_{AL}$	Акролеин, $L_{AKP}$	Изоцианаты, $L_{ИЗОЦ}$			
1	2	1-1,75	$10^{-4}$ - 0,25	$9 \cdot 10^{-3}$ - $3,4 \cdot 10^{-2}$	---	---	---	$10^{-3}$ - $3 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-3}$ - $2 \cdot 10^{-2}$	---	---	$4 \cdot 10^{-3}$ - $4,86 \cdot 10^{-3}$	---
2	Древесина с огнезащитными добавками*	---	$1,32 \cdot 10^{-4}$	$1,12 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-5}$	---	---	---	---	---	---	---	---
3	Древесина обработанная аммонийными солями	---	---	---	$3 \cdot 10^{-3}$ - $2,7 \cdot 10^{-2}$	---	---	$3,5 \cdot 10^{-4}$ - $1,2 \cdot 10^{-3}$	---	---	---	---	---
4	Растительные материалы	---	---	0,15-0,3	---	---	---	---	---	---	---	---	---
5	Пшеница, ячмень, кукуруза, овес, подсолнечный жмых	0,5-0,7	0,2-0,26	0,13-0,16	---	---	---	---	---	---	---	$2,8 \cdot 10^{-3}$ - $6,4 \cdot 10^{-3}$	---





1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
31	Электрокабель АВВГ 3х4 (зеленый)	---	---	$7,5 \cdot 10^{-2}$	---	---	---	---	---	---	---	---
32	АВВГ х2,6 (черный)	---	---	$9,01 \cdot 10^{-2}$	---	---	---	---	---	---	---	---
33	Электрокабель КВВГ 10х2,5 (черный)	---	---	$12,03 \cdot 10^{-2}$	---	---	---	---	---	---	---	---
34	Электрокабель ТПП (черный)	---	---	$8,4 \cdot 10^{-2}$	---	---	---	---	---	---	---	---
35	Электрокабель АВВГ 3х4+1х2,5 (серый)	---	---	$11,9 \cdot 10^{-2}$	---	---	---	---	---	---	---	---
36	Электрокабель АВВГ 3х4 (черный)	---	---	$8,72 \cdot 10^{-2}$	---	---	---	---	---	---	---	---
37	Электрокабель НПП 380	---	---	$22,1 \cdot 10^{-2}$	---	---	---	---	---	---	---	---
38	Электрокабель АКВВГ 10х4 (черный)	---	---	$8,34 \cdot 10^{-2}$	---	---	---	---	---	---	---	---
39	Электрокабель НПП 378	---	---	$10,15 \cdot 10^{-2}$	---	---	---	---	---	---	---	---
40	Бумага	---	---	---	$1,86 \cdot 10^{-5}$	---	---	---	---	---	$3,5 \cdot 10^{-3}$	---

Примечания: \* - сосна с грунтовой ФЛОЗК, шпаклевкой ПФ 002 и эмалью ПФ-115; ---- - нет данных;

в скобках даны полуэмпирические данные, полученные при пересчете с использованием объема продуктов горения из табл. 21 [13]



Значительную долю пожарной нагрузки (около 50 %) в жилых помещениях составляет древесина и изделия из нее [8]. В продуктах пиролиза и горения древесины идентифицировано более 220 соединений, но не все они определены количественно [8]. Больше всего в газовой среде содержится оксидов углерода, также среди токсичных газов обнаружены акролеин, ацетон, формальдегид, крезол, ксиленол и другие. Материалы на основе древесины, древесностружечные плиты (ДСП) и древесноволокнистые плиты (ДВП) при разложении оказываются более токсичны, чем древесина, так как в их состав входит до 10 % вес. различных связующих материалов [8]. В продуктах горения ДВП и ДСП найдены метилформиат, ксилол, стирол, бензол, фенол и другие соединения [8].

Токсическое действие продуктов разложения и горения древесины в основном обусловлено высоким содержанием в их составе окиси углерода [8].

В табл. 1.4 [8] приведены данные по составу продуктов пиролиза и горения древесины.

Таблица 1.4 [8].  
Состав продуктов пиролиза и горения древесины

Соединение	Концентрация, % об.
Диоксид углерода	11,3 – 56,5
Монооксид углерода	0,3 – 3,2
Формальдегид	0,001
Акролеин	0,0005 – 0,132
Уксусная кислота	0,007 – 0,26
Ацетон	0,017 – 0,03
Ацетальдегид	0,0044 – 0,11
Метан	0,026 – 9,23
Метанол	0,009 – 0,14
Этилен	0,21

Древесина токсична при нагреве [8]. Начиная с порядка 110 °С начинается ее терморазложение, сопровождающееся выделением газообразных продуктов CO, CO<sub>2</sub> и других, которые оказывают токсическое действие на организм человека. Кроме того, при тлении и горении выделяется значительное количество дисперсной среды (дым), состоящей из твердых и жидких мелкодисперсных частиц продуктов неполного сгорания древесины. Из-за этого снижается дальность видимости в помещении, а дыхание человека становится затрудненным.

Уровень пожарной опасности зданий и сооружений повышает использование полимерных материалов в отделке зданий и изделий, изготовленных из них [8]. Полимерные материалы применяются для покрытия полов, отделки стен и перегородок, для теплозвукоизоляции и гидроизоляции. Полимеры используются при производстве санитарно-технических изделий, ковров, матрацев, мягкой мебели, бытовых приборов и тканей. Полиэтилен, полистирол, полиуретан, поливинилхлорид, полипропилен, полиакрилонитрил, полиформальдегид и полиамид идут на изготовление строительных и отделочных материалов [8].

Добавки, входящие в состав полимеров, приводят к увеличению токсичности продуктов горения, так как антипирены и дымоподавляющие добавки катализируют определенные реакции в газовой и конденсированной фазе и способствуют образованию токсичных циклических соединений [8].

Воспламенение и горение синтетических материалов в жилых помещениях вызывает образование монооксида и диоксида углерода, цианистого и хлористого водорода, оксидов азота и серы, сажи. В значительно меньших количествах выделяются кислородсодержащие, азотсодержащие и галогенированные алифатические и ароматические соединения.

Исследования в области изучения выхода токсичных газов при горении материалов были проведены Л.К. Исаевой [8, 12] и представлены в табл. 1.5-1.8.

Из данных табл. 1.3-1.8 очевидно, что у разных по химическому составу материалов образуются, как правило, схожие кислородсодержащие соединения:  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_3\text{CHO}$ ,  $\text{CH}_3\text{OH}$ ,  $(\text{CH}_3)_2\text{CO}$ , а также бензол и его производные:  $\text{C}_6\text{H}_6$ ,  $\text{C}_6\text{H}_5\text{CH}_5$ .

Количество  $\text{CO}_2$  в продуктах горения почти у всех материалов примерно одинаково и находится на уровне летальных доз –  $\text{LC}_{50}$  ( $0,2 \text{ кг/м}^3$ ). Содержание  $\text{CO}$  и других токсикантов превышает максимальные разовые  $\text{ПДК}_{\text{мр}}$  в 1000 и более раз [8].

Анализ данных [8] показывает, что концентрация большинства токсичных органических соединений в продуктах горения равна  $10^2$ – $10^3 \text{ мг/м}^3$  и близка к летальным дозам. Поэтому гибель людей на пожаре, не успевших покинуть помещение на протяжении 15-30 минут, может наступить не только от отравления  $\text{CO}$ .

Таким образом, на пожарах практически всегда создаётся токсичная среда.

В табл. 1.9 [8] представлена оценка токсичности материалов по производству концентрации и времени.

Таблица 1.5 [12].

## Токсичность продуктов горения полимерных материалов

Наименование материала (изделия из него)	Выделение продуктов горения кг/м <sup>3</sup>				Показатель токсичности, кг/м <sup>3</sup>
	СО	СО <sub>2</sub>	HCN	Окислы азота	
Целлюлоза	0,06	1,152	–	–	0,045
Линолеум ПВХ	0,0693	0,777	–	–	0,061
Древесностружечная плита	0,108	0,857	–	–	0,049
Стеклопластик ПН-1	0,0579	1,270	0,06	–	0,063
Пенополиуретан ПУ-318	0,121	0,944	0,00519	0,0122	0,026
Пенополистирол	–	–	–	–	0,0397
Пенопласт ФПП	0,539	0,656	0,00156	0,00099	0,0066
Декоративный бумажнослоистый пластик	–	–	–	–	0,0112

Примечания:

+ - газ выделяется, но нет данных по концентрациям;

-- газ не выделяется

В табл. 1.10 [12] приведены данные по содержанию некоторых токсичных продуктов горения в воздухе помещений при пожарах.

Данные табл. 1.9 и 1.10 также подтверждают, что на пожаре выделяется большая масса токсичных газов.

Существенное выделение кроме монооксида углерода других токсичных газов отмечено в [13, 14]. Огневые испытания [14] в отсеке овощехранилища размером 24х36х6 м показали, что через 7 минут от начала опыта образовались максимальные концентрации циановодорода (0,035 % об.) в центре над потолком, NO<sub>x</sub> (0,017 % об), при температуре 750 °С (СО=0,2 % об., СО<sub>2</sub> = 2% об.). Отбор газовых проб осуществлялся из 5 точек, расположенных по центральной оси отсека над потолком на высоте 0,6 м и две точки в отсеке: одна у верхней кромки ворот, вторая - над ней, ниже потолка на 0,35 м. Максимальный выход СО и СО<sub>2</sub> зафиксирован на 15-й минуте опыта и составил 2,7%(об) и 14%(об) соответственно [14].

Таблица 1.6 [12].

Основной состав токсичных ПГ некоторых материалов, составляющих горючую нагрузку жилых помещений

Токсикант	Концентрация ПГ, кг/м <sup>3</sup> (кг/кг горючего материала)				
	Древесина	Древесина с лакокрасоч. покрытием	ДСП	Фанера ФФ	Картон «Г»
Диоксид углерода	0,22	0,16	0,018	0,12	0,129
Оксид углерода	0,026	0,0045	0,0053-0,33	0,0269	0,0054
Диоксид азота	+	+	+	+	0,00027
Хлористый водород	+	+	+	+	+
Цианистый водород	-	-	+	+	0,00006
Метанол	0,0021	+	0,0017	$0,13 \cdot 10^{-8}$	+
Формальдегид	0,015	+	0,00068	+	0,00015
Акролеин	0,001 ( $4 \cdot 10^{-3}$ - $4,86 \cdot 10^{-3}$ )	+	0,00006	0,000091	0,0002
Ацетальдегид	0,000084	0,0015	0,0024	$0,66 \cdot 10^{-7}$	0,00096
Уксусная кислота	0,00015	0,00024	0,0004	0,0004	+
Ацетон	0,00044	0,00018	0,001	+	0,00022
Бензол	+	0015	0,0008	+	+
Толуол	+	0,0008	0,0007	+	+
Кумол	+	0,00009	+	+	+
Стирол	-	-	0,0004	-	-
Фенол	+	0,0017	0,0002	+	0,0031
Толуилендиизоцианат	-	-	-	-	-
Винилхлорид	-	-	-	-	-
Фосген	-	-	-	-	-
Диоксины (по 2,3,7,8-ТХДД)	+	+	+	+	+
Бенз(а)пирен (БаП)	+	+	+	+	+
Нафталин	-	-	-	-	-
Пиридин	-	-	-	-	-
Анилин	-	-	-	-	-

Примечания:

+ - газ выделяется, но нет данных по концентрациям;

- - газ не выделяется

Таблица 1.7 [12].

Основной состав токсичных ПГ некоторых материалов, составляющих горючую нагрузку жилых помещений

Токсикант	Концентрация продуктов горения, кг/м <sup>3</sup>				
	Бумага	Шерсть, ткань	Шелк, ткань	Нейлон	ПВХ
Диоксид углерода	1,4	0,14	0,08	0,05	0,02
Оксид углерода	0,005-0,43	0,0047	0,0029	0,019	0,023
Диоксид азота	0,000002	–	+	0,00007	–
Хлористый водород	+	–	–	–	0,07
Цианистый водород	0,000004 (1,86·10 <sup>-5</sup> )	0,078	+	0,0036	+
Метанол	0,001	–	0,0013	0,0002	–
Формальдегид	0,000022	–	–	+	–
Акролеин	0,00076 (3,5 10 <sup>-3</sup> )	–	–	–	–
Ацетальдегид	0,0066	0,001	0,0074	0,0042	–
Уксусная кислота	0,0005	+	0,0005	–	–
Ацетон	0,0005	0,0002	0,0012	0,0005	0,0004
Бензол	0,0006	0,0033	0,0008	0,0024	0,0089
Толуол	0,0006	0,0024	0,0004	0,0013	0,0022
Кумол	0,00002	0,0004	0,0002	0,0009	–
Стирол	0,0001	0,0009	0,0001	0,0003	0,00028
Фенол	0,0002-0,002	0,0009	0,0003	0,0004	–
Толуилендиизоцианат	–	–	–	–	–
Винилхлорид	–	–	–	–	0,13
Фосген	–	–	–	–	0,13
Диоксины (по 2,3,7,8-ТХДД)	+	–	–	–	0,0000009
Бенз(а)пирен (БаП)	+	–	–	–	0,9·10 <sup>-9</sup>
Нафталин	0,00004	0,0003	0,00002	0,00001	–
Пиридин	–	0,0008	0,2·10 <sup>-8</sup>	0,0003	–
Анилин	–	–	–	0,0003	–

Примечания:

+ - газ выделяется, но нет данных по концентрациям;

-- газ не выделяется

Таблица 6.8 [5].

Концентрации токсичных веществ в жилых помещениях до и во время пожаров

Токсикант	Концентрация, кг/м <sup>3</sup>			
	При пожарах			До пожара (по литературе)
	Расчётная (по лаб. эксперим.), учитывающая кол-во материалов в ПН	Фактическая (по литературе)	Фактическая измеренная в г. Калининграде	
CO <sub>2</sub>	0,16	0,15-0,72	0,9	(0,6-1)·10 <sup>-2</sup>
CO	0,022	0,023-0,135	0,026	
HCl	0,014	0,000142	–	–
NO <sub>2</sub>	0,000132	(0,215-0,575)·10 <sup>-3</sup>	0,0013	5·10 <sup>-8</sup>
HCN	0,000526	0,0008	–	–
CH <sub>3</sub> OH	0,000732	–	–	–
CH <sub>3</sub> COOH	0,00029	–	–	–
Сажа	0,0096	–	(0,52-3,7)·10 <sup>-3</sup>	2·10 <sup>-8</sup> -7·10 <sup>-7</sup>
(CH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> CO	0,00097	–	0,0061	–
HCHO	0,000109	(0,335-0,77)·10 <sup>-3</sup>	–	5·10 <sup>-8</sup>
CH <sub>2</sub> CHCHO	0,000258	0,001167	0,004	–
C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> OH	0,000148	–	0,00086	–
C <sub>10</sub> H <sub>8</sub>	–	0,0017	–	–
CH <sub>3</sub> CHO	0,00304	–	0,016	–
C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	0,0033	0,0017	0,0066	–
C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> CH=CH <sub>2</sub>	0,00106	–	–	–
ПАУ	0,0056	(3-4)·10 <sup>-3</sup>	–	–
CH <sub>3</sub> CN	0,00004	–	–	–
C <sub>6</sub> H <sub>4</sub> (NCO) <sub>2</sub>	0,16·10 <sup>-4</sup>	–	–	–
CH <sub>2</sub> CHCl	0,26·10 <sup>-4</sup>	–	–	–
C <sub>20</sub> H <sub>12</sub> (БаП)	9·10 <sup>-8</sup>	7·10 <sup>-8</sup>	–	–
Cd	13,5·10 <sup>-9</sup>	–	–	–
Hg	8	–	–	–
Sb	13,5·10 <sup>-9</sup>	–	–	–
SO <sub>2</sub>	–	(0,27-1,08)·10 <sup>-3</sup>	–	2·10 <sup>-8</sup>

Таблица 1.9 [12].

Оценка токсичности материалов по производству  
концентрации и времени экспозиции

Материал	Токсичность материалов по производству концентрации и времени, мг/(л·мин)
Тефлон	32-85
Шерсть	117
ПВХ	127-312,5
Полиформальдегид	151
Полимочевинформальдегид	155,5
Бумажные обои	260,5
Полиизоциануат	275-305
Пенополистирол	290
Ковер из нейлона с пенопластовой прокладкой	298
ППУ	360-645
Латексные краски	402
ДВП	414
Целлюлозные волокна	464
Минеральные плиты на бумажной основе	486
Потолочные отделочные плиты на основе древесины	486
Огнезащитный пенополиуретан	509
Хлопковая ткань	561
Жесткий ППУ	661
Высокоэластичный ППУ	641
Картон из макулатуры	883
Древесина различных пород	1059-2647
Полиэфир	1274
Хлопок	1302
Гипсовые панели для стен	1521

Таблица 1.10 [12].

Содержание некоторых токсичных продуктов горения  
в воздухе помещений при пожарах

Токсикант	Концентрация, кг/м <sup>3</sup>		
	Ср. на пожаре (φφ)	ПДКссi	LC <sub>50</sub>
CO <sub>2</sub>	0,16	0,000916	0,2
CO	0,022	0,000001	0,003
CH <sub>3</sub> OH	0,0007	0,5·10 <sup>-6</sup>	0,005
CH <sub>3</sub> COOH	0,0003	0,06·10 <sup>-6</sup>	–
(CH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> CO	0,001	0,35·10 <sup>-6</sup>	0,0024
HCHO	0,0001	0,003·10 <sup>-6</sup>	0,0001-0,0002
CH <sub>2</sub> CHCHO	0,0003	0,3·10 <sup>-6</sup>	0,000005- 0,0001
HCN	0,0005	0,01·10 <sup>-6</sup>	0,00015-0,0002
NO	0,0003	0,04·10 <sup>-6</sup>	0,00024
C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> (OH)	0,0001	0,000005	–
C <sub>10</sub> H <sub>8</sub>	0,0017	0,003·10 <sup>-6</sup>	–
CH <sub>3</sub> CHO	0,003	0,01·10 <sup>-6</sup>	–
C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	0,0033	0,1·10 <sup>-6</sup>	0,0008
C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> -CH <sub>3</sub>	0,0011	0,6·10 <sup>-6</sup>	0,00056
C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> CHCH <sub>2</sub>	0,001	0,002·10 <sup>-6</sup>	0,00042
ПАУ ( по пирену)	0,0056	0,03·10 <sup>-6</sup>	–
HCl	0,014	0,2·10 <sup>-6</sup>	0,0015
CH <sub>3</sub> CN	0,00004	0,03·10 <sup>-6</sup>	0,015
ТДИ C <sub>6</sub> H <sub>4</sub> (NCO) <sub>2</sub>	0,000016	0,02·10 <sup>-6</sup>	–
CH <sub>2</sub> CHCl	0,000026	0,005·10 <sup>-6</sup>	–
C <sub>20</sub> H <sub>12</sub>	0,9·10 <sup>-7</sup>	1·10 <sup>-12</sup>	–
ТХДД	0,9·10 <sup>-8</sup>	1 нг/м <sup>3</sup>	–
ТХДФ	0,5·10 <sup>-9</sup>	0,5 пг/м <sup>3</sup>	–
Cd	0,135·10 <sup>-7</sup>	0,001·10 <sup>-6</sup>	0,0005
SO <sub>2</sub>	0,001	0,5·10 <sup>-6</sup>	0,006
Hg	0,008	0,003·10 <sup>-6</sup>	–
Сажа	0,0096	0,05·10 <sup>-6</sup>	–

Примечания:

LC<sub>50</sub> – концентрация, вызывающая гибель 50 % подопытных животных при ингаляционном воздействии;

– – нет данных

Исследования выхода токсичных продуктов при пожаре также проводились в США. Результаты выполненных учёными (Голд, Тритман, Лоури)



исследований в подразделениях пожарной охраны г. Бостона и Далласа, представлены в табл. 1.11 [11].

Таблица 1.11.

Уровни приведённых концентраций побочных продуктов сгорания  
в местах пожаров

Материал	Исследования [11]		
	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup> (Голд)	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup> (Тритман)	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup> (Лоури)
Оксид углерода	0,0003-0,1	0,0015-0,5	0-0,0015
Хлористый водород	0,0018-0,015	0,0001-0,02	0-0,004
Циановодород	$0,02 \cdot 10^{-4}$ -0,0005	$0,1 \cdot 10^{-4}$ -0,0005	0-0,004
Ацетальдегид	–	–	0,0001-0,0015
Двуокись азота	$0,02 \cdot 10^{-4}$ - $0,89 \cdot 10^{-4}$	$0,2 \cdot 10^{-4}$ -0,001	–
Двуокись углерода	–	0,1-6	–
Бензол	–	$0,2 \cdot 10^{-4}$ -0,015	0,05
Твёрдые частицы	0,0004-0,075	0,002-2	–

Примечания:  $\rho$  – плотность токсичного газа, кг/м<sup>3</sup>;

– - нет данных

Пожарная нагрузка зданий и сооружений, как правило, является неоднородной: в помещениях находятся вещи различного назначения (мебель, бытовая техника, документы, ткани и т.д.), изготовленные из различных материалов (дерево, металл, пластмассы, синтетика, ткани и т.д.). Поэтому при пожаре происходит выделение значительного спектра токсичных газов, которые оказывают одновременно вредное воздействие на организм человека.

В приложении работы [7] представлены характеристики комбинированной пожарной нагрузки и значения выхода основных продуктов горения при горении различных веществ и материалов, которые являются основой при проведении расчётов динамики ОФП [1, 4, 6, 7, 15-21]. Данная таблица ценна и интересна тем, что в других литературных источниках найти значения выхода токсичных газов при горении материалов помещения в таком сочетании невозможно. Основным недостатком можно назвать отсутствие данных по другим, не менее токсичным газам. Таким образом, в дальнейших исследованиях и расчётах будем использовать в основном данные приложения работы [7], расширенные результатами работ [6, 8].

Анализ данных, приведенных в таблицах 1.1-1.11 и приложении [7], указывает на то, что при сгорании пожарной нагрузки выделяется более десятка токсичных газов, параметры опасности которых по токсичности в несколько раз превосходят предельно-допустимые концентрации. Следовательно, что при одновременном сгорании веществ и материалов, состав-

ляющих пожарную нагрузку даже небольшого помещения, спектр выделяющихся при горении токсичных газов будет исчисляться сотнями наименований, а их значения токсичности в сотни раз превысят предельно-допустимые концентрации.

Кроме того, очевидны отличия контрольных параметров по токсичности при сгорании одинаковых материалов в различных литературных источниках. Это объясняется тем, что экспериментальным путём невозможно получить близкие значения: сценарий развития пожара зависит от объемно-планировочных решений здания (геометрия помещений, количество и расположение проёмов и т.д.), вида и массы сгорающего материала, а также условий их термического разложения и горения.

Следовательно, обоснованный выбор базы данных играет существенную роль при расчете динамики опасных факторов пожара (ОФП), соответствующей реальной термогазодинамической картине пожара.

## **2. ВЛИЯНИЕ ТОКСИЧНЫХ ПРОДУКТОВ ГОРЕНИЯ НА ОРГАНИЗМ ЧЕЛОВЕКА ПРИ ГОРЕНИИ СОВРЕМЕННЫХ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Под токсичностью обычно понимается степень вредного воздействия химического вещества на живой организм. Количественно ее определяют часто как меру несовместимости вещества с жизнью организма [2].

При горении веществ и материалов, составляющих основную пожарную нагрузку современных зданий и сооружений, могут выделяться десятки химических соединений. Химический состав продуктов горения пожарной нагрузки представлен в главе 1, откуда видно, что в количественном отношении, как правило, преобладают оксид углерода, циановодород, хлороводород, оксиды азота, акролеин, а в ряде случаев и другие летучие вещества. Так, в продуктах термического разложения поливинилхлорида обнаружено 75 компонентов, древесины – более 200 [8]. Токсичный эффект таких сложных смесей определяется содержанием токсичных компонентов, а также характером их комбинированного действия на живой организм.

При оценке опасности вредного воздействия токсичных газов на организм человека, необходимо учитывать какие компоненты газовой смеси наиболее опасны, т.е. соединения, преобладающие в количественном отношении и характеризующиеся к тому же высокой биологической активностью [2].

Рассмотрим подробно некоторые токсичные газы, а также их влияние на организм человека.