

УДК 331.101

*Стрелец В.М., канд. техн. наук, доц.,
Бородич П.Ю., преп.*

Академия гражданской защиты Украины

ЗАКОНОМЕРНОСТИ РАБОТЫ СПАСАТЕЛЕЙ В ИЗОЛИРУЮЩИХ АППАРАТАХ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ РАБОТ НА СТАНЦИЯХ МЕТРОПОЛИТЕНА

(представлено д-ром техн. наук Калугиным В.Д.)

Показано, что при проведении аварийно-спасательных работ на станциях метрополитена распределение расхода воздуха при работе в аппаратах на сжатом воздухе является скошенным и описывается β -распределением, а распределение подачи кислорода в регенеративных дыхательных аппаратах – нормальным

Постановка проблемы. Процесс аварийно-спасательных работ на станциях метрополитена (АСР СМ) характеризуется обязательным участием в этом процессе спасателей, выполняющих свои обязанности в средствах индивидуальной защиты органов дыхания. Закономерности работы в изолирующих аппаратах имеют ряд особенностей, которые надо учитывать как при расчете времени работы спасателей, так и при выборе типа аппаратов, которыми должны быть оснащены подразделения оперативно-спасательной службы.

Анализ последних исследований и публикаций. Эффективность действий горноспасателей и пожарных в средствах индивидуальной защиты была рассмотрена в работах Н.С. Диденко [1], В.Д. Перепечаева и В.Ю. Березы [2], П.А. Ковалева [3]. Было отмечено, что работа в изолирующих аппаратах характеризуется легочной вентиляцией, для которой были определены показатели, соответствующие работам, имеющим различную степень тяжести.

В нормативно-технической [4] и справочной литературе [5] приведены значения легочной вентиляции, соответствующие выполнению работ различной степени тяжести. Однако особенности расхода запаса газовой смеси, связанные со спецификой проведения аварийно-спасательных работ на станциях метрополитена (АСР СМ) (выполнение тяжелых работ в сочетании с высокой психоэмоциональной напряженностью и недостаточная подготовленность, о чем было отмечено в [6], спасателей к выполнению отдельных операций, характерных для ликвидации чрезвычайной ситуации в метрополитене), не рассматривались.

В подавляющем большинстве случаев [7] подразделения оперативно-спасательной службы, которые первыми прибывают на станцию для проведения АСР, оснащены аппаратами на сжатом воздухе (АСВ). При работе в АСВ в руководящих документах [5,8] рекомендуется использовать при проведении расчетов $\omega_{\text{л}} = 30$ л/мин, когда используются отечественные аппараты (АСВ-2, АИР-317, АВИМ и др.) или $\omega_{\text{л}} = 40$ л/мин, когда используются зарубежные (Дрегер, Ауэр и др.), независимо от характера чрезвычайной ситуации (ЧС). В Наставлении по газодымозащитной службе [5] и в Боевом Уставе пожарной охраны [9] присутствует требование о работе спасателей в метрополитене в регенеративных дыхательных аппаратах (РДА). Беляцкий В.П. и Павлов Г.П. [10] привели рекомендации по использованию значения показателя подачи кислорода в РДА для расчетов времени работы звеньев и отделений ГДЗС при тушении пожаров в метрополитене, которые в целом соответствуют рекомендованным значениям легочной вентиляции. Однако величина возможного разброса показателей подачи кислорода при выполнении одной и той же работы индивидуально по каждому спасателю не рассматривается. В результате рекомендации по оценке ориентировочного времени работы в подземных сооружениях метрополитена не учитывают индивидуальные особенности спасателей, а также способ подачи кислорода, реализованный в используемых РДА.

Постановка задачи и ее решение. Исходя из этого, основной задачей статьи является раскрытие закономерностей работы спасателей в изолирующих аппаратах при проведении аварийно-спасательных работ на станциях метрополитена. При этом учитывается, что время работы в изолирующих аппаратах самым непосредственным образом зависит от особенностей, связанных как с использованием разнотипных, в том числе по принципу действия, изолирующих аппаратов, так и с выполнением разнообразных операций, составляющих общий процесс АСР СМ.

Экспериментальные исследования, рассмотренные в настоящей статье, проводились во время тактико-специальных учений на станциях глубокого залегания Харьковского метрополитена. Боевая работа исследуемого личного состава в АСВ во время учений включала в себя подключение к аппарату, работу с пожарно-техническим вооружением, движение к “пострадавшим” и последующую эвакуацию их на свежий воздух следующими способами:

- сопровождение тех, кто может передвигаться, но потерял способность ориентироваться в задымленной среде;
- переноску (способом “на карабинах”) тех, кто находится в сознании, но не способен передвигаться;
- переноску “пострадавших” без сознания.

Используя закон Бойля-Мариотта, был выполнен расчет расхода воздуха у каждого (i -го) спасателя

$$\omega_{.i} = \frac{(P_{начi} - P_{конi}) \cdot V_{би}}{P_a \cdot \Delta t_i}, \quad (1)$$

где

$P_{начi}$ и $P_{конi}$ – соответственно начальное и конечное давление в баллоне, МПа;

$V_{би}$ – объем баллона, $10^{-3} \cdot \text{м}^3$;

$P_a \approx 0,1 \text{ МПа}$ – атмосферное давление;

Δt_i – рассматриваемый промежуток времени (время выполнения рассматриваемой операции), мин.

Полученные показатели расхода воздуха и их статистические характеристики (G_{ω_s} – среднеквадратичное отклонение соответствующего показателя расхода воздуха; Sk – показатель скошенности распределения расхода воздуха) для отдельных видов АСР СМ приведены в таблице 1. Распределения значений расхода воздуха по видам выполняемых в АСВ работ приведены на рисунке 1.

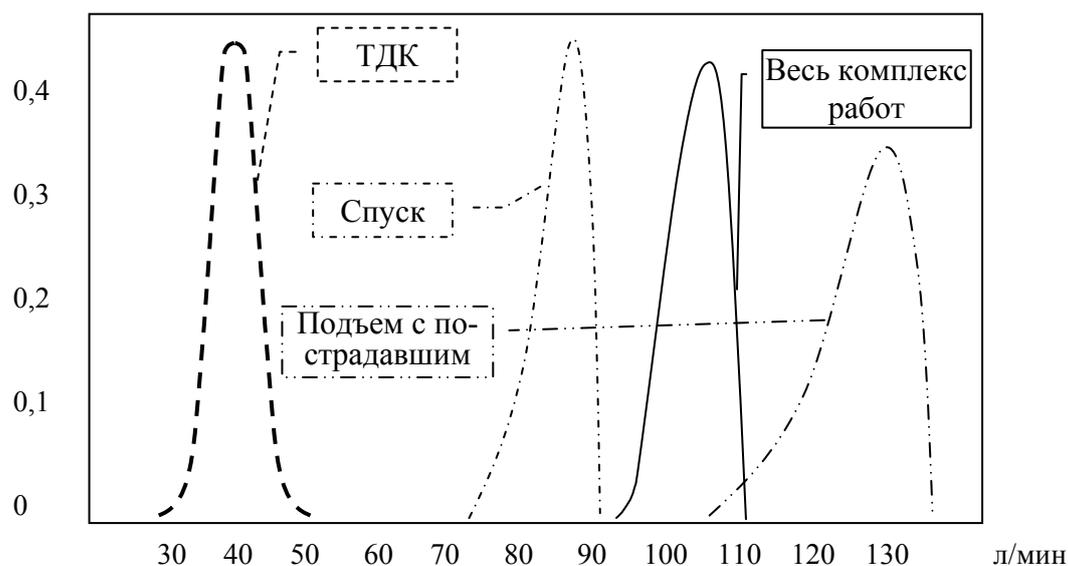


Рис. 1 – Распределение расхода воздуха при работе в АСВ

Анализ полученных результатов показал, что значения расхода воздуха ω_l при выполнении любой работы ограничены как сверху, так и снизу, т.е. всегда можно указать максимальное значение $\omega_{l \max}$, которое имеет место при стечении самых неблагоприятных обстоятельств, и минимальное $\omega_{l \min}$, которая понадобится для выполнения работы при наиболее благоприятном стечении обстоятельств. Расход воздуха при выполнении рассматриваемой работы может принять любое значение в интервале $[\omega_{l \min},$

$\omega_{l \max}$], т.е. является непрерывной случайной величиной. При этом расход воздуха при выполнении любой возможной операции зависит от большого числа случайных факторов, каждый из которых в отдельности является малосущественным.

Таблица 1 – Сравнительная оценка расхода воздуха при работе в АСВ в ходе АСР СМ

№ п/п	Выполняемая работа	$\bar{\omega}_l$, *10 ⁻³ м ³ /мин	G_{ω_l} , *10 ⁻³ м ³ /мин	α	β	Sk	Значение ω_l , рекомендуемое в справочной литературе, *10 ⁻³ м ³ /мин
1	Спуск	79	2,9	2,87	1,99	-0,95	40
2	Подъем по эскалатору (сопровождение “пострадавшего” в сознании)	91	3,1	2,75	2,01	-1,25	60
3	Переноска “пострадавшего” по эскалатору на карабинах	106	4,1	2,99	1,95	-1,7	84
4	Переноска “пострадавшего” без сознания по эскалатору	120	4,8	2,92	1,83	-1,92	84
5	Весь комплекс работ в непригодной для дыхания среде	99	3,4	2,83	2,15	-1,09	40
6	Работа в теплодымокамере	40	2,3	2,05	1,99	~ 0	40

Вышесказанное позволяет сделать вывод о том, что в ходе вероятностной оценки расхода воздуха, при выполнении работ в аппаратах на сжатом воздухе АСР СМ, можно использовать β -распределение. Параметры последнего α и β (с уровнем значимости 0,95) определены с помощью пакета стандартных прикладных программ и приведены в таблице 1.

Из значений, приведенных в таблице, видно, что даже для работ средней тяжести (спуск по неподвижному эскалатору), не говоря уже о тяжелых и очень тяжелых, расход воздуха существенно отличается от показателей легочной вентиляции, рекомендованных [5,8] для использования при расчетах. То есть, допустимое время выполнения отдельных операций определяет не столько показатель легочной вентиляции, зависящий от степени тяжести конкретной работы, сколько расход воздуха при работе в АСВ, который также зависит и от уровня подготовленности спасателей. Об этом говорят и результаты использования подхода, приведенного в [6] и опирающегося на анализ показателя Sk скошенности. Из данных, приведенных в таблице 1 и на рисунке 1, видно, что с увеличением степени тяжести выполняемой работы увеличивается не только индивидуальный разброс в расходе воздуха, но и отрицательное значение показателя скошенности. Исходя из этого, можно считать, что спасатели при работе в АСВ в ходе АСР СМ недостаточно эффективно расходуют запас воздуха. Причиной этого является недостаточная подготовленность к проведению операций, характерных только для процесса ликвидации чрезвычайной ситуации в метрополитене.

Подтверждением последнего вывода могут служить результаты сравнения (см. рис.1) показателей расхода воздуха при выполнении операций, присущих АСР СМ, и при работе в теплодымокамере. Тренировки в последних являются самым сложным видом практических занятий, в которых регулярно учувствуют все спасатели. Соответствие у большинства из них при работе в теплодымокамере показателей расхода воздуха значениям легочной вентиляции, приведенным в нормативно-технической литературе [8], в то время как в ходе АСР СМ они существенно отличаются, говорит о необходимости повышения эффективности подготовки спасателей. Используемые упражнения требуют значительного увеличения интенсивности и сложности, чтобы в ходе совершенствования отдельных качеств организовать обучение и тренировку спасателей правильному (глубокому и ровному) дыханию при работе в аппаратах на сжатом воздухе.

Важной закономерностью работы спасателей в изолирующих аппаратах является создание при выполнении поставленной задачи в непригодной для дыхания среде запаса газовойоздушной смеси $Q_{вых}$ для возвращения. В [5] отмечается, что при работе в АСВ минимальное давление в баллонах на момент начала выхода $P_{вых}$ рассчитывается как сумма давлений расходуемой и резервной газовойоздушной смеси

$$P_{вых} = P_{вх} + P_{рез}, \quad (2)$$

где:

$P_{вх}$ - величина, на которую изменилось давление в баллонах АСВ за время движения, МПа;

$P_{рез}$ - давление, которое должно быть зарезервировано на случай непредвиденных обстоятельств во время возвращения (для АСВ-2 $P_{рез} = 3$ МПа, для остальных аппаратов на сжатом воздухе $P_{рез} = 5$ МПа).

В то же время, если учесть разницу в расходовании воздуха при спуске спасателей $\bar{\omega}_{лвх}$ и подъеме по неподвижному эскалатору с пострадавшим без сознания $\bar{\omega}_{лвых}$ (см.таблицу 1), которая при одинаковом расстоянии S до места работы определяет время входа $t_{вх}$ и выхода $t_{вых}$ звена или отделения ГДЗС, можно увидеть, что без учета давления воздуха, который резервируется, отношение давлений газовой смеси в баллонах АСВ на начало и конец операции составляет

$$\frac{P_{вых}}{P_{вх}} = \frac{Q_{вых} \cdot P_a / V_б}{Q_{вх} \cdot P_a / V_б} = \frac{\bar{\omega}_{лвых} \cdot t_{вых}}{\bar{\omega}_{лвх} \cdot t_{вх}} = \frac{\bar{\omega}_{лвых} \cdot S / \bar{v}_{вых}}{\bar{\omega}_{лвх} \cdot S / \bar{v}_{вх}} =$$

$$= \frac{\bar{\omega}_{вых} \cdot \bar{v}_{вх}}{\bar{\omega}_{вх} \cdot \bar{v}_{вых}} \approx \frac{120 \cdot 19}{79 \cdot 12,5} \approx 2,3 ,$$
(3)

где $\bar{v}_{вх} \approx 19$ м/мин., $\bar{v}_{вых} \approx 12,5$ м/мин. – средняя скорость движения спасателей при спуске и подъеме по эскалатору с пострадавшим, соответственно [6].

То есть, с учетом $P_{рез}$ и того, что давление в АСВ-2 (расчетное давление 20,0 МПа), при котором аппарат может стоять на дежурстве, должно быть больше 18,0 МПа, а в других АСВ (расчетное давление 30,0 МПа) – больше 24,0 МПа [4], минимальное давление $P_{вых}$ воздуха в баллонах АСВ, при котором надо начинать возвращение на свежий воздух, должно быть практически в три раза больше той величины $P_{вх}$, на которую упало давление за время движения к месту боевой работы. Одновременно из анализа соотношения (3) получаем практическую рекомендацию по определению момента, когда звену (отделению) ГДЗС необходимо прекратить разведку, – спасатели должны начать возвращение к посту безопасности при уменьшении давления в АСВ у любого из спасателей на одну четвертую начального $P_{нач}$ давления.

Кроме этого, если учесть то, что большинство используемых в оперативно-спасательных подразделениях АСВ имеют восьмилитровый (или

два четырехлитровых) баллон, постовой на посту безопасности может использовать для расчета времени работы спасателей не величину расхода воздуха и соответствующие соотношения, которые связывают количество воздуха, давление и время [5], а скорость падения давления.

Так, при спуске спасателей по неподвижному эскалатору давление уменьшается со скоростью, равной отношению величин изменения давления ΔP и времени движения Δt

$$\frac{\Delta P}{\Delta t} = \frac{\Delta Q \cdot P_a}{\Delta t \cdot V_{\bar{b}}} = \left| \begin{array}{l} \frac{\Delta Q}{\Delta t} = \omega \approx 80 \text{ л/мин}; \\ V_{\bar{b}} = 8 \text{ л}; P_a \approx 0,1 \text{ МПа} \end{array} \right| \approx 1 \text{ МПа/мин}, \quad (4)$$

а при подъеме пострадавшего по неподвижному эскалатору, соответственно,

$$\frac{\Delta P}{\Delta t} \approx 1,5 \text{ МПа/мин}. \quad (5)$$

Сокращение продолжительности расчетов предполагаемого времени работы дает возможность постовому на посту безопасности уделить больше внимания подготовке звена и контролю его работы.

Существенное отличие в процессе АСР СМ показателей расхода воздуха при работе спасателей в АСВ от значений легочной вентиляции, приведенных в научно-технической литературе, поставило вопрос и о соответствии приведенных в [10] значений подачи кислорода в РДА, которые рекомендуются для расчетов времени работы звеньев и отделений газодымозащитной службы при тушении пожаров в метрополитене. Это объясняется тем, что в основу обоснования значений подачи кислорода при выполнении работ разной степени тяжести положены значения легочной вентиляции ω_l , при выполнении работ такой же степени тяжести

$$q = 0,041 \cdot \omega_l, \quad (6)$$

где 0,041 – разница между долей кислорода во вдыхаемом ($\eta_{O_2 \text{ в д}} = 0,205$) и выдыхаемом ($\eta_{O_2 \text{ в в д}} = 0,164$) воздухе.

В связи с этим во время тактико-специальных учений на станции "Пушкинская" Харьковского метрополитена были проведены исследования особенностей работы спасателей в РДА. Личный состав работал в аппаратах Р-30, которые имеют двухлитровые баллоны и экономную систему подачи кислорода [1]. В основе расчетных соотношений лежало выраже-

ние (1). При этом рассматривались изменения показателей давления в баллонах только по наиболее тяжелому виду работы (подъем пострадавшего без сознания по неподвижному эскалатору) и по всему комплексу работ в целом. Результаты расчета средней за рассматриваемый промежуток времени подачи \bar{q} кислорода и его среднеквадратичного отклонения G_q приведены на рисунке 2.

Анализ распределений, выполненный аналогично анализу, проведенному для расхода воздуха при работе в АСВ, учитывая их симметричность (в обоих рассматриваемых случаях $S_k \approx 0$), позволил сделать вывод о целесообразности использования нормального распределения для описания особенностей расхода кислорода при работе в РДА.

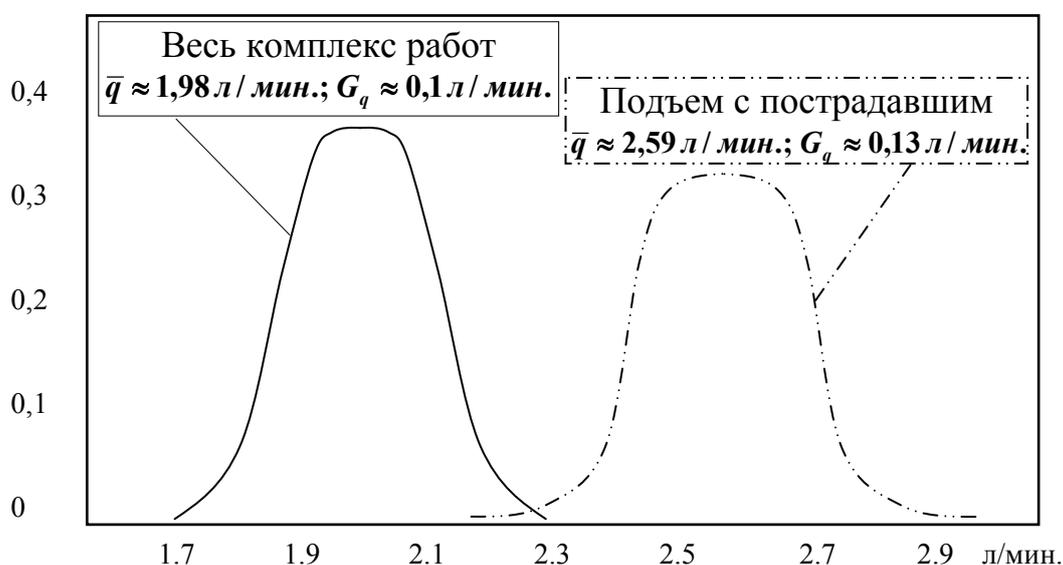


Рис. 2 – Распределение подачи кислорода при работе в РДА

Проверка по критерию Колмогорова подтвердила то, что полученные экспериментальные данные описываются нормальным распределением с уровнем значимости 0,99. В то же время, если использовать β -распределение (для всего комплекса работ расчет параметров дал $\alpha=1,98$; $\beta=2,01$, а для подъема пострадавшего без сознания – $\alpha=2,04$ и $\beta=1,91$), то уровень значимости будет равен 0,9.

Анализ расхода кислорода при работе в регенеративных дыхательных аппаратах Р-30 показал, что подача кислорода в воздухопроводную систему аппарата в среднем составляла $\bar{q} \approx 1,98$ л/мин. Такая подача, учитывая (6), обеспечивает легочную вентиляцию $\varpi_d \approx 43$ л/мин. Полученные результаты показывают, что конструкция РДА с экономной подачей кислорода обеспечивает более экономное расходование газовой смеси не

только за счет соответствующего конструктивного решения, но и за счет компенсации поверхностного дыхания при работе в таком аппарате сокращением количества углекислого газа, от которого необходимо очистить выдыхаемый воздух в регенеративном патроне. Поэтому для упрощения расчета необходимого запаса кислорода и времени работы в РДА можно рекомендовать среднюю подачу $\bar{q} \approx 2 \text{ л/мин}$, что для регенеративных дыхательных аппаратов с двухлитровым баллоном (например, респиратора Р-30, который стоит на вооружении в некоторых подразделениях Харькова) фактически соответствует уменьшению давления кислорода в баллоне со скоростью, равной отношению изменения давления в аппарате ко времени выполнения операции с учетом равенства $\Delta Q = \bar{q} \Delta t$, а именно

$$\frac{\Delta P}{\Delta t} = \frac{\Delta Q \cdot P_a}{\Delta t \cdot V_6} = \frac{\bar{q} \cdot \Delta t \cdot P_a}{\Delta t \cdot V_6} \approx \frac{1,98 \cdot 0,1}{2} \approx 0,1 \text{ МПа/мин}. \quad (7)$$

Использование выражения (7), как и в случае использования (4) и (5) при работе в АСВ, будет способствовать сокращению продолжительности расчетов постовым на посту безопасности времени работы в РДА спасателей в ходе АСР СМ.

Выводы:

- характеристики расхода запаса газозоудушной смеси спасателями при их работе в изолирующих аппаратах зависят как от характера выполняемой работы, так и от используемого изолирующего аппарата. В процессе АСР СМ распределение расхода воздуха при работе в АСВ является скошенным и описывается β -распределением, а распределение подачи кислорода в РДА – нормальным. Выполнение в АСВ работ повышенной сложности характеризуется большей отрицательной скошенностью;
- при проведении разведки в ходе АСР СМ в АСВ звено (отделение) ГДЗС должно начать возвращение к посту безопасности при уменьшении давления в баллонах у любого из спасателей на одну четвертую начального. В случае работы в аппаратах, которые имеют 8-литровый баллон, постовой на посту безопасности может использовать для расчета времени работы спасателей скорость падения давления от 1 МПа/мин для ситуации спуска звена по неподвижному эскалатору до 1,5 МПа/мин при подъеме пострадавшего без сознания по неподвижному эскалатору;
- подача кислорода в воздуховодную систему РДА в экономном режиме составляет в среднем почти 2 л/мин. Это позволяет постовому на посту безопасности для расчета времени работы спасателей в ходе АСР СМ использовать скорость падения давления кислорода в аппаратах, имеющих 2-литровые баллоны, равной приблизительно 0,1 МПа/мин.

ЛИТЕРАТУРА

1. Диденко Н.С. Регенеративные респираторы для горноспасательных работ. – М.: Недра, 1984. – 296 с.
2. Перепечаев В.Д., Береза В.Ю. Газодымозащитная служба пожарной охраны./ Учебник. – Чернигов: РИК «Деснянська правда», 2000. - 468 с.
3. Ковальов П.А., Стрілець В.М. Методика розрахунку витрати повітря (кисню) при роботі в засобах індивідуального захисту органів дихання // Проблемы пожарной безопасности. Сб. науч. тр. Вып.8. – Харьков, ХИПБ, 2000. – С. 172-174.
4. Настанова по газодымозахисній службі пожежної охорони МВС України. Наказ № 657 МВС України від 2 грудня 1994 р. – К.: МНСУ, 1994. – 128 с.
5. Ковалев П.А., В.М. Стрілець, О.В. Єлізаров, О.Є. Безуглов. Основи створення та експлуатація апаратів на стисненому повітрі./ Навчальний посібник. – Харків: АЦЗУ, 2005. – 317 с.
6. Ковальов П.А., Бородич П.Ю., Стрілець В.В., Чубар С.С. Розробка пропозицій щодо вдосконалення аварійно-рятувальних робіт при надзвичайних ситуаціях в метрополітені // Право і безпека. – 2002. – Вип. 1. – С. 156-161.
7. Сайт Internet www.metropliten.newmail.ru
8. Рекомендації для вивчення повітряних протигазів “Drager” PA 90 SERIES {PA 92} у підрозділах гарнізонів пожежної охорони. – К.: УДПО МВС України, 1995. – 19 с.
9. Боевой Устав Пожарной Охраны Украины. – К.: Десна, 1993. – 126 с.
10. Беляцкий В.П., Павлов Г.П. Методическое пособие по организации и тактике тушения пожаров на объектах метрополитена. – Ленинград: ЛФ ВНИИПО МВД СССР, 1986. – 156 с.

