

УДК [614.842.612: 614.842.615]: 001.891.573

Кострубицкий Алексей Александрович, аспирант

Государственный научно-исследовательский институт горноспасательного дела,  
пожарной безопасности и гражданской защиты «Респиратор» МЧС ДНР  
г. Донецк

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ТУШЕНИЯ ПОЖАРА В ПОМЕЩЕНИИ ПЕННЫМИ И ВОДЯНЫМИ СТРУЯМИ**

Пожары в зданиях и сооружениях до сих пор приносят огромный материальный ущерб, исчисляемый десятками миллиардов долларов в год, в них гибнут десятки тысяч людей. Обеспечение пожарной безопасности – основная задача, которую необходимо выполнять как при постройке, так и при эксплуатации современных жилых и производственных зданий, торгово-развлекательных и масштабных деловых центров.

Особенно сложно вести борьбу с пожарами в замкнутых помещениях, имеющих ограниченные возможности для подачи средств пожаротушения, типа подвальных и полуподвальных помещений, шахт, тоннелей и других вариантов помещений и сооружений. Большое практическое значение имеет борьба с пожарами на начальной стадии их развития в небольших помещениях жилых и административных зданий, производственных и складских помещениях.

Дальнейшие успехи борьбы с пожарами требуют более фундаментального научного и экспериментального подхода, который можно было бы использовать и на этапе проектирования объектов и при их эксплуатации.

Внедрение в практику пожаротушения высокопроизводительных дальнобойных ручных пожарных стволов позволит сократить время тушения пожара, а, следовательно, уменьшить возможное число человеческих жертв, сократить материальные потери, сохранить природные богатства, снизить экологическую опасность от пожаров.

При тушении пожаров в зданиях пеной или водой должны выполняться следующие требования: дальность струи, малый расход, максимально возможная площадь покрытия очага горения, большая скорость поглощения теплоты и высокий охлаждающий и флегматизирующий эффект. Решить вопрос повышения эффективности системы пенного или водяного пожаротушения можно только в результате исследований динамики струй, исследований теплового взаимодействия с очагом пожара жидкой дискретной фазы после распада струй.

Теоретические исследования тепломассообменных процессов при пожарах показали, что с достаточной степенью точности может быть использована зависимость вида

$$\frac{T - T_0}{T_m - T_0} = \left( \frac{\tau}{\tau_m} \right)^4 \exp[4(1 - \tau / \tau_m)], \quad (1)$$

где  $T$  – температура, К;

$T_0$  – температура при нормальных условиях, К;

$T_m$  – максимальная температура, К

$\tau$  – время, мин;

$\tau_m$  – время достижения максимальной температуры, мин.

На рис. 1 приведено изменение относительной температуры в очаге пожара, рассчитанное по формуле (1) (сплошная линия). Здесь же приведена эмпирическая зависимость (штриховая линия) по данным [1]. Как видно, предложенная зависимость (1) для расчёта динамики развития пожара более предпочтительна по своей простоте и точности.

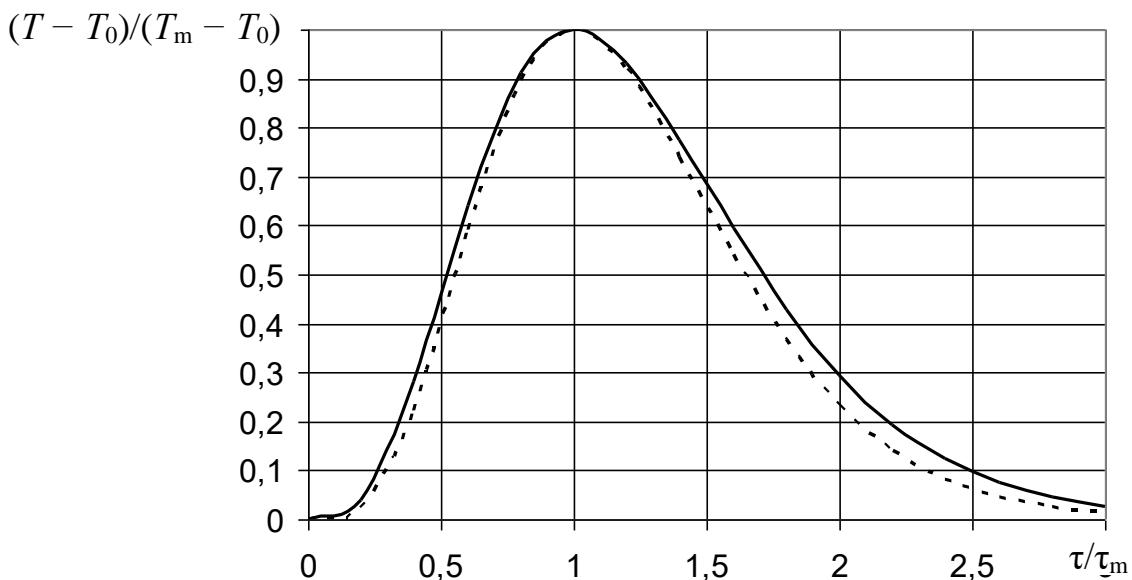


Рис. 1. Изменение температуры во времени в относительных координатах при пожаре в помещении: сплошная линия – формула (1);  
 прерывистая линия – эмпирические данные [1]

Для определения максимальной среднеобъёмной температуры предлагаются формулы [2]

$$\begin{cases} T_m = T_0 + 224g^{0,528}, \\ T_m = T + 940\exp(0,0047g - 0,141), \end{cases} \quad (2)$$

где  $g$  – пожарная нагрузка, кг/м<sup>2</sup>.

Первая формула системы (2) применима при пожаре, регулируемом пожарной нагрузкой (ПРН), а вторая формула – при пожаре, регулируемом вентиляцией (ПРВ).

Вместо эмпирических формул (2) для определения максимума температуры предлагается аналитическая зависимость (3)

$$T_m = T_0 + \frac{1300g}{7 + g}. \quad (3)$$

Результаты сравнения расчётов по эмпирическим формулам (2) и аналитической зависимости (3) приведены на рис. 2.

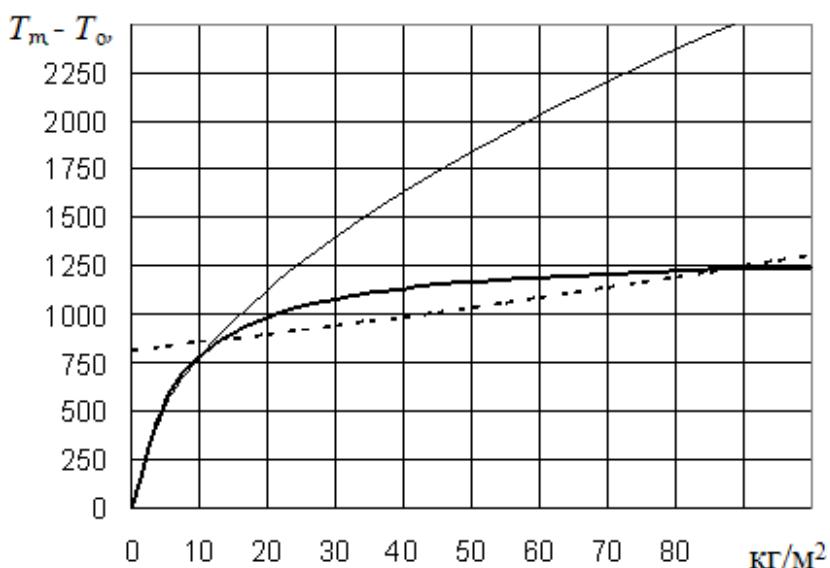


Рис. 2. Зависимость максимальной температуры в очаге пожара от пожарной нагрузки: тонкая линия – для ПРН (первая формула (2)); штриховая линия – для ПРВ (вторая формула (2)); жирная линия – формула (3)

Очевидно, предложенные ранее эмпирические зависимости могут использоваться только раздельно. В то же время зависимость (3) является универсальной для всех пожарных нагрузок.

Для определения положения максимума тепловыделения  $\tau_m$ , мин, в работах [1, 2] предложена эмпирическая зависимость

$$\tau_m = 32 - 8,1g^{3,2} \exp(-0,92g). \quad (4)$$

Её анализ показывает, что она не отражают физической сущности процесса. Во-первых, при отсутствии пожарной нагрузки ( $g = 0$ ) время максимума должно равняться нулю при  $\tau_m = 0$ . Во вторых, не может положение максимума температуры не превышать значения 32 мин.

Всё дело в том, что диапазон изменения пожарной нагрузки в экспериментах [1] находился в узких пределах 0,8...14,4 кг/м<sup>2</sup>. А как же быть, если пожарная нагрузка, как в работе [3], будет составлять  $g = 50\ldots100$  кг/м<sup>2</sup>? Данные исследований показывают, что максимум температуры может наступать и через 1 час и через 2 часа.

Поэтому более правильно предположить с физической точки зрения, что максимум температуры наступает при полностью развитом пожаре, когда пламя охватывает максимально возможную площадь горения. Тогда справедливо равенство

$$\tau_m = 9\sqrt{g} . \quad (5)$$

Достоверность полученной зависимости (5) подтверждается ещё данными при большой пожарной нагрузке. Так, по данным [3] при  $g = 50$  кг/м<sup>2</sup> максимум температуры наступает примерно через 1 час. Это же подтверждают расчёты по формуле (5). При ещё большей пожарной нагрузке, как уже было отмечено, время максимума температуры наступает более через 1 час, а то и через 2 часа [3]. Об этом же говорят расчёты по формуле (5). Так, при пожарной нагрузке  $g = 100$  кг/м<sup>2</sup> время максимума температуры составляет  $\tau_m = 90$  мин.

На рис. 3 приведены зависимости времени максимума температуры от пожарной нагрузки, рассчитанные по формулам (4) и (5).

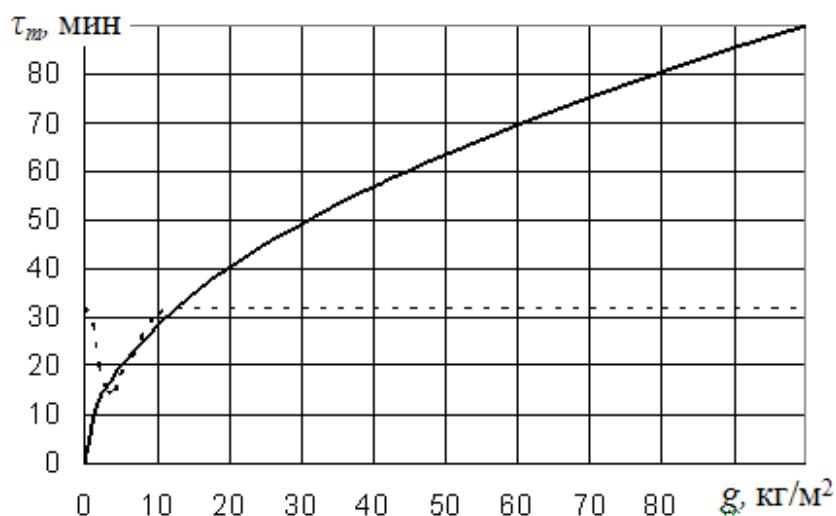


Рис. 3. Зависимость времени максимума температуры от пожарной нагрузки:  
 штриховая линия – эмпирическая зависимость (4);  
 сплошная линия – аналитическая зависимость (5)

С использованием предложенных аналитических зависимостей (1), (3), (5) на рис. 4 представлена динамика развития очага пожара в помещении при различной пожарной нагрузке.

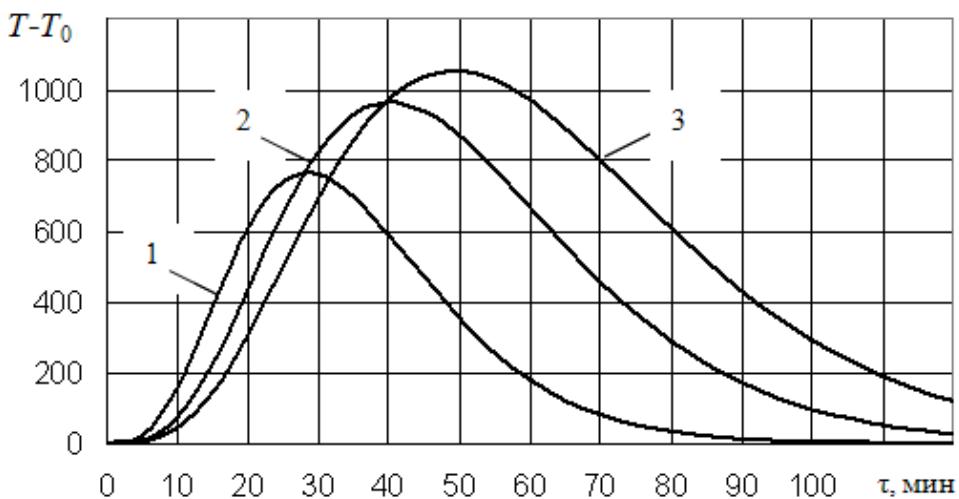


Рис. 4. Динамика развития очага пожара в помещении при различной пожарной нагрузке: 1 –  $g = 10 \text{ кг}/\text{м}^2$ ; 2 –  $20 \text{ кг}/\text{м}^2$ ; 3 –  $30 \text{ кг}/\text{м}^2$

Как видно из рис. 4, развитие пожара в большой степени зависит от величины пожарной нагрузки, приводя с её увеличением к смещению максимума температуры и к его увеличению.

Таким образом, полученные результаты позволяют делать достоверный прогноз ожидаемой температуры в очаге пожара в любой момент времени.

При моделировании развития и тушения пожара учитывалось воздействие пены или воды на горящую поверхность твёрдого материала, сбивая пламя, приводя к увлажнению поверхности и прекращению пиролиза на некоторой её части.

При подаче пены или воды ожидаемую максимальную температуру в очаге пожара  $T_1$ , К, можно определить по формуле

$$T_1 = T_0 + \frac{T_m - T_0}{1 + U\chi}, \quad (6)$$

где  $U$  – удельное влагосодержание в воздухе, кг/кг;

$\chi$  – доля жидкости, испаряющейся в очаге пожара.

При подаче пены или воды удельное влагосодержание в воздухе найдём по формуле

$$U = \tilde{G} / K\tilde{G}_n, \quad (7)$$

где  $\tilde{G}$  – интенсивность подачи пены или воды на очаг пожара, кг/с·м<sup>2</sup>;

$\tilde{G}_n$  – пожаротушащая интенсивность подачи жидкости, кг/с·м<sup>2</sup>.

Очевидно, при кратности пены  $K = 1$  будет происходить подача воды, а при кратности  $K > 1$  – будет подача пены, в которой воды становится всё меньше с увеличением кратности.

Долю испаряющейся влаги найдём, используя зависимость [4]

$$\chi = \exp[-7700 d_k^2 / (T - 273)], \quad (8)$$

где  $d_k$  – средний диаметр капель жидкости, мм.

Очевидно, при отсутствии подачи пены или воды ( $U = 0$ ) или при отсутствии её испарения в очаге пожара ( $\chi = 0$ ) температура не будет меняться ( $T_1 = T_m$ ).

Эффективность охлаждения очага горения в этом случае в большой степени зависит от поверхности контакта жидкой и газовой фаз в зоне высоких температур.

Серия экспериментов была направлена на изучение в полигонных условиях воздействия воздушно-механической пены на очаг пожара. В зависимости от состава горючего материала время развития пожара с выходом на максимум составляло 15...30 мин. Как показали термопары, температура в очаге пожара поднималась до 400...500 °C. Диаметр капель жидкости в этих экспериментах равнялся 0,2...0,4 мм.

Обработка экспериментальных данных и их сравнение с расчётными данными, полученными по формуле (6), показали (рис. 5), что они удовлетворительно согласуются друг с другом при кратности пены в первом эксперименте  $K = 10$  и в последующих экспериментах  $K = 40$ . При этом установлено, что доля испарившейся влаги при диаметре капель 0,2 мм и температуре 450 °C может быть принята равной  $\chi \approx 0,8$ , а пожаротушащая интенсивность  $\tilde{G}_n = 0,06 \text{ кг}/\text{с} \cdot \text{м}^2$ .

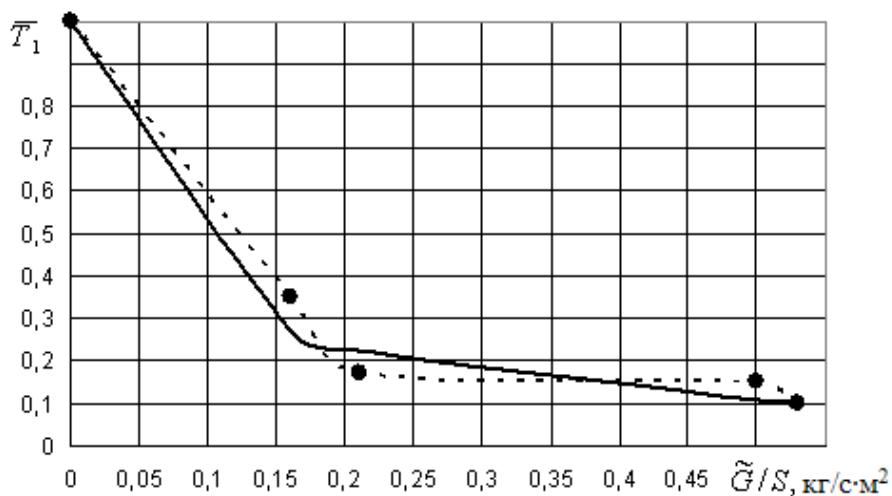


Рис. 5. Изменение относительной температуры очага горения в зависимости от интенсивности подачи воды в пене на очаг пожара: штриховая линия – экспериментальные данные; сплошная линия – расчётные данные по (6)

В первом эксперименте при горении деревянного костра длиною 2 м низкая производительность 0,05 м<sup>3</sup>/с по пено при кратности  $K = 10$ , по сути, не позволила снизить температуру в очаге пожара до 50 °C. Снижение

температуры в конце эксперимента произошло в результате самопроизвольного догорания костра. В следующих двух экспериментах при горении деревянного костра высокая производительность  $0,17 \text{ м}^3/\text{с}$  по пене при кратности  $K = 40$  позволила быстро потушить пожар. Однако в четвёртом эксперименте при той же производительности по пене, но при длине костра 5 м, происходило замедление тушения в связи увеличением зоны горения.

Эксперименты по эффективности воздействия диспергированной воды на очаг пожара проводились при различном её расходе и площади поверхности горящего материала.

В первых трёх экспериментах расход воды не менялся. Перед каждым экспериментом определялась дисперсность капель жидкости, которая была в пределах  $0,1\ldots0,15 \text{ мм}$ . Агрегат для подачи диспергированной воды был расположен в 5 м от первой деревянной рамы.

В первом эксперименте через 25 мин был включён агрегат, после того, как дерево максимально разгорелось. Диспергированная вода подавалась в течение 36 мин. Давление на выходе из пожарного ствола составляло примерно 1,0 МПа. Визуальные наблюдения показали, что горение почти прекращалось, однако после выключение агрегата опять наблюдалось разгорание дерева. Полностью потушить пожар не удалось, что подтвердил анализ пожарных газов на содержание  $\text{O}_2$  и  $\text{CO}_2$ .

Во втором эксперименте длина закреплённого участка была уменьшена и составила всего 2,5 м, а расстояние агрегата до первой деревянной рамы выбрано чуть больше и равнялось 10 м. Площадь закреплённой горящей поверхности составила в этот раз  $15 \text{ м}^2$ .

Спустя 7 мин с момента возникновения пожара был включён распылительный агрегат. Через 38 мин термопары показали снижение температуры менее  $100^\circ\text{C}$ . Образовавшийся при тушении пожара туман передвигался по центру коридора и под его кровлей, а от боковых стоек туман отжимало тепловым потоком. Анализ пожарных газов показал, что незначительное горение крепи продолжалось и при подаче диспергированной воды к очагу пожара. Таким образом, и в этом случае полностью потушить пожар не удалось, так как некоторое время горение ещё имело место.

В третьем эксперименте было также закреплено 2,5 м с общей площадью горящей крепи  $15 \text{ м}^2$ . Расстояние распылительного агрегата до первой рамы выбрано всего 1,5 м.

После возникновения горения крепи через 2 мин был включён распылительный агрегат, и всего через 5 мин пожар был полностью потушен. Диаметр капель во всех трёх экспериментах равнялся измеренному 0,1 мм.

В следующей серии экспериментов ставилась цель, снижая расход диспергированной воды, определить опытным путём нижний предел её огнетушащей интенсивности подачи. Для этого создавался примерно одинаковый очаг пожара длиной 5 м. Общая площадь облицованной части коридора  $30 \text{ м}^2$ . На расстоянии 4...6 м от первой деревянной рамы устанавливался водораспыляющий стенд с пожарным стволом.

Уменьшение расхода воды до 0,72 кг/с в следующем эксперименте не повлияло на эффективность тушения пожара, хотя температура в этом опыте снизилась только до 100 °С.

Дальнейшее уменьшение расхода воды до 0,46 кг/с в четвёртом эксперименте, пожар не был потушен. Температура снизилась с 650 °С всего до 360 °С. Диаметр капель жидкости в этих экспериментах равнялся 0,08...0,1 мм.

Обработка экспериментальных данных и их сравнение с расчётными данными, полученными по формуле (6), показали (рис. 6), что они удовлетворительно согласуются друг с другом со среднеквадратичной погрешностью не более 15 %. При этом установлено, что доля испарившейся влаги при диаметре капель 0,1 мм и температуре 600...700 °С может быть принята равной  $\chi \approx 0,9$ , а пожаротушащая интенсивность  $\tilde{G}_n = 0,015 \text{ кг}/\text{с} \cdot \text{м}^2$ .

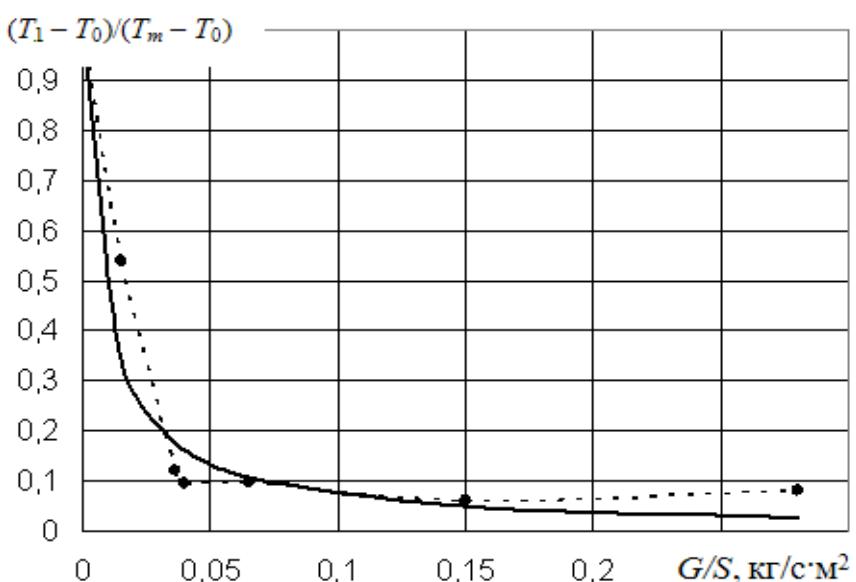


Рис. 6. Изменение относительной температуры очага горения в зависимости от интенсивности подачи воды в пене на очаг пожара: штриховая линия – экспериментальные данные; сплошная линия – расчётные данные по (6)

Время тушения пожара пеной или водой будет зависеть от того, насколько больше заданная интенсивность подачи средства пожаротушения отличается от огнетушащей её интенсивности и от времени с начала тушения пожара.

Таким образом, разработана математическая модель развития и тушения пожара в помещении пеной и водой, учитывающая величину пожарной нагрузки до 100 кг/м<sup>2</sup>. Предложены формулы для расчёта динамики температуры в очаге пожара, времени наступления её максимума и определения величины этого максимума. Предложенные зависимости намного отличаются от известных зависимостей за пределами пожарных нагрузок более 15 кг/м<sup>2</sup>, что повышает их точность.

На основе теоретических и экспериментальных исследований разработан аналитический метод расчёта динамики тушения пожара в помещении пеной

или диспергированной водой, приводящие к резкому снижению температуры до уровня, соответствующего интенсивности подачи применяемого средства пожаротушения.

#### **Список литературы**

1. Термогазодинамика пожаров в помещениях / В.М. Астапенко, Ю.А. Кошмаров, И.С. Молчадский, А.Н. Шевляков. – М.: Стройиздат, 1988. – 448 с.
2. Молчадский, И.С. Пожар в помещении / И.С. Молчадский. – М.: ВНИИПО, 2005. – 456 с.
3. Пузач, С.В. Методы расчёта тепломассообмена при пожаре в помещении и их применение при решении практических задач пожаровзрывобезопасности / С.В. Пузач. – М.: Академия ГПС МЧС России, 2005. – 336 с.
4. Ющенко, Ю.Н. Нормативный расход воды для локализации подземного пожара / Ю.Н. Ющенко // Горноспасательное дело: Сб. науч. тр. // НИИГД. – Донецк, 1999. – С. 21 – 26.