

АСПИРАЦИЯ. ЧАСТЬ 2

ОПЫТЫ С ХЛОПКОМ

Неплохов Игорь Геннадьевич

к.т.н., технический директор ООО «Пожтехника»

Аспирационные пожарные извещатели в настоящее время широко используются для защиты атриумов, складов, центров обработки данных, информационно-вычислительных центров и т.д. В общем случае их чувствительность на несколько порядков выше точечных дымовых извещателей (ИПДОТ). Однако эффективность обнаружения малых концентраций дыма различных очагов в значительной степени зависит от типа измерителя оптической плотности среды. В первой части статьи [1], при длине трубы 100 м, было зафиксировано резкое падение чувствительности у сенсора с ИК-оптопарой при тлении хлопка в трубке, у сенсора с синим лазером снижения чувствительности не наблюдалось. Кроме того, была зафиксирована значительная задержка обнаружения монооксида углерода CO по сравнению с реакцией оптического сенсора. Во второй части приведены результаты аналогичных экспериментов с короткой трубой, порядка 8 м. Кроме того были добавлены тесты в виде тления фитиля и нитки на входе трубки.

СЕРИЯ ОПЫТОВ 2

В качестве очага, как и в первой части опытов, используется свечной хлопковый фитиль, который состоит из 10 ниток (рис. 1), что позволяет формировать различные концентрации дыма. Удельная оптическая плотность дыма при тлении фитиля, по сравнению с тлением одной нитки, увеличивается примерно в 4 раза, а не в 10 раз, как, казалось бы, должно



Рис. 1. Хлопковый фитиль свит из 10 ниток

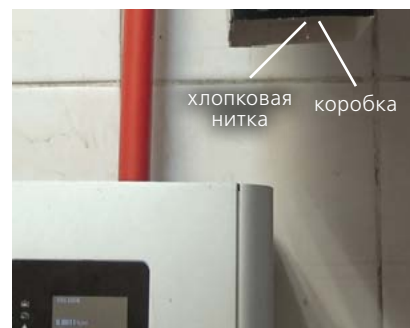


Рис. 2. Тление хлопковой нитки в коробке

было бы на первый взгляд. Нитки в фитиле плотно скручены, за счет чего скорость тления снижается примерно в 2,5 раза по сравнению со скоростью тления одной нитки. В результате чего, в единицу времени фитиль из 10 ниток образует примерно в 4 раза больше дыма по сравнению с одной ниткой. Чтобы дым поступал только через отверстие в заглушке трубы, тлеющая хлопковая нитка или фитиль помещается в коробку объемом 2,3 л (рис. 2). При потоке воздуха через отверстие в заглушке равном 6,5 л/мин. весь объем воздуха из коробки перекачивается в трубу за 21 с. Воздушный поток в коробке достаточно слабый, так что дым от тления хлопка постепенно накапливается в верхней части и успевает состариться за время проведения теста. При соприкосновении друг с другом частицы дыма слипаются, в результате чего постепенно повышается концентрация частиц больших размеров, диаметром 1–2 мкм.

Другой режим тления фитиля обеспечивается при его размещении внутри трубки диаметром $\Phi 10$ мм, за счет наличия воздушного потока около 2,5 м/с и притока кислорода формируется дым с частицами меньшего размера. В отличие от тления хлопка в коробке, в трубке не возникает скопление дыма и он не успевает состариться. Недостатком этого теста является неконтролируемое изменение положения фитиля относительно стенок трубки, и часть сечения трубки перекрывается фитилем, что влияет на режим тления. Кроме того, невоз-

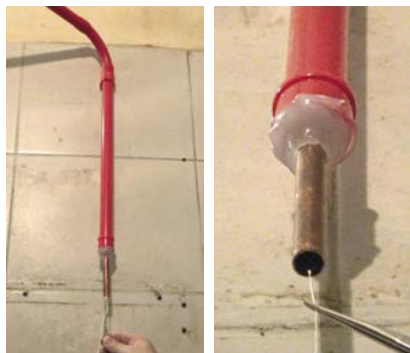


Рис. 3. Тление хлопкового фитиля на входе трубки $\Phi 10$ мм

Рис. 4. Тление хлопковой нитки на входе трубки $\Phi 10$ мм

можно использовать хлопковую нитку, в трубке она быстро гаснет. Для исключения этого недостатка во второй части опытов дополнительно проводились испытания при расположении хлопкового фитиля и нитки на входе трубки (рис. 3, 4). В этом случае обеспечивается больший приток кислорода, предположительно тление хлопка происходит при большей температуре. В таком режиме тления хлопкового фитиля и хлопковой нитки, в отличие от предыдущих тестов, формируются только частицы дыма минимального размера. Дым состоит в основном из частиц диаметром порядка 0,3 мкм, частицы дыма диаметром 0,5 мкм, 1,0 мкм и 2,0 мкм практически полностью отсутствуют.

КОНФИГУРАЦИЯ ТРУБЫ

Для второй части опытов была рассчитана конфигурация короткой трубы, обеспечивающая примерно совпадение по величине воздушного потока в отверстии заглушки и по уровню разбавления дыма со 100-метровой трубой из первой части опытов. Труба аспирационного извещателя состоит из двух горизонтальных участков длиной по 3 м. Для удобства размещения в помещении 3-метровые трубы соединены под углом 45°, при соединении последовательно двух уголков на 90° и на 135°. Общая длина

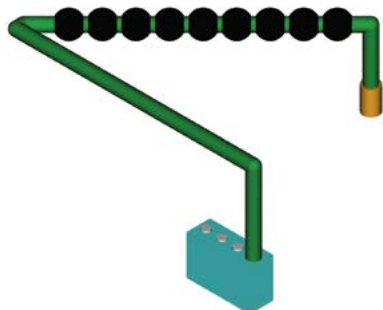


Рис. 5. Конфигурация трубы аспирационного извещателя. Точками обозначены отверстия в трубе

трубы с учетом вертикальных участков около 8 м (рис. 5). В дальней от аспиратора части трубы имеется 9 воздухозаборных отверстий, диаметр первого отверстия $\Phi 2,5$ мм, диаметр остальных 8 отверстий $\Phi 3$ мм. Расстояния между отверстиями одинаковые, равны 0,3 м. Отверстие в заглушке имеет диаметр $\Phi 2,7$ мм. Для данной конфигурации трубы при разрежении аспиратора порядка 350 Па аэродинамический расчет определяет суммарную величину воздушного потока около 65 л/мин., поток через отверстие в заглушке примерно 6,5 л/мин. с разбавлением соответственно в 10 раз. Реальный измеренный аспиратором суммарный воздушный поток находится в пределах 61,5–62,0 л/мин., т.е. незначительно отличается от расчетного. Таким образом, данная конфигурация трубы длиной 8 м обеспечивает практически те же самые параметры по воздушным потокам, что и 100-метровая труба, за исключением времени транспортировки, которое по расчету должно быть порядка 11 с.

СЕРИЯ ОПЫТОВ 3

Третья серия опытов проводится с измерителем удельной оптической плотности среды с синим лазером. На рисунках 6 и 7 приведены графики изменения удельной оптической плотности при тлении хлопковой нитки и хлопкового фитиля соответственно. При тлении хлопковой нитки примерно через 60 с от появления первых признаков дыма удельная оптическая плотность достигает уровня 1,25 %/м, при тлении хлопкового фитиля – уровня 4,2 %/м. Время транспортировки при

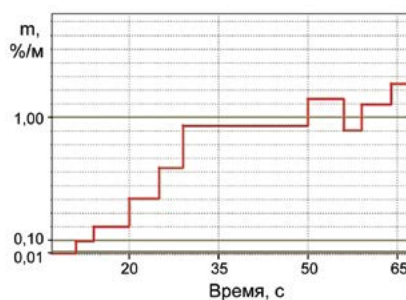


Рис. 6. Оптическая плотность дыма при тлении хлопковой нитки в коробке

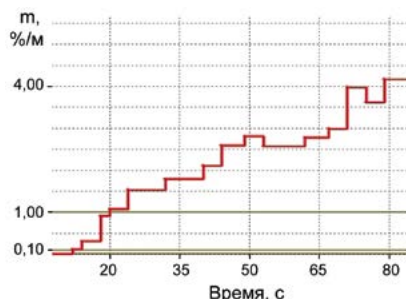


Рис. 7. Оптическая плотность дыма при тлении хлопкового фитиля в коробке

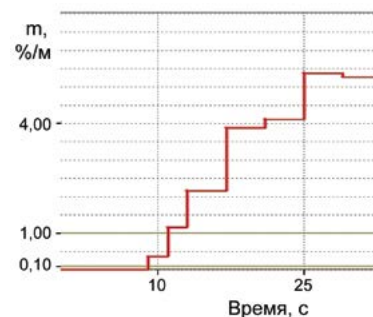


Рис. 8. Оптическая плотность дыма при тлении хлопкового фитиля в трубке

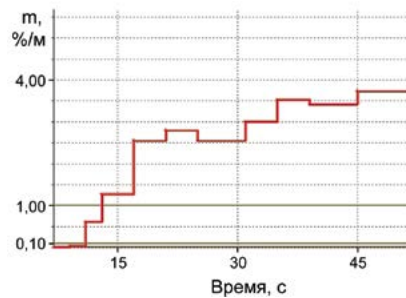


Рис. 9. Оптическая плотность дыма при тлении хлопкового фитиля на входе в трубку

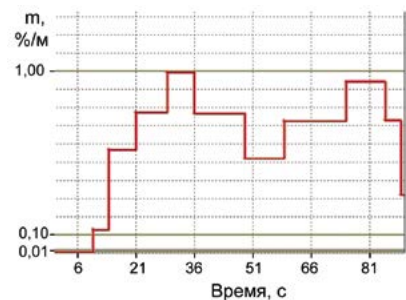


Рис. 10. Оптическая плотность дыма при тлении хлопковой нитки на входе в трубку

тлении фитиля около 12 с. Наблюдается постепенное нарастание концентрации дыма, но с другой динамикой по сравнению с трубой длиной 100 м.

На рисунке 8 приведен график изменения удельной оптической плотности при тлении хлопкового фитиля в трубке с внутренним диаметром $\Phi 10$ мм. Время транспортировки составляет примерно 8 с. За 15 с удельная оптическая плотность дыма от уровня фона (0,004–0,005 %/м) повышается до 5,27 %/м, что на 25% больше по сравнению с тлением фитиля в коробке, предположительно за счет повышения скорости тления в воздушном потоке.

На рисунках 9 и 10 приведены графики изменения удельной оптической плотности при тлении хлопкового фитиля и хлопковой нитки на входе в трубку (рис. 3, 4). Удельная оптическая плотность дыма достигает величин 3,73 %/м и 1%/м соответственно. Время транспортировки при тлении фитиля около 10 с. Уровни немного ниже по сравнению с тле-

нием фитиля и нитки в коробке, что может объясняться более полным сгоранием хлопка, в результате чего образуется дым с частицами минимального размера, диаметром порядка 0,3 мкм.

Здесь можно отметить, что как и в первой части, у измерителя удельной оптической плотности с синим лазером не наблюдается падения чувствительности по дымам от тления хлопка с частицами минимального размера.

СЕРИЯ ОПЫТОВ 4

Четвертая серия опытов позволяет исключить инерцию сенсора монооксида углерода в перечне причин задержки газообразной составляющей дыма по отношению к оптической составляющей и уточнить минимальный размер частиц дыма, на которые реагирует измеритель оптической плотности среды с оптопарой инфракрасного диапазона. Используется та же конфигурация трубы длиной около 8 м (рис. 5) и те же типы очагов, что в предыдущей серии опытов 3.

На рисунке 11 приведен график изменения оптической плотности и концентрации CO при тлении хлопкового фитиля в коробке. Концентрация дыма в дежурном режиме на уровне 0 ед., концентрация монооксида углерода 2,2–2,3 ppm. Первые признаки появления оптической составляющей дыма, на уровне 3–5 ед., наблюдаются примерно через 12 с, появление концентрации CO с превышением фона примерно в 1,5 раза – через 14 с от начала теста. Тление фитиля продолжалось 51 секунду, что точно совпадает с продолжительностью нарастания концентрации дыма (рис. 11). Максимальные показания измерителя оптической плотности среды 1202 ед., максимальная концентрация CO равна 41,7 ppm.

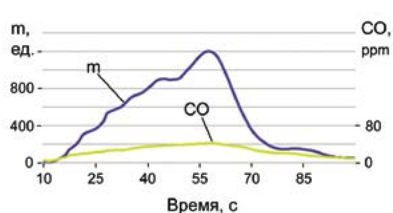


Рис. 11. Оптическая плотность дыма и концентрация CO при тлении хлопкового фитиля в коробке

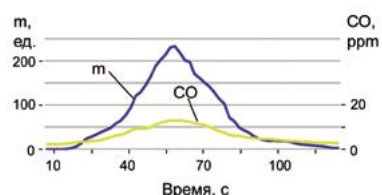


Рис. 12. Оптическая плотность дыма и концентрация CO при тлении хлопковой нитки в коробке

На рисунке 12 приведен график изменения оптической плотности и концентрации CO при тлении хлопковой нитки в коробке. Тление нитки продолжалось в течение 47 с. Как и в предыдущем опыте, наблюдается плавное нарастание концентрации дыма, но продолжительность его немного меньше длительности тления нитки, поскольку отсутствует реакция на минимальные концентрации дыма в начале теста. В дежурном режиме до начала испытаний концентрация дыма равна 0–1 ед., концентрация монооксида углерода на уровне 2,1–2,4 ppm. Первые признаки появления дыма, на уровне 3–4 ед., наблюдаются через 17 с от начала тления нитки в коробке, повышение концентрации CO до уровня 3,1–3,2 ppm происходит через 19 с. Максимальные показания измерителя оптической плотности – 233 ед., максимальная концентрация CO – 13,0 ppm. Максимумы совпадают по времени (рис. 12).

На рисунке 13 приведен график изменения удельной оптической плотности и концентрации CO при тлении хлопкового фитиля в трубке с внутренним диаметром $\Phi 10$ мм. Концентрация дыма в дежурном режиме до начала испытаний равна 0–1 ед., концентрация монооксида углерода на уровне 3,3–3,4 ppm. Первые признаки появления дыма, на уровне 2 ед. и CO на уровне 6,5 ppm наблюдаются примерно через 10 с от начала теста. Тление фитиля продолжалось 50 с. Нелинейное изменение оптической плотности среды и концентрации монооксида углерода вероятно связано с неконтролируемым изменением положения фитиля относительно стенок металлической трубки. На графике видны два максимума оп-

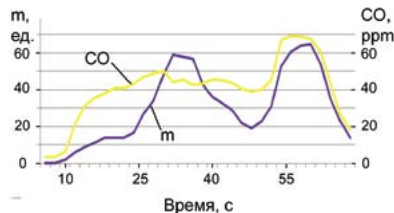


Рис. 13. Оптическая плотность и концентрация CO при тлении хлопкового фитиля в трубке

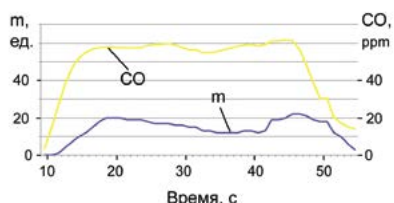


Рис. 14. Оптическая плотность и концентрация CO при тлении хлопкового фитиля на входе трубки

тической плотности на уровне 59 ед. и 65 ед. Концентрация CO достигает величин 51,1 ppm и 69,1 ppm.

По сравнению с тлением фитиля в коробке концентрация CO увеличилась примерно в 1,5 раза, что может быть объяснено более интенсивным тлением хлопка. Уровень оптической плотности упал более чем на порядок. При тлении фитиля в коробке уровни порядка 60–65 ед. набегают через несколько секунд. Определенно наблюдается резкое падение чувствительности оптико-электронного измерителя инфракрасного диапазона с длиной волны порядка 950 нм (0,95 мкм) по дымам с размерами частиц менее 1 мкм.

На рисунке 14 приведен график изменения удельной оптической плотности и концентрации CO при тлении хлопкового фитиля на входе трубки диаметром $\Phi 10$ мм. Концентрация CO в этом случае остается примерно такой же, как при тлении фитиля в трубке, примерно на уровне 60 ppm, а измеренная величина оптической плотности падает еще в 3 раза, до уровня 20–22 ед.

На рисунке 15 приведен график изменения удельной оптической плотности и концентрации CO при тлении хлопковой нитки на входе трубки диаметром $\Phi 10$ мм. По сравнению с предыдущим опытом величина оптической плотности снизилась еще примерно в 3 раза, уже до уровня 7–8 ед. В течение всего теста по совокупности факторов дым и газ CO вероятность пожара равнялась 0%, что качественно отличается от результатов, полученных в серии опытов 3. Определенную ясность при изучении данного эффекта можно получить посредством использования счетчика частиц.

ЧИСЛО ЧАСТИЦ

Для анализа структуры дыма от тления фитиля в различных режимах используется счетчик частиц в воздухе – пылемер. Этот прибор производит забор воздуха со скоростью потока 2,83 л/мин. (0,1 ft³/мин.). В измерительной камере имеется лазер с длиной волны 775–795 нм мощностью 90 мВт. Подсчет частиц производится по 6 каналам: 0,3 мкм, 0,5 мкм, 1,0 мкм, 2,0 мкм, 5,0 мкм, 10 мкм. Эффективность подсчета 50% при 0,3 мкм и 100% для частиц более 0,45 мкм (по ISO 21501). Подсчи-

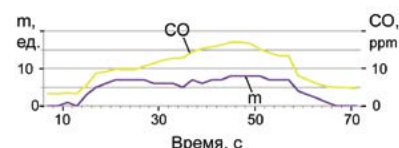


Рис. 15. Оптическая плотность и концентрация CO при тлении хлопковой нитки на входе трубки

танное число частиц по каналам пересчитывается на объем равный 1 л. Забор проб воздуха пылемером производится с выхода аспиратора. Пределы относительной погрешности измерения счетной концентрации аэрозольных частиц $\pm 10\%$, так что сомнений о достоверности приведенных ниже результатов измерений не должно возникать. Для учета величины эффективной поверхности рассеяния (ЭПР) частиц различных диаметров были дополнительно введены коэффициенты, пропорциональные площади сечения. Для числа частиц диаметром 0,3 мкм коэффициент принят равным 1, для числа частиц диаметром 0,5 мкм коэффициент принят равным 2,78, для числа частиц диаметром 1,0 мкм коэффициент принят равным 11,11 и для числа частиц диаметром 2,0 мкм коэффициент принят равным 44,44.

На рисунке 16 приведен график числа частиц диаметром 0,3 мкм, 0,5 мкм, 1 мкм и 2 мкм с учетом величины ЭПР при тлении хлопковой нитки в коробке. В начале теста в большом количестве образуются мелкие частицы диаметром 0,3 мкм и 0,5 мкм. С течением времени появляются частицы больших размеров, диаметром 1,0 мкм и 2,0 мкм. Частицы дыма диаметром 5,0 мкм в течение всего теста присутствуют в количестве 10–100 шт./л на уровне фона, без видимых максимумов, и на графике не показаны. По виду графика можно предположить, что при повышении концентрации дыма в коробке начинается так называемое старение дыма – образование более крупных частиц при объединении исходных частиц минимальных размеров. По окончании тления нитки процесс воспроизводится в обратном порядке.

Сравнивая полученный результат с графиком, приведенным на рисунке 12, можно отметить корреляцию измерений ИК сенсора с концентрацией частиц диаметром 1 мкм и 2 мкм. На появление дыма с частицами диаметром 0,3 мкм и 0,5 мкм ИК сенсор никак не реагирует. Более высокая степень изрезанности графика пылемера по сравнению с плавными кривыми результатов измерений ИК сенсора очевидно объясняется значительно меньшим объемом и соответственно лучшей вентилируемостью измерительной камеры пылемера по сравнению с объе-

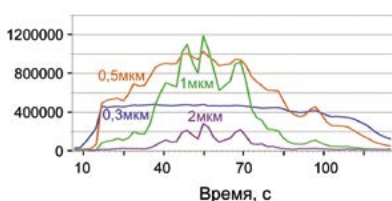


Рис. 16. Нормированная концентрация частиц дыма различного размера при тлении хлопковой нитки в коробке

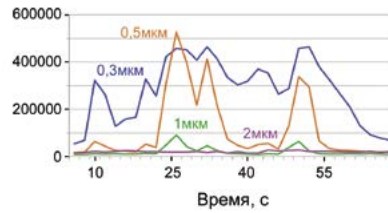


Рис. 17. Нормированная концентрация частиц дыма различного размера при тлении хлопковой нитки в трубке

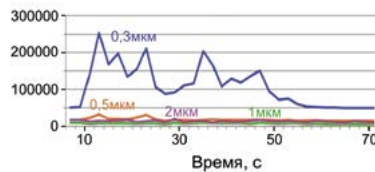


Рис. 18. Нормированная концентрация частиц дыма различного размера при тлении хлопковой нитки на входе трубки

мом измерительной камеры ИК сенсора аспирационного извещателя.

При тлении хлопковой нитки в трубке отсутствует накопление дыма, по этой причине частицы диаметром 1 мкм и 2 мкм практически не образуются (рис. 17). Наблюдается высокая концентрация частиц диаметром 0,3 мкм. При числе частиц диаметром 0,3 мкм более 300 000–400 000 шт./л появляются частицы диаметром 0,5 мкм и некоторое количество частиц диаметром 1,0 мкм. Низкая концентрация частиц дыма крупных размеров отрицательно отражается на результатах измерений ИК сенсора, показанных на рисунке 13. Максимальные показания измерителя оптической плотности достигают всего лишь уровня 60–65 ед.

Тление хлопковой нитки на входе трубки сопровождается образованием дыма практически только с частицами диаметром 0,3 мкм (рис. 18). Уровень частиц дыма диаметром 1 мкм и 2 мкм даже после нормирования остается незначительным. Наблюдается два максимума сравнительно небольшого уровня на графике числа частиц диаметром 0,5 мкм. Это объясняет незначительные уровни оптической плотности ИК сенсора, не более 7–8 ед., показанные на рисунке 15.

Таким образом, посредством анализа распределения числа частиц дыма по их размерам, было получено логичное объяснение парадоксальным на первый взгляд результатам испытаний аспирационного извещателя с ИК светодиодом.

ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Результаты испытаний аспирационных извещателей с трубой длиной 8 м по аналогичным очагам качественно не отличаются от результатов с трубой длиной 100 м. На этом основании мож-

но заключить, что структура дыма при транспортировке по трубе практически не изменяется.

2. При тлении хлопкового фитиля в коробке со временем образуются частицы дыма более крупных размеров, диаметром 1–2 мкм, т.е. происходит старение дыма. При тлении хлопкового фитиля на входе трубки дым состоит практически только из частиц диаметром 0,3 мкм.

3. Измеритель удельной оптической плотности с использованием синего лазера обеспечивает обнаружение частиц дыма различного размера, по крайней мере до 0,3 мкм, без падения чувствительности.

4. Измеритель оптической плотности с ИК свето-фотодиодом практически не реагирует на частицы дыма диаметром порядка 0,3–0,5 мкм, что подтверждает результаты ранних исследований [2, 3].

5. Испытания с трубой длиной 8 м показали отсутствие у сенсора СО инерции измерений, так что отмеченная в части 1 статьи задержка обнаружения монооксида углерода при испытаниях с трубой длиной 100 м определяется исключительно низкой чувствительностью сенсора СО по сравнению с чувствительностью измерителя оптической плотности среды.

В следующих частях статьи будут приведены результаты аналогичных опытов с хлопком для измерителей оптической плотности других типов. Интересно будет сравнить полученные результаты с результатами испытаний аспирационного извещателя с красным лазером, будет ли он способен адекватно реагировать на дым, состоящий исключительно из частиц диаметром 0,3 мкм? Вполне возможно разницу в эффективности работы аспирационных извещателей с синим и красным лазером придется искать по дымам с частицами меньших размеров. Ведь пылемер с лазером, длина волны которого приходится на границу между красным и ИК диапазонами, обнаруживает частицы диаметром 0,3 мкм и 0,5 мкм.

После сравнения эффективности сенсоров различных типов по обнаружению дымов с минимальными размерами частиц появится возможность исследования широкого спектра очагов, что позволит оптимизировать выбор типа аспирационного извещателя для различных приложений.

Литература

1. Неплохов И. Г. Аспирация. Часть 1. Опыты с хлопком // Алгоритм безопасности. 2019. № 3.
2. Драйздейл Д. Введение в динамику пожаров / Пер. с англ. К. Г. Бомштейна. Под ред. Ю. А. Кошмарова, В. Е. Макарова. М.: Стройиздат, 1990.
3. Неплохов И. Г. Двухдиапазонные дымовые пожарные извещатели // Системы безопасности. 2008. № 3.