

ПОЖАРЫ, ВЫЗВАННЫЕ ЯДЕРНЫМИ ВЗРЫВАМИ, И ИХ ПОСЛЕДСТВИЯ

УДК 533.6.011.6

В. С. Пинаев, В. А. Щербаков

Всероссийский научно-исследовательский институт
экспериментальной физики, 607200 Саров

Даны оценки масштабов вызванных ядерными взрывами пожаров, приводящих к инжекции в атмосферу значительных количеств дыма и сажи. Эти оценки основаны на исследованиях, связанных с проблемой «ядерной зимы» — сильного охлаждения земной поверхности за счет экранирования солнечного излучения задымленной атмосферой после широкомасштабной ядерной войны.

При наземном (контактном) или воздушном ядерном взрыве на территории, содержащей горючие материалы (растительность, в частности леса; различные постройки; асфальтовые дороги; хранилища нефтепродуктов и т. п.), возможно возникновение пожаров, приводящих к инжекции в атмосферу значительных количеств дыма и сажи. Дым и сажа в атмосфере экранируют солнечное излучение и могут привести к сильному охлаждению земной поверхности или к эффекту так называемой «ядерной зимы» [1]. Кроме того, сажа, представляющая собой частицы элементарного углерода, может сильно изменить электрофизические свойства атмосферы и повлиять тем самым на условия распространения радиоволн.

Изучение проблем «ядерной зимы» основано на большом количестве лабораторных, натуральных и теоретических исследований, в которых рассматривается возникновение и распространение пожаров, вызванных ядерными взрывами, а также пространственно-временное распространение дыма и сажи от этих пожаров в атмосфере [2]. На основе результатов этих исследований в данной работе приводятся оценки масштабов пожаров, вызванных одним или несколькими ядерными взрывами, а также задымленности атмосферы, вызванной этими пожарами. При этом основное внимание уделено лесным пожарам.

Горючие материалы. Основной горючий материал лесных пожаров — древесина: деревья, сучья и ветви, кусты. К горючим материалам также относятся изделия из дерева, другая растительность (трава, сельскохозяйственные посевы, торфяники и т. п.), ткани, пластмассы, полимеры, нефтепродукты и другое органическое топливо, асфальт и т. д. Горючие материалы характеризуются: загрузкой горючего μ — массой горючего на единицу площади; массовой долей сгоревшего горючего α ; эмиссионным фактором сажи β — массовой долей инжектированной в атмосферу сажи от сгоревшего горючего; энерговыделением ϵ , необходимым для возгорания; зоной возгорания σ — площадью возгорания на единицу мощности взрыва. В лесах умеренных широт средняя загрузка горючих материалов (сухой биомассы) $\mu \sim 20\text{--}22 \text{ кг/м}^2$, из которых (при воспламенении ядерным взрывом) сгорит от 3 до 25%. На большой площади пожара сгорает половина горючего материала ($\alpha \sim 0,5$), другая половина тлеет. При тлеющем горении образуется в 5 раз больше частиц дыма, чем при открытом горении [3].

Для сравнения: в городах средняя загрузка горючими материалами $\mu \approx 40 \text{ кг/м}^2$,

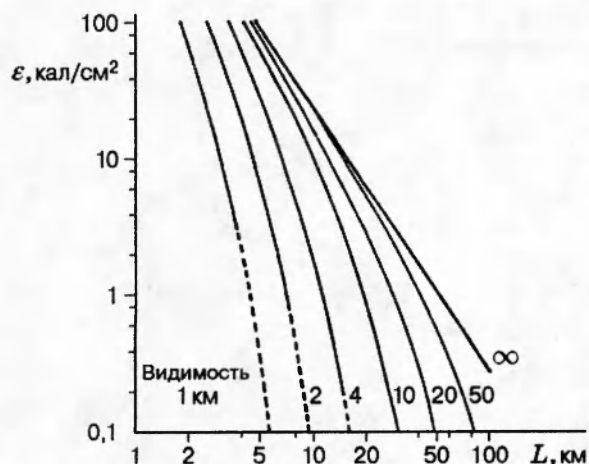


Таблица 1

Атмосферные условия	Видимость, км
Исключительно ясно	280
Очень ясно	50
Ясно	20
Легкая дымка	10
Дымка	4
Легкий туман	2
Густой туман	≤ 1

причем в центрах современных городов $\mu \approx 470$ и 110 кг/м^2 на площадях $3\text{--}13 \text{ км}^2$ и $47\text{--}100 \text{ км}^2$ соответственно, в пригородных зонах $\mu \approx 5 \text{ кг/м}^2$.

Возгорание лесов произойдет везде, где $\epsilon \geq 20 \text{ кал/см}^2$, т. е. зона возгорания (при средней видимости) $\sigma \approx 250\text{--}375 \text{ км}^2/\text{Мт}$.

При воздушном взрыве мощностью 1 Мт листья (и бумага), дерево (изделия из дерева и кровельный материал) и ткани загораются при энерговыкладе $\epsilon \approx 6; 30; 15 \text{ кал/см}^2$ соответственно. При мощности взрыва, меньшей 1 Мт, величина энерговыклада, необходимого для воспламенения вещества, слабо зависит от мощности взрыва. Размеры, форма, цвет, содержание влаги и ориентация объекта относительно падающего излучения от огненного шара взрыва также влияют на то, насколько легко он может воспламениться.

Лесные (и степные) пожары продолжаются от нескольких часов до нескольких дней и даже недель. Пожары торфяников могут длиться несколько месяцев, городские пожары — от нескольких часов до примерно суток.

При сгорании лесоматериалов (древесины) эмиссионный фактор сажи $\beta \approx 1\%$ (изменяется от 0,14 до 3%), при сгорании другой растительности $\beta \approx 0,3\%$ (от 0,1 до 3%). Для сравнения: для пластмасс $\beta \approx 5\%$ (от нескольких до 10%), при пожарах зданий $\beta \approx 10\%$, для нефтепродуктов $\beta \approx 3\text{--}10\%$, средний фактор эмиссии сажи в городах $\beta \approx 2\text{--}4\%$, для асфальтовых покрытий $\beta \approx 6\text{--}13\%$.

Возникновение и распространение пожара. При ядерном взрыве в атмосфере значительная часть энергии выделяется в виде светового излучения. Материалы, из которых сделан ядерный заряд, при взрыве нагреваются до нескольких миллионов градусов и излучают в основном рентгеновские лучи. Эти лучи, поглощаясь воздухом, нагревают его и создают так называемый огненный шар, спектр излучения которого близок к солнечному. При воздушном взрыве примерно треть энергии взрыва переходит в излучение огненного шара (от 25 до 40%), т. е. энергия излучения огненного шара в расчете на единицу мощности взрыва составляет $E \approx 3,3 \cdot 10^{14} \text{ кал/Мт}$. Ослабление излучения в воздухе происходит за счет его поглощения и многократного рассеяния и характеризуется видимостью, зависящей от атмосферных условий. Эта зависимость приведена в табл. 1 [3].

На расстояниях, составляющих менее половины видимости, степень ослабления светового излучения не более 35%.

Зависимость удельного энерговыклада ϵ от расстояния по горизонтали L от эпицентра

взрыва при воздушном взрыве мощностью 1 Мт, произведенном на высоте от одного до нескольких километров, для различных значений видимости на уровне поверхности Земли приведена на рисунке.

При мощности взрыва от 0,1 до 1 Мт энерговыделенный вклад примерно пропорционален мощности. При наземных взрывах мощностью от 0,1 до 10 Мт энерговыделенный вклад примерно вдвое меньше, чем при воздушных [3, 4].

При поглощении светового излучения поднимается температура материала, что может привести к воспламенению горючих материалов. Так, при ядерных взрывах в Японии на высоте 560 м твердые материалы на поверхности Земли непосредственно под точкой взрыва нагревались до 3000–4000 °С, на расстоянии 1200 м от эпицентра температура превышала 1600 °С. В первом приближении считается, что воспламенение тех или иных горючих материалов происходит при определенных значениях энерговыклада, определяемых экспериментально. Воспламенение материалов под действием светового импульса зависит от ряда факторов, из которых наиболее важными, помимо характера самого материала, являются его толщина, содержание влаги, общие размеры, форма, цвет и ориентировка объекта относительно падающего излучения. Имеет значение и длительность светового импульса. Именно поэтому для взрывов меньшей мощности, у которых световой импульс короче, критический энерговыделенный вклад, вызывающий воспламенение, как правило, меньше. Световое излучение не только воспламеняет сухие горючие материалы, но и подсушивает влажные, в частности растительность, увеличивая их горючесть. При высокой прозрачности атмосферы и наличии сухих легко воспламеняющихся материалов с порогом воспламенения $\epsilon \approx 5\text{--}10$ кал/см² зона первичных возгораний от светового импульса ядерного взрыва составит 1000 км²/Мт. Для более типичных значений видимости и веществ с большим порогом воспламенения $\sigma \approx 200\text{--}500$ км²/Мт.

Возгорание лесов произойдет везде, где $\epsilon \geq 20$ кал/см², т. е. зона возгораний (при средней видимости) $\sigma \approx 250\text{--}375$ км²/Мт. В Хиросиме и Нагасаки, подвергнутых в 1945 г. американцами ядерным бомбардировкам, соответственно $\epsilon \approx 7$ и 20 кал/см², $\sigma \approx 900\text{--}1200$ и 300 км²/Мт.

Вторичные пожары, возникающие при разрушениях взрывной волной, увеличивают общую площадь поджига. Ударная волна очень сильно влияет на развитие пожаров, инициированных ядерным взрывом. Первичные очаги возгорания могут быть задуты ветром от ударной волны. Пламя может быть подавлено при избыточном давлении на фронте волны ~ 14 кПа. В то же время ударная волна создает вторичные возгорания — разлетающимися искрами, горящими кусками дерева и т. п. Сбитые ударной волной листья и ветки становятся дополнительным источником топлива для низовых пожаров. Ударная волна от воздушного взрыва оголяет лиственный лес на территории ≈ 500 км²/Мт, сбивает ветви хвойного леса или сухостоя на площади ≈ 350 км²/Мт.

Развитие пожара зависит от времени года: наиболее интенсивные пожары будут летом.

В США впервые созданы физические модели, используемые для расчета развития пожаров, например модель Канга (1985 г.). Согласно этой модели вначале происходит «вспышка» — мгновенное воспламенение территории, подвергшейся воздействию мощного излучения огненного шара с энерговыделением больше критического. Территория «вспышки» включает в себя зону сильных разрушений. Примерно за сутки площадь зоны пожаров возрастает в ~ 2 раза, количество сгоревших материалов — в 2,5 раза, интенсивность горения (масса сгоревших материалов в единицу времени) достигает максимума через 4 ч

Таблица 2

Варьируемые факторы		M/M_0	S/S_0	Варьируемые факторы		M/M_0	S/S_0
u/u_0	2	1,2	1,2	w/w_0	2	1,0	1,0
	3	1,3	1,2		0,5	1,0	1,0
				0	0,85	1,0	
ν/ν_0	0,5	0,9	0,9	μ/μ_0	2	1,1	1,0
	2	2,1	1,1		0,5	0,9	0,9
p/p_0	0,6	1,0	1,0	h/h_0	1,3	1,2	1,0
					1,2	1,0	1,0
					0,8	0,9	1,0
b/b_0	0,65	1,0	1,0	$\varepsilon/\varepsilon_0$	1,3	1,0	1,0
	1,7	1,6	0,9		0,65	1,3	0,9

Примечание. $u_0 = 2,7$ м/с, $\nu_0 = 18$ л/м², $p_0 = 24$ кПа, $b_0 = 20$ км, $\mu_0 = 30$ кг/м², $h_0 = 3$ км, $\varepsilon_0 = 8$ кал/см².

после начала горения, а затем стабилизируется на уровне 10 % от максимального. Вне зоны сильных разрушений сгорает 50 % горючего материала, остальная часть выгорает в тлеющем режиме. В зоне сильных разрушений выгорает до 100 % топлива. Распространение огня происходит за счет теплового излучения уже горящих объектов, а также переброса пламени горящими обломками и искрами. Возникновение и распространение пожара определяются следующими факторами: мощностью взрыва E , Мт; высотой взрыва h , км; видимостью b , км; скоростью ветра u , м/с или км/ч; загрузкой горючего материала μ , кг/м²; энерговыделением ε , необходимым для возгорания, кал/см²; плотностью образования искр и горящих обломков ν , л/м²; избыточным давлением p в ударной волне, определяющим зону сильных разрушений, кПа; вероятностью возникновения вторичных пожаров w .

В табл. 2 приведены данные, характеризующие чувствительность результатов пожара (отношение массы M сгоревшего и площади S пожара через сутки после его начала к этим же величинам в момент «вспышки» в зависимости от вариаций определяющих факторов).

При пожарах, длящихся несколько часов, у поверхности может развиваться сильный всасывающий спиральный вихрь, который будет раздувать и усиливать пожар [5, 2].

Свойства дыма и сажи. Дым, образующийся при горении, имеет различные формы. При медленном горении образуется слегка окрашенный дым, состоящий из капель масел, в состав которых входят нелетучие органические соединения. Горение с пламенем производит черный дым, богатый сажой. Температура пламени достаточно высока, поэтому органические молекулы разлагаются с образованием ионов и радикалов с высоким содержанием углерода. Высвобождающийся водород либо окисляется, либо рассеивается в атмосфере. При тлеющем горении температуры недостаточно высоки для пиролиза, поэтому элементарный углерод практически не образуется. При больших пожарах дым состоит из набора компонентов, в том числе из капель масла, сажевых агрегатов, смешанных масляных сажевых частиц, частиц пыли, летающих частиц золы и фонового (окружающего) аэрозоля; дым состоит из различных смол (55 %), сажи (25 %), золы (20 %). В реальных пожарах сгорание редко бывает полным, поэтому частицы дыма и сажи, выброшенные в атмосферу, содержат заметную долю несгоревшей органики. Сажа является сложной смесью аморфного элементарного углерода и тяжелых углеводородов. Чем выше содержание

Таблица 3

q , Вт/м ²	h , км	K , %/км	q , Вт/м ²	h , км	K , %/км
$\geq 5 \cdot 10^4$	0-0,5	30	$\leq 10^4$	0-0,5	40
	0,5-2	2,5		0,5-1	10
	2-9	5		1-2	25
	9-12	15		2-4	5
	12-12,5	2,5		4-7	10
	> 13	0		7-9	2
			9-11	3	
			12	0	

элементарного углерода в дыме, тем более черным он кажется.

Средний коэффициент генерации дыма (выход дыма) для всех видов пожаров равен 0,04 (при сгорании 1 г топлива образуется 0,04 г дыма), для дерева — 0,015, для асфальта — 0,07 (данные лабораторных исследований, на больших площадях пожара коэффициент генерации дыма может быть гораздо больше). Количество дыма и элементарного углерода, образующихся при сгорании любых материалов, может изменяться по крайней мере вдвое. В крупных пожарах коэффициент генерации дыма может быть выше. Коэффициент генерации дыма в лесных пожарах 0,01 (заниженная оценка) [6].

Свыше 90 % частиц дыма имеет диаметр 1 мкм, среднемассовый радиус частиц 0,4 мкм, среднее значение радиуса частиц 0,4-0,9 мкм, максимум распределения наблюдается при частицах радиусом 0,1 мкм.

Концентрация дыма в факеле не очень больших пожаров $\sim 10^{-7}$ г/см³, частиц дыма $\sim 10^4$ - 10^5 см⁻³ [7].

Распределение дыма в атмосфере. Распределение дыма по высоте в атмосфере определяется в основном масштабом пожара, его интенсивностью и состоянием атмосферы, в частности содержанием влаги в ней. Относительно малые пожары инжектируют дым в область над приземным атмосферным слоем (так, горение растительности на площади от 1 до 100 га инжектирует дым на высоту от 1 до 6 км). Большие пожары доставляют дым в район тропопаузы и даже в стратосферу (так, сильный лесной пожар на площади 100 км² поднял дым на высоту 14 км; при этом средний расход топлива составил $1,4 \cdot 10^5$ т/ч, мощность пожара ~ 10 МВт).

При сильных пожарах возникают мощные восходящие потоки воздуха и направленные к очагу ветры у поверхности земли — огненный шторм. При этом интенсивность тепловыделения $\geq 10^5$ - 10^6 Вт/м²; через ~ 1000 с устанавливается почти стационарный вертикальный поток воздуха со скоростью $u \geq 75$ м/с и температурой, выше окружающей более чем на 20 °С; за время ≤ 5 мин частицы дыма поднимаются в верхнюю часть облака — наковальню — на высоту 8-12 км. В Хиросиме огненный шторм возник приблизительно через 20 мин после ядерного взрыва; при этом появился ветер, двигавшийся к центру взрыва со скоростью 50-65 км/ч в течение 2-3 ч, затем в течение 6 ч скорость уменьшилась и ветер утих.

Общая масса заброшенных в верхние слои атмосферы частиц зависит от скорости дымообразования, локальных метеорологических условий, интенсивности пожара и эффективности процессов вымывания, происходящих в конвективной колонке. При конденсации водяного пара в процессе охлаждения поднимающейся смеси воздуха и дыма, происходящего из-за адиабатического расширения и вовлечения окружающего воздуха, при опре-

деленных условиях могут образовываться кучево-дождевые облака. Из-за выделения при конденсации скрытого тепла высота подъема воздуха (и частиц дыма) еще более возрастает.

Вертикальное распределение дыма K при больших и малых потоках тепла q поверхности приведено в табл. 3.

Концентрация сажи в атмосферном воздухе при ядерном пожаре по порядку величины определяется высотой газодымового столба h : $K \sim \mu\beta/h$. Для $\mu \approx 20$ кг/м² и $\beta \approx 0,01$ $K \approx 2 \cdot 10^{-8}$ г/см³ при $h \approx 10$ км и $K \approx 2 \cdot 10^{-7}$ г/см³ при $h \approx 1$ км.

Осадками, индуцированными в огневой колонке пожаров, может быть вымыто до 50 % дыма и до 25 % сажи в течение первых суток пожара. Оставшийся после вымывания дым «старится» и постепенно (в течение нескольких дней и больше) рассасывается в атмосфере.

ЛИТЕРАТУРА

1. Турко Р. П., Гун О. Б., Аккерман Г. Р. и др. Климат и дым: оценка физических эффектов, приводящих к ядерной зиме // Успехи физ. наук. 1991. Т. 161, № 3. С. 89–123.
2. Последствия ядерной войны. Физические и атмосферные эффекты / Б. Питток, Т. Акермен, П. Крутцен, М. Мак-Кракен, Ч. Шапиро, Р. Турко. М.: Мир, 1988.
3. Действие ядерного оружия. М.: Военное изд-во Министерства обороны СССР, 1963.
4. The Effects of Atomic Weapons. I / S. Glasston, Ph. Dolan (Eds). 1977.
5. Голицын Г. С., Гинзбург А. С. Природные аналоги ядерной катастрофы. Климатические и биологические последствия ядерной войны. М.: Наука, 1987.
6. Голицын Г. С. Последствия ядерной войны для атмосферы // Природа. 1985. № 6(838). С. 22–29.
7. Гришин А. М. Математическое моделирование лесных пожаров и новые способы борьбы с ними. Новосибирск: Наука, 1992.

Поступила в редакцию 25/III 1996 г.
