

В.Б. Цветков¹, В.Ф. Серегин¹, Д.Ю. Ципенюк¹, Р.Г. Аванесов²
(¹Институт общей физики РАН, ²"ИП Аванесов Р.Г.";
e-mail: seregin@lsk.gpi.ru)

ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ СВЕТОВОГО СИГНАЛА ОТ ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНТНЫХ УКАЗАТЕЛЬНЫХ ЗНАКОВ В УСЛОВИЯХ ЗАДЫМЛЕНИЯ

Создана математическая модель распространения светового сигнала от фотолюминесцентных систем в условиях задымления. Проведены экспериментальные и расчётные исследования процесса распространения света в задымленной среде от различных источников света, а также от фотолюминесцентных знаков.

Ключевые слова: пожар, задымление, видимость знаков, фотолюминесцентные знаки.

V.B. Tsvetkov, V.F. Seregin, D.Yu. Tsypenjuk, R.G. Avanesov
**INVESTIGATION OF THE LIGHT SIGNAL PROPAGATION
FROM PHOTOLUMINESCENT INDICATING SIGNS
IN THE SMOKE AREA**

The model of the light signal propagation from photoluminescent signs in the conditions of smoke blanketing are created. Experimental and computer modeling research of the process of light propagation from various light sources and also photoluminescent signs are carried out for the smoke environment.

Key words: a fire, smoke blanketing, visibility of signs, photoluminescent signs.

Статья поступила в редакцию Интернет-журнала 28 октября 2010 г.

Введение

При возникновении пожара дым является одним из поражающих факторов для людей. Кроме того, дым может затемнять путь к выходу, уменьшая возможность распознавания указательных знаков и уменьшая безопасное время нахождения в опасной зоне.

Проведенное авторами исследование касается только оптических характеристик дыма и его влияния на уменьшение возможности распознавания указательных знаков.

Для создания математической модели распространения света и оценки дальности видения в задымленном помещении следует сначала определить возможные физические причины ослабления светового сигнала.

Обычно воздух в зоне пожара имеет локально неоднородную структуру (пыль, тепловые флуктуации параметров, загрязнение воздуха продуктами горения и т.п.), что приводит к поглощению и рассеянию, то есть к ослаблению света при его распространении. Зависимость ослабления от длины волны излучения в среде может иметь как селективный, так и неселективный характер.

Для оценки дымообразующей способности веществ и материалов используется коэффициент дымообразования (ГОСТ 12.1.044-89), который является модифицированным показателем рассеяния, то есть в методе испытаний используется модель, предложенная Бугером и опробованная на растворах и га-

зах. Метод, установленный в ГОСТ 12.1.044-89, пригоден только для классификационного сравнения веществ и материалов между собой и не даёт никакой информации о реальной дымообразующей способности образца, которая могла бы быть использована в качестве исходных данных для расчёта реальной глубины видения в задымлённой среде при пожаре.

Отчасти это связано с тем, что используемая в методе физическая модель не полностью соответствует реальным условиям. Это связано с тем, что размер рассеивателей в случае с дымом (дымовых частиц) может быть значительно больше молекул-рассеивателей в растворах и газах, поэтому рассеяние света происходит иначе (по иному механизму). Закон Бугера-Бэра работает с приемлемой точностью только для сред, в которых происходит Рэлеевское ("упругое") рассеяние. Однако Рэлеевское рассеяние возможно тогда, когда размер рассеивателя значительно меньше длины волны.

В зоне пожара воздух представляет собой оптическую среду, состоящую из смеси газов и водяного пара с взвешенными в ней посторонними твердыми и жидкими частицами – аэрозолями (капельки воды, появляющиеся при конденсации водяного пара, пылинки, частицы дыма и др.), размер которых колеблется от $5 \cdot 10^{-8}$ до $5 \cdot 10^{-5}$ м. Но если сопоставить размер самых маленьких дымовых частиц и длины волны света видимой части спектра, то станет понятно, что Рэлеевское рассеяние реализуется в малой степени. Это означает, что модель, которая применяется для метода испытаний на дымообразующую способность и основанная на применимости закона Бугера-Бэра может быть применена не во всех случаях. Тем не менее, этот закон, описывающий ослабление света при его распространении, применяется для расчётов, хотя для больших показателей ослабления он неточно описывает изменение мощности излучения, проходящего через задымленные области [1].

Таким образом, наиболее сложным моментом в расчёте прохождения света в зоне горения различных веществ является корректный учёт рассеяния света.

Количественной характеристикой рассеяния света и при классическом, и при квантовом описании является дифференциальное сечение рассеяния $d\sigma$, определяемое как отношение потока излучения dI , рассеянного в малый элемент телесного угла $d\Omega$, к величине падающего потока I_0 : $d\sigma = dI / I_0$. Неполной, но наглядной характеристикой рассеяния света служит индикатриса рассеяния – кривая, графически отображающая различие в интенсивностях света, рассеянного в разных направлениях.

Вследствие обилия и разнообразия факторов, определяющих рассеяние света, весьма трудно развить одновременно единый и детальный способ его описания для различных случаев. Поэтому рассматривают идеализированные ситуации с разной степенью адекватности самому явлению. Эти ситуации включают (см. [2-4]) рассеяние света отдельным электроном (Томсоновское рассеяние света); атомами, молекулами и молекулярными ансамблями (Рэлеевское рассеяние) мелкими частицами (рассеяние Лява-Ми) и большими частица-

ми ($r \gg \lambda_n$, рассматривают на основе законов геометрической оптики с учётом интерференции лучей, отражённых и преломленных на поверхностях частиц).

Рассеяние света средами, состоящими из большого числа частиц, существенно отличается от рассеяния отдельными частицами. Это связано, во-первых, с интерференцией волн, рассеянных отдельными частицами, между собой и с падающей волной. Во-вторых, во многих случаях важны эффекты многократного рассеяния (переизлучения), когда свет, рассеянный одной частицей, вновь рассеивается другими. В-третьих, взаимодействие частиц друг с другом не позволяет считать их движения независимыми.

Дым – устойчивая дисперсная система, состоящая из мелких твёрдых частиц с характерным размером частиц от 10^{-7} до 10^{-5} м, находящихся во взвешенном состоянии в газах. В отличие от пыли – более грубодисперсной системы, частицы дыма практически не оседают под действием силы тяжести. Частицы дыма могут служить ядрами конденсации атмосферной влаги, в результате чего возникает туман. Дымы могут содержать крупные частицы несгоревшего топлива и золы, окислов металлов, сажи, смолы [5].

Разными авторами были проведены экспериментальные и теоретические исследования законов поглощения и ослабления света продуктами горения [6-12]. Также пристальное внимание уделялось изучению рассеяния света продуктами горения (в основном частицами сажи) [13-15], определению размеров агломератов хлопьев сажи и эффективного радиуса их вращения и влияния этих факторов на пропускание света.

Было показано, что сажа обуславливает как поглощение, так и рассеяние света. Причем доля рассеяния в общем ослаблении света, определяемая разными авторами, отличалась более чем на 30 %. Причина таких отличий лежит в различных размерах сажевых агломератов, получаемых разными экспериментаторами, поскольку в разных работах использовались различные горючие вещества для получения дыма для исследований. Исследования проводились, как правило, в ламинарном потоке дыма различной оптической плотности. Для изучения пропускания света в различных спектральных диапазонах использовались источники белого света (лампы накаливания), либо лазеры с длинами волн 0,63 мкм (красный свет) и 0,53 мкм (зеленый свет).

Математическая модель распространения света в условиях задымления

Для создания математической модели распространения света в условиях задымления необходимо учитывать ослабление светового потока как из-за поглощения, так и из-за рассеяния света. Для расчёта использовалась программа ZEMAX, позволяющая корректно учитывать как поглощение в среде, так и рассеяние.

При этом в последовательном режиме проводился расчёт распространения света в среде с различными величинами ослабления и для разных расстояний до фотолюминесцентной информационной таблички или знака, а в непоследовательном (NSE) режиме уточнялись величина и распределение освещенности в плоскости приемника, что необходимо для оценки дальности видимо-

сти. В условиях пожара понятие дальности видимости становится принципиально важным.

Первоначально понятие видимости объекта было сформулировано как понятие метеорологической дальности видимости (МДВ) и было введено Международной метеорологической конференцией (1929 г.), которая вынесла согласованное со всеми странами решение об определении (оценке) МДВ на основной сети гидрометеорологических станций по 10-бальной шкале [16, 17]. К сожалению, это определение связано с субъективными представлениями о пропускании через понятие порогового контраста, входящего в эти формулы.

В связи с тем, что в условиях пожара яркость аварийных указателей ниже, чем в стандартных условиях, а при выключении общего освещения глаз вынужден адаптироваться к условиям низкой освещенности, то данное определение не вполне применимо. Обычно в методических указаниях по расчёту условий эвакуации и определению опасных условий, возникающих при пожаре, используют понятие предельной видимости в дыму. При этом оптическая плотность дыма при обычных условиях связана с расстоянием предельной видимости в дыму соотношением:

$$L_{пред} = 2,38/\sigma,$$

где σ – показатель ослабления для воздуха, m^{-1} .

Безусловно, это понятие также не свободно от субъективизма, однако в наших оценках должно использоваться именно расстояние предельной видимости в дыму, как общепринятое в литературе по пожарной безопасности.

Возможности предложенной методики расчёта на основании изложенной выше модели можно продемонстрировать путем расчёта изображения фотолюминесцентной таблички, полученного при прохождении света через слой задымленного воздуха с различной величиной пропускания и сравнения результатов расчёта с последующим модельным экспериментом.

Для возможности проверки результатов расчёта рассматривалась задача, в которой светящийся объект (фотолюминесцентная табличка или лампа накаливания с диаметром светящегося тела 3 мм) располагались на удалении 2 м от фотоаппарата. Изображение формировалось на ПЗС-матрице с помощью фотообъектива, характеристики которого закладывались в расчёт.

Расчёт (рис. 1, 2) проводился для поля зрения объектива 26° , для трех длин волн – 0,48; 0,59 и 0,66 мкм, что наилучшим образом моделировало возможности используемой модели и программы для расчёта изображений фотолюминесцентных табличек всех используемых цветов (синий, желтый, зеленый и красный).

На рис. 1. показаны диаграммы пятен рассеяния для трех углов поля зрения – 0° ; 10° и 12° (сверху вниз) и трех длин волн (слева направо) в отсутствие рассеяния света.

Видно, что в отсутствие рассеяния в задымленной среде точечный источник изображается пятном с эффективным диаметром менее 100 мкм. Число точек на рисунке указывает величину освещенности изображения в относительных единицах.

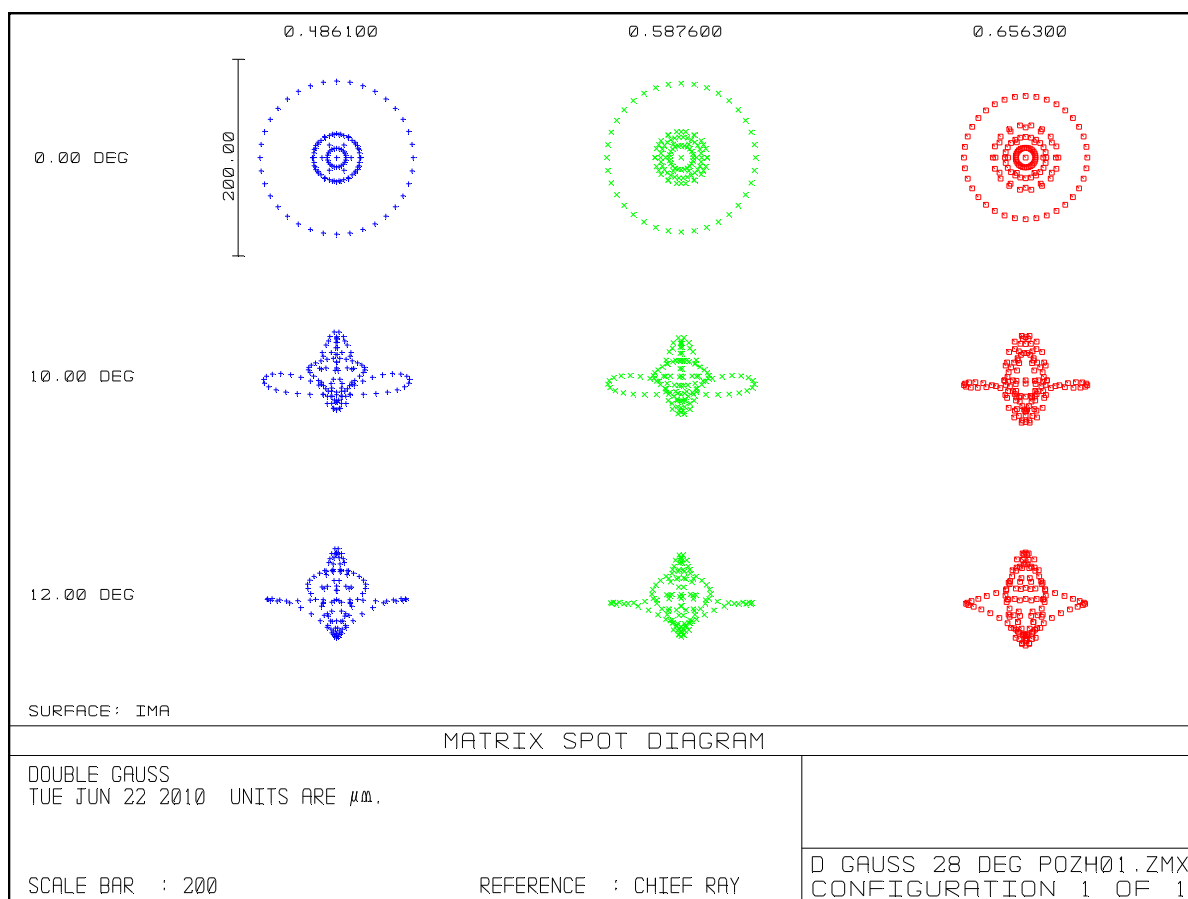


Рис. 1. Диаграммы пятна рассеяния точечного источника в плоскости изображения для трех длин волн (0,48; 0,59 и 0,66 мкм – слева направо) и трёх углов в поле зрения (0°; 10° и 12° – сверху вниз). Среда без рассеяния

При введении рассеяния, отвечающего показателю ослабления $\sigma \approx 0,2 \text{ м}^{-1}$, картина пятна рассеяния изменяется только по величине освещенности (рис. 2), но размытия пятна не происходит.

Данный результат подтверждает известный вывод о том, что как только оптическая плотность среды возрастает выше определенного уровня, то эффекты типа гало, размывающие изображение, в этой среде не наблюдаются при любом типе рассеяния света. В этом случае происходит только ослабление света.

Однако этот расчёт, проведенный в рамках последовательного подхода, не показывает реального ослабления света, что влияет на видность изображения. Для того, чтобы определить изменения видности, необходимо провести расчёты в рамках NSE-подхода.

Показатели ослабления (σ) для расчёта (табл. 1) выбирались из условия согласования с результатами эксперимента.

В расчёте использовалось геометрическое приближение рассеяния. В программе возможно задание любого типа рассеяния, геометрический подход использовался для наглядности (при сохранении строгости общего подхода).

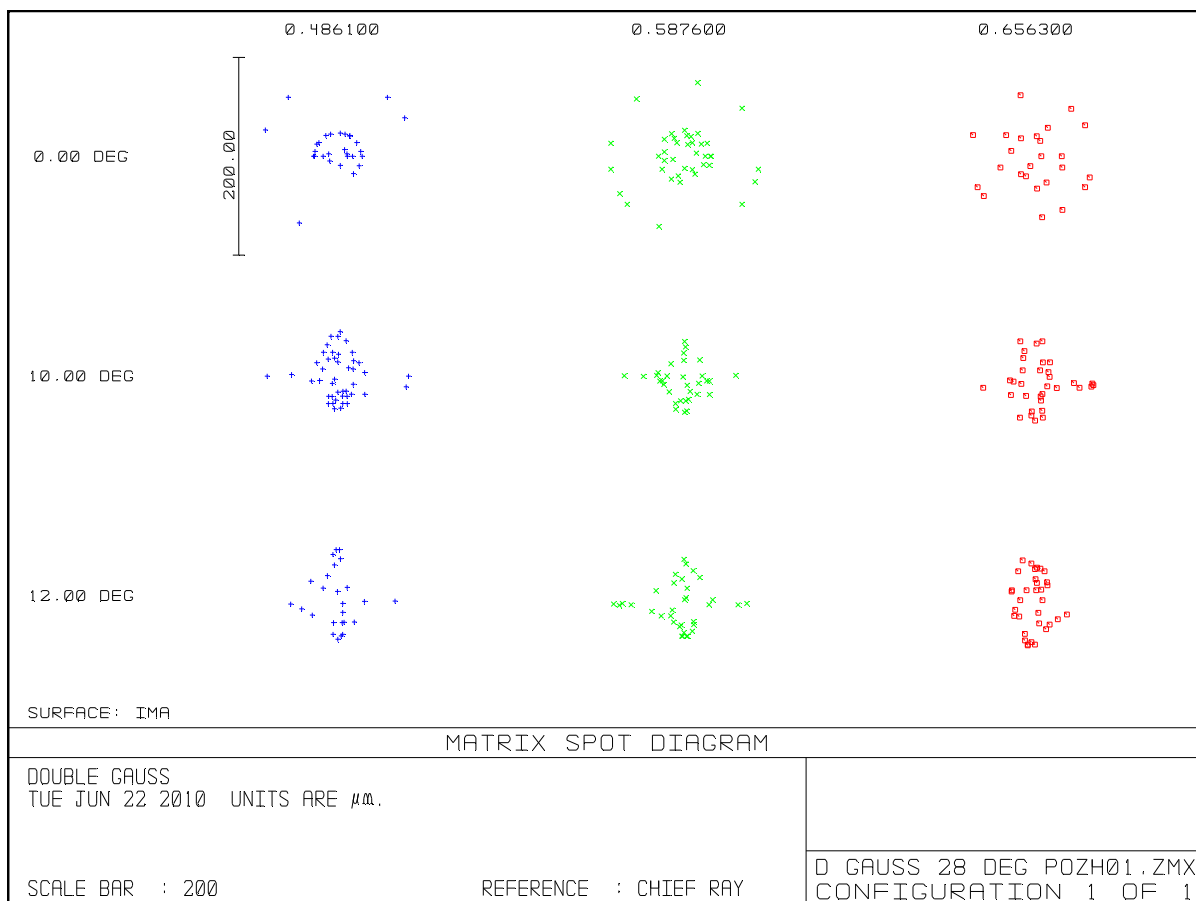


Рис. 2. Диаграммы пятна рассеяния точечного источника в плоскости изображения для трех длин волн (0,48; 0,59 и 0,66 мкм – слева направо) и трёх углов в поле зрения (0°; 10° и 12° – сверху вниз). Задымленная воздушная среда с рассеянием, обеспечивающим ослабление света с показателем $\sigma \approx 0,2 \text{ м}^{-1}$

Таблица 1

Коэффициенты ослабления σ , пропускание T ($L = 2 \text{ м}$), оптические плотности D ($L = 2 \text{ м}$) и расстояния предельной видимости $L_{пред}$, использовавшиеся в расчётах

D	$\sigma, \text{ м}^{-1}$	$L_{пред}, \text{ м}$	$T = I/I_0$
0,16	0,08	29	0,85
0,4	0,2	12	0,67
1,0	0,5	4,8	0,37
2,76	1,38	1,7	0,06

Характеристики рассеяния света в задымленном воздухе подбирались из условия правильного описания экспериментальных результатов, представленных ниже.

При расчёте задавался модельный источник света в виде круглой площадки диаметром 4 мм с мощностью излучения 1 Вт. Изображение этого источника после прохождения задымленного слоя воздуха проектировалось объективом на приемник размером 36 × 24 мм. Расчёт показывает, что при показателе ослабления $1,38 \text{ м}^{-1}$ и пропускании 2 м слоя задымленного воздуха 0,06

на всю площадку приемника попадает около 13 % мощности света источника, а не 6 %, как этого следовало ожидать из оценки по измеренному показателю ослабления. С другой стороны, в центральном керне диаметром около 3 мм (рис. 3, 4) содержится около 3,5 % исходной интенсивности света.

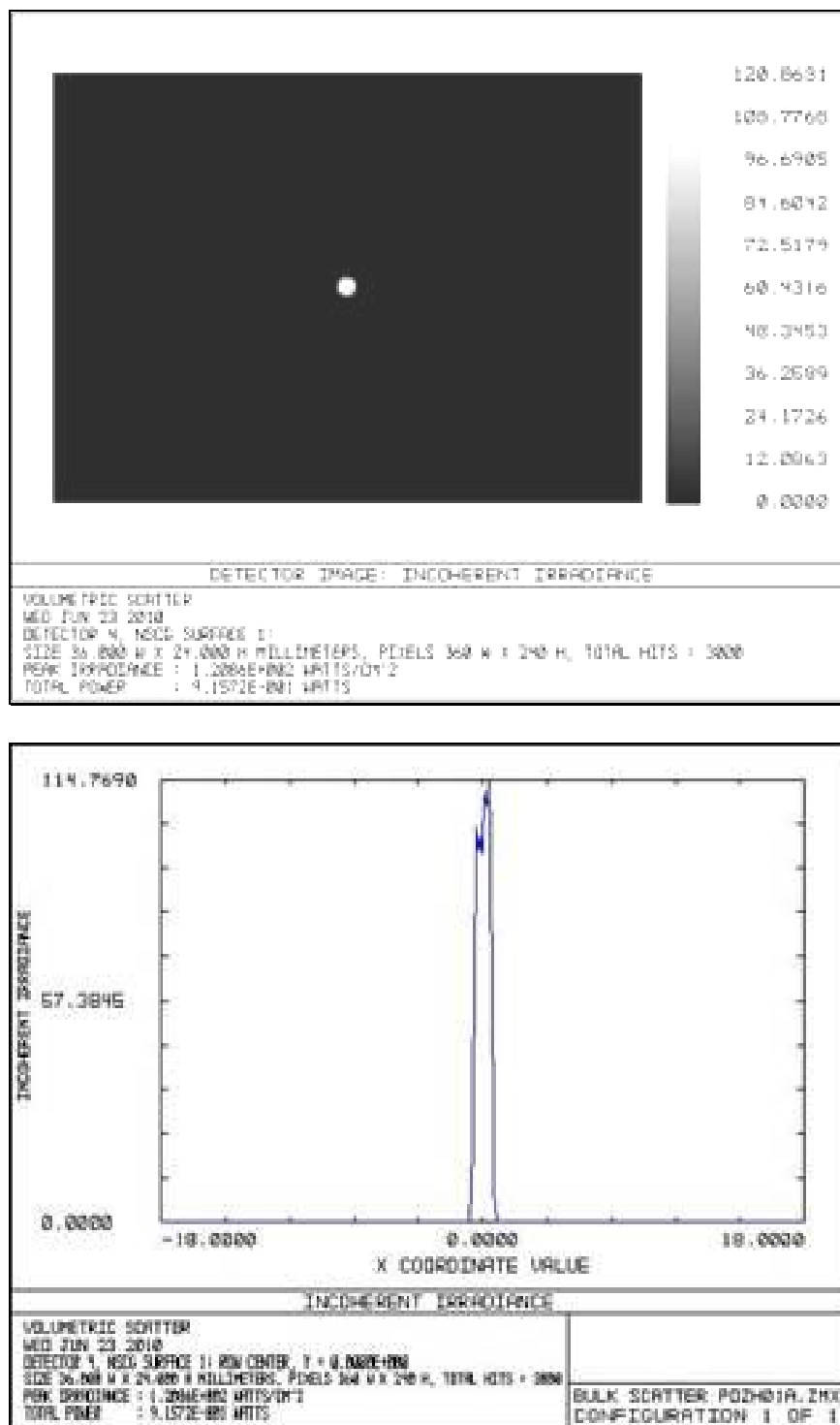


Рис. 3. Расчёт изображения пробного источника света, прошедшего через незадымлённую область. Слева – изображение, справа – поперечное сечение интенсивности света в плоскости изображения

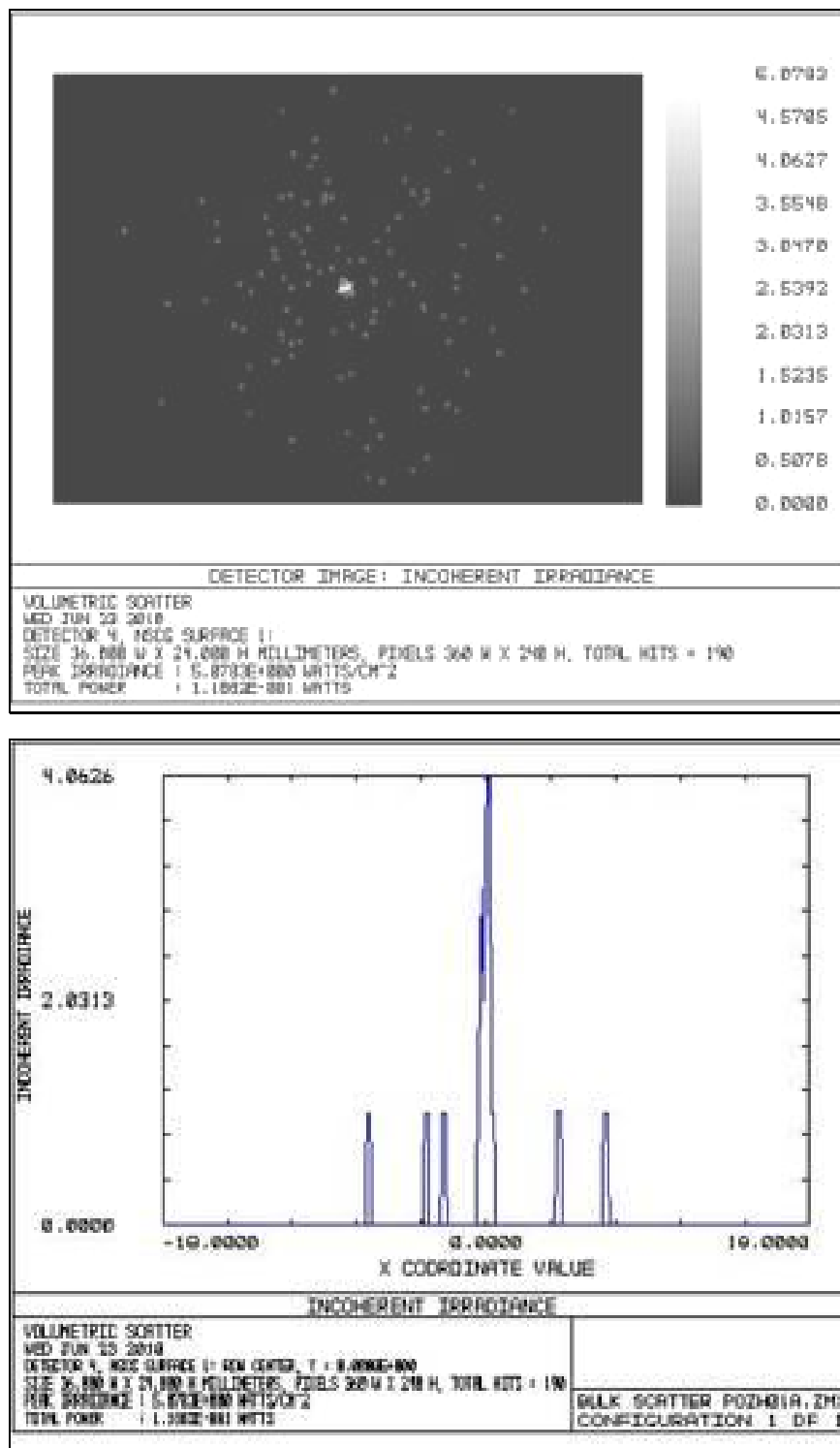


Рис. 4. Расчёт изображения пробного источника света, прошедшего через задымлённую область с показателем ослабления $1,38 \text{ м}^{-1}$. Слева – изображение, справа – поперечное сечение интенсивности света в плоскости изображения

Такой результат получается вследствие того, что в нашем случае ослабление происходит не за счет поглощения, а за счет рассеяния света, при котором закон Бугера выполняется не вполне корректно. Следует отметить, что используемая расчётная модель может правильно описывать изменение интенсивности света за счет рассеяния, не используя для этого закон Бугера. Измерения же показателя ослабления света, проводимые на небольших расстояниях,

являются корректными, поскольку на малых расстояниях многократные акты перерассеяния фотонов еще не сказываются в исследуемом диапазоне показателей ослабления ($0,001-2 \text{ м}^{-1}$). Таким образом, действительная дальность видимости, рассчитываемая по реальному коэффициенту ослабления ($\sigma = 1,68 \text{ м}^{-1}$), полученному при расчёте, оставляет не $1,7 \text{ м}$ (табл. 1), а $1,42 \text{ м}$.

В случае верхнего предела безопасности ($\sigma = 0,5 \text{ м}^{-1}$) реальный коэффициент ослабления (получаемый при расчёте с учётом рассеяния света) составляет $\sigma = 0,6 \text{ м}^{-1}$ и реальная дальность видимости около 4 м , что близко к данным табл. 1. При дальнейшем уменьшении показателя ослабления (увеличении среднего расстояния между актами рассеяния) данные компьютерного расчёта с применением математической модели с учётом рассеяния и расчёта по закону Бугера совпадают.

Учёт адаптационных возможностей человеческого глаза в расчёте проводился за счет использования 3 мм диафрагмы на приемнике, соответствующей диаметру зрачка человеческого глаза в условиях средней освещенности. Полная адаптация человеческого глаза к темноте не учитывалась. Основания для такого решения следующие:

1. На полную адаптацию глаза к условиям низкой освещенности требуется более 3 минут.

2. Расчёты условий развития пожара для разных сценариев, а также натурные эксперименты показывают, что за время $50-100 \text{ с}$ оптическая плотность задымленного воздуха достигает порогового значения $0,1 \text{ м}^{-1}$, а в пределах до 150 с оптическая плотность достигает порога безопасности $0,5 \text{ м}^{-1}$, так что в реальных условиях пожара человеческий глаз не успевает полностью адаптироваться к условиям недостаточной видимости.

Данные, полученные в результате расчёта с использованием созданной математической модели, подтверждаются экспериментом.

Экспериментальные исследования распространения света в условиях задымления

В экспериментах использовались образцы знаков ФЭС с фотолюминесцентными покрытиями различных типов и концентрации.

Таблица 2

Характеристики использованных табличек ФЭС [18]

Знаки безопасности № образца	Яркость послесвечения, $\text{мкд}/\text{м}^2$			Длительность послесвече- ния, мин. (до $0,3 \text{ мкд}/\text{м}^2$)
	10 мин.	20 мин.	60 мин.	
1. Напольные	62	21	11	Более 120
2. Настенные	44	12	5,5	Более 120
3. Переводные	68	28	14,6	Более 120
4. Самоклеющаяся пленка с 30 %-м нанесением фотолюминофоров длительного послесвечения	21	6,8	3,3	Более 120
5. Знак "выход" по ГОСТ Р12.4.026-2001	47	16,3	8,3	Более 120
6. Наклейка на плафон (растровая)	30	11,4	6,2	Более 120

I. Описание измерительного стенда

Для определения характеристик видимости экспериментальных образцов в условиях задымления был собран измерительный стенд (рис. 5).

Он представлял собой герметичный бокс со стеклянными окнами (6, 7), стоящий на массивном основании (11). Для перемешивания воздуха внутри бокса с целью повышения равномерности плотности дыма был установлен вентилятор (5).

Для измерений была выбрана оптопара с хорошими показателями стабильности. Для исключения влияния механических перемещений лазерного луча по поверхности фотодиода источник и приемник были прикручены к оптическому рельсу, а перед входным окном фотодиода поставлено молочное стекло.

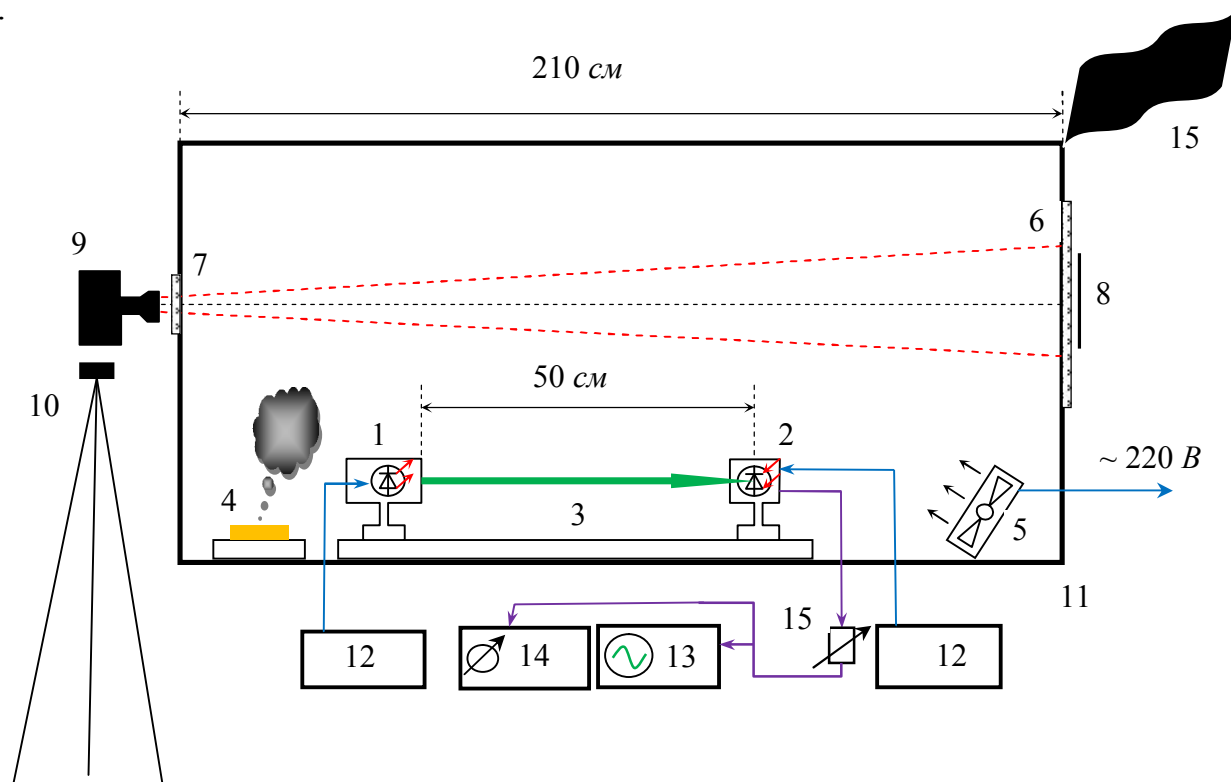


Рис. 5. Схема измерительного стенда:

- 1 - Лазерный диод, 2 - фотодиод, 3- оптическая скамья, 4 – источник дыма,
- 5 – вентилятор, 6, 7 – стекло, 8 – образцы фотолюминесцентных табличек,
- 9 – фотоаппарат, 10 – штатив, 11 – основание, 12 – источники питания,
- 13, 14 – измерительная аппаратура, 15 – штора

II. Проведение измерений

1. Прежде всего, нужно было обеспечить стабильную концентрацию дыма заданного уровня при обеспечении физиологической и пожарной безопасности работающих рядом людей. В результате проведенного анализа был выбран дымообразователь NH_4Cl , который используется для получения дымовых эффектов в театрах и полностью безопасен для здоровья. Возгонка дымообразователя производилась с помощью тепловой смеси, что не приводило к неоднородному повышению температуры внутри бокса и не влияло на точность изме-

рений. Известно, что при возгонке этого дымообразователя образуются частицы, представляющие собой бесцветные кубические кристаллы с характерным размером 0,8 мкм. Это обеспечивает нужную плотность дыма при использовании небольшого количества смеси, а также длительное "время жизни" дымового облака, так как частицы такого размера очень медленно оседают и дым в замкнутом пространстве держится много часов.

2. Измерение плотности полученного дымового облака внутри бокса (рис. 5) производилось с помощью оптопары: лазер-фотодиод в соответствии с ГОСТ 27902-88. Предварительная калибровка измерительной системы проводилась с помощью нейтральных светофильтров в соответствии с методикой ГОСТ 8.023-2003. Источником тестового светового пучка являлся полупроводниковый лазер (1) с длиной волны 532 нм, соответствующей диапазону максимальной чувствительности человеческого глаза. Перед входным окном фотодиода стояло молочное стекло, что исключало влияние положения тестового пучка на приемной части на величину выходного сигнала. Для того, чтобы точно определять ослабление света, прошедшего через дым необходимо было уменьшить размеры приемной площадки фотодиода, для чего использовалась диафрагма диаметром 3 мм. При этом свет, рассеянный при прохождении через дым, не попадал на приёмную площадку фотодиода и не учитывался в измерениях. Таким образом моделировался прием светового потока человеческим глазом с диаметром зрачка, равным 3 мм. Расстояние между источником и приемником было выставлено – 0,5 м, что, с одной стороны, давало достаточно длинный оптический путь, исключая влияние локальной неравномерности плотности дымового облака, а с другой - достаточную мобильность для перемещения внутри бокса с целью исследования неравномерности облака в разных частях бокса.

3. Фотографирование исследуемых образцов производилось с помощью фотоаппарата OLYMPUS Camedia 8080 (9), помещавшегося на штативе (10) перед окном для съемки (7). Параметры съемки ($A = 3,5$, $S = 1/5$, $ISO = 400$) и фокус выставлялись вручную. Они были подобраны так, чтобы примерно соответствовать чувствительности неадаптированного человеческого глаза. Таким образом, транспарант, не видимый глазом через окно для съемки, не выходил за пределы "чёрного" на полученном фотоснимке. Точное соответствие найти не представлялось возможным из-за постоянно меняющейся чувствительности глаза, но по порядку величины соответствие было достигнуто. Для исключения влияния постороннего света при проведении съемки окно для образцов закрывалось двумя слоями плотной черной ткани ((15) на рис. 5). Свет, прошедший внутрь бокса через окно для съемки и щели, не попадал в апертуру объектива.

Исследуемые образцы перед съемкой засвечивались в течение 30 мин. с помощью двух люминесцентных ламп дневного света с $T_{ув} = 6500$ °K при освещенности объектов 300 люкс. Лампы и время засветки были выбраны так, чтобы обеспечить необходимую силу света и превысить собственное время насыщения люминофора исследуемых образцов.

III. Экспериментальные результаты

1. Измерялась мгновенная и долговременная стабильность сигнала в отсутствие задымления. Собственные шумы фотоприемника составляли единицы милливольт. Полезный сигнал составлял величину порядка 1 В. Для упрощения измерений выходной сигнал с помощью прецизионного регулятора выставлялся точно на величину 1000 мВ и далее измерялась его стабильность. При использовании прецизионного лабораторного блока питания мгновенная нестабильность сигнала составляла единицы мВ, а долговременная (в течение 3 часов) не более 1 %. Так как исследуемые образцы были сгруппированы в 6 групп, общее время измерения не превышало 3 часов.

2. Были измерены время установления равномерного дымового облака и скорость его рассасывания. Замеры проводились в разных местах бокса путем перемещения оптопары вместе с оптическим рельсом. Было показано, что через 15 минут после полного сгорания навески и работы уравнивающего вентилятора неравномерность плотности дыма не превышала величины мгновенной нестабильности (то есть долей процентов). Коэффициент пропускания дымного облака в течение 3 часов медленно возрастал и изменялся не более чем на 10 %, что позволяло спокойно и корректно проводить необходимую съемку.

3. Перед проведением съемки образцы предварительно засвечивались люминесцентными лампами. После этого проводилась их съемка. Первый кадр делался в течение первой минуты после засветки, второй – через 5 минут. Так как интенсивность люминесценции падает в соответствии с [18], а время порядка 1 минуты невозможно точно выдержать (из-за разной конфигурации и количества образцов в группе разное время приклеивания и подготовки), то первый снимок является как бы тестовым, чтобы было с чем сравнить второй, так как в ряде случаев при большой концентрации дыма после 5 минут выдержки образцы были уже не видны, то есть уменьшение светимости образцов фотолюминесцентных табличек на 10 % являлось критическим при большой концентрации дыма (при малой длине предельной видимости).

4. Условия проведения съемок:

Оптическая плотность определяется как:

$$D = \ln(I_0/I) = \sigma L,$$

где I_0 – интенсивность света в отсутствие ослабления (начальная интенсивность), I – интенсивность света, прошедшего через задымленный воздух.

Показатель ослабления:

$$\sigma = D/L, \text{ м}^{-1}.$$

Необходимые значения плотности дыма выбирались по следующим параметрам: нижнее значение должно соответствовать порогам срабатывания пожарных датчиков и извещателей, а верхнее - превышать верхний предел безопасности [20].

**Коэффициенты ослабления σ , пропускание T ($L = 0,5$ м),
оптические плотности D ($L = 0,5$ м)**

D	$\sigma, м^{-1}$	$L_{пред}, м$	$T = I/I_0$	Примечание
0,04	0,08	29	0,96	Нижний порог срабатывания датчиков
0,1	0,2	12	0,90	Верхний порог срабатывания датчиков
0,25	0,5	4,8	0,78	Верхний предел безопасности
0,69	1,38	1,7	0,5	Превышение порога переносимости

В эксперименте реально измерялась величина $T = I/I_0$. Были проведены 2 серии съемок: при пропускании 0,03-0,4 (для $L = 2$ м) и 0,7-0,9 (для $L = 2$ м). Точно заданную величину пропускания получить невозможно из-за отличающихся параметров возгонки разных навесок дымообразователя. Но так как авторов интересовали относительные измерения, удалось уложиться в интересующий диапазон. Первая серия соответствовала максимально допустимым концентрациям дыма, а вторая – порогам срабатывания датчиков, то есть состоянию начала пожара.

При этом слабая различимость знаков и надписей (на пороговом уровне распознавания) наблюдается при пропускании около 0,3 только в течение 1-2 минут после облучения (при яркости послесвечения около $80-200$ мкд/м² [18]), надписи при меньшей яркости послесвечения практически не видны.

Свечение материалов для наклейки с 10 %-30 %-й концентрацией люминофора при пропускании задымленного воздуха около 0,3 ($L = 2$ м) слабо видно через 1 минуту после облучения, а через 5 минут – не обнаруживается.

При увеличении пропускания до величины 0,7-0,8 надписи и наклейки хорошо различаются при яркости послесвечения в диапазоне $20-100$ мкд/м² и плохо различимы при меньшей яркости.

Таким образом, в результате проведенной работы:

1. Созданы математическая модель физического процесса и методика расчётов, позволяющая оценить распространение светового сигнала от фотолюминесцентных систем в условиях задымления.

2. В рамках созданной модели проведено моделирование процесса распространения света в задымленной среде от различных источников света. Показано, что для показателей ослабления света, превышающих $0,5$ м⁻¹, реальное ослабление света при учёте рассеяния выше, чем можно оценить по закону Бугера, а дальность видимости меньше ожидаемой.

3. Проведены экспериментальные исследования видности фотолюминесцентных знаков, табличек и материалов в условиях задымления. Показано, что при пропускании задымленного воздуха меньше 0,5 на длине 2 м (показатель ослабления больше $0,3$ м⁻¹) никакие знаки практически не видны. При пропускании задымленного воздуха больше 0,7 на длине 2 м (показатель ослабления меньше $0,2$ м⁻¹) фотолюминесцентные знаки со светимостью, соответствующей ТУ 26662-001-0115261591-2010, ГОСТ Р12.2.143-2002 от 16.06.2010, хорошо различимы первые 2 минуты, далее их различимость резко падает.

4. Результаты эксперимента и проведенное математическое моделирование показывают, что светимость табличек и знаков ФЭС, определенные ГОСТ Р12.2.143-2002, являются приемлемыми только для табличек и знаков ФЭС, используемых в условиях слабой освещенности. В комбинированных условиях слабой освещенности и задымления помещений знаки различимы только в течение первых 2 минут, что снижает вероятность благополучной эвакуации людей из опасной зоны.

Литература

1. *Gerber H.E., Hindman E.E.* In "Light Absorption by Aerosol Particles", Spectrum Press. Hampton, VA, 1982. P. 231-241.
2. *Ландсберг Г. С.* Оптика, 4 изд. М., 1957.
3. *Хюлст Г.* Рассеяние света малыми частицами, пер. с англ. М., 1961.
4. *Фабелинский И.Л.* Молекулярное рассеяние света. М., 1965.
5. Руководство по коммунальной гигиене, под ред. Ф. Г. Кроткова, т. 1, М., [1961].
6. *Egan M.* Smoke, carbon monoxide and hydrogen chloride production from the pyrolysis of conveyor belting and brattice cloth, US Bureau of Mines, Information Circular IC9304, 1992.
7. *Crampton George P., Loughheed G.D.* Comparison of smoke measurements with standard and non-standard systems // Research Report № 183, 2004. Institute for Research in Construction National Research Council Canada Ottawa, Canada.
8. *Soot Scattering Measurements in the Visible and Near-Infrared Spectrum / Jinyu Zhu and Mun Young Choi, Mulholland George W., Gritz Louis A.* // Colloquium: Soot, PAH and Air Toxics, p.1-26, Chicago, USA, 2000.
9. *Atmospheric Environment / Patterson E.M., Duckworth R.M., Wyman C.M., Powell E.A., Gooch J.W.* // 25:2539-2552 (1991).
10. *Dobbins R.A., Mulholland G.W., Bryner N.P.* Atmospheric Environment. 28:889-97(1994).
11. *Mulholland G.W., Bryner N.P.* Atmospheric Environment. 28:873-87 (1994).
12. *Mulholland G.W., Choi M.Y.* Twenty-Seventh Symposium (International) on Combustion. The Combustion Institute, Pittsburgh, 1998. P.1515-1522.
13. *Cai J., Lu N., Sorensen C.M.* Langmuir 9(11). 2861-2867 (1993).
14. *Wu J.S., Krishnan S.S., Faeth G.M.* Heat Transfer 119:230-237 (1997).
15. *Krishnan S.S., Lin K.C., Faeth G.M.* Proceedings of the ASME33rd National Heat Transfer Conference, HTD99-6, Albuquerque, NM (1999).
16. *Гаврилов В.А.* Прозрачность атмосферы и видимость. Л.: Гидрометеоздат, 1958. С. 167.
17. *Meteo FRANCE.* Внутренний отчет SETIM № 6. Оценка измерителей видимости (июнь 1993 г. – январь 1994 г.). Отчёт проверки – часть I (макет), 1995. С. 20.
18. *Протокол* испытаний № 25 послесвечения знаков фотолюминесцентных эвакуационных систем (ФЭС), изготовленных по ТУ 26662-001-0115261591-2010, ГОСТ Р 12.2.143-2002 от 16.06.2010, ООО НПК "Люминофор".
19. *Tewarson A., Newman J.S.* An experimental investigation of the fire hazards associated with timber sets in mines, Underground metal and nonmetal fire protection, BuMines, IC 8865. P. 86-103, 1981.