

УДК 623.438.3

А.А. Назаренко, О.В. Стаховский, К.В. Корытченко, С.П. Данилевский

Национальный технический университет «ХПИ», Харьков

ОЦЕНКА ВЗРЫВОПОЖАРНОЙ ОПАСНОСТИ ПАРОВ ТОПЛИВА ВО ВНУТРЕННЕМ ОБЪЕМЕ БРОНЕОБЪЕКТА

В данной работе проведена оценка времени вытекания топлива через пробоину в баке во внутренний объем машины, влияющее на образование горючей топливоздушной смеси. Рассмотрены условия формирования паров топлива в концентрационных пределах распространения пламени в отделении управления и боевом отделении танка в случае пролива топлива. Исследованы возможные последствия барического действия взрыва паров топлива во внутреннем объеме машины. Предложены мероприятия по предотвращению взрыва и снижения его последствий.

Ключевые слова: *бронеобъект, взрывопожарная опасность, дизельное топливо.*

Введение

Подсистема защиты от возгорания и взрыва топлива входит в состав системы защиты бронееобъекта от обычных противотанковых средств и поражающих факторов ядерного оружия [1]. Поэтому обеспечение пожаровзрывобезопасности машины является одной из важных составляющих сохранения живучести экипажа и машины. Надежность системы пожаротушения существенно влияет на время восстановления машины после ее поражения. Не менее важным является обеспечение пожарной безопасности в условиях эксплуатации машины вне боевых действий. Особенно это актуально при эксплуатации боевых машин в регионах с жарким климатом.

Специфические требования к системе пожаротушения боевой машины вызваны тем, что не всегда представляется возможным осуществить эвакуацию экипажа из отделений машины. Это относится к периоду подводного вождения танка, может быть вызвано условиями боевых действий, ранением экипажа и т.п.

Существующие системы пожаротушения не в полной мере удовлетворяют современным требова-

ниям сохранения живучести экипажа и машины. Из опыта недавних боевых конфликтов известно [2], что из-за наличия большого количества средств борьбы с танками поражение машины осуществляется многократно. Поэтому двухкратное срабатывание системы пожаротушения может быть недостаточным. Более того, в основе системы пожаротушения использован физический процесс вытеснения кислорода из отделений машины, вызывающий удушье экипажа или, по меньшей мере, временную потерю боеспособности.

Целью данной работы является определение возможных направлений усовершенствования системы пожаротушения бронееобъектов на основании оценки взрывопожарной опасности паров топлива во внутреннем объеме машины.

Основной раздел

Оценка времени вытекания топлива через пробоину в баке во внутренний объем машины

Как правило, в условиях эксплуатации машины температура воздуха и топлива во внутреннем объеме машины лежит в диапазоне, в котором концен-

трация паров дизельного топлива находится вне концентрационных пределов распространения пламени. Поэтому стадии воспламенения предшествует стадия образования перенасыщенных паров топлива в результате локального его разогревания горячими осколками, электрическим проводом при коротком замыкании и т.п. В результате, перед возникновением пожара может происходить вытекание топлива через образовавшиеся пробоины в баках во внутренний объем машины. Из-за покрытия топливом большой поверхности днища машины резко возрастает вероятность его воспламенения. Поэтому требует оценки время вытекания топлива.

В случае возникновения малых пробоин, описать вытекание топлива из образовавшегося отверстия в топливном баке можно с применением закона Торричелли [3]:

$$U = \sqrt{2\rho_{ж} h}, \quad (1)$$

где U – скорость истечения топлива из отверстия, $\rho_{ж}$ – плотность топлива, h – высота уровня топлива по отношению к отверстию (рис. 1).

Данный закон применяется в случае, если давление над поверхностью топлива равняется внешнему давлению [3]. В устройстве топливной системы танка предусмотрено связь полости бака с внешней атмосферой, то есть данное условие выполняется.

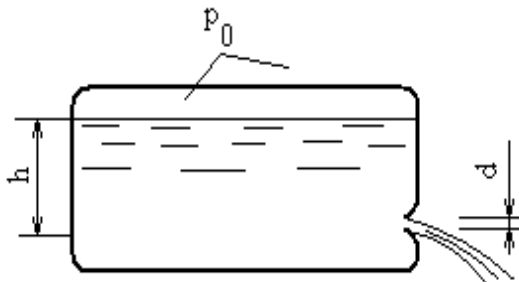


Рис. 1. Пояснение величин к закону Торричелли

Масса топлива, вытекшего из топливного бака с момента возникновения пробоины за период времени t , определится по выражению:

$$m = \rho \frac{\pi d^2}{4} \int_0^t U(t) dt, \quad (2)$$

где d – диаметр пробоины.

Следует отметить, что геометрический размер отверстия, образовавшегося в результате пробоя, не будет соответствовать фактическому диаметру вытекающей струи из-за влияния формы отверстия и вязкости топлива. Также, в поперечном сечении струи топлива ее скорость не является постоянной. Но эти факторы не влияют на качественную оценку представленной задачи.

Система питания танкового двигателя топливом имеет достаточно сложное устройство (рис. 2).

Например, на танках типа Т-64 система включает в себя внутреннюю группу баков суммарной емкостью 730 л и наружную группу баков емкостью 540 л. При этом внутренняя группа баков подразделяется на переднюю и заднюю, имеющие емкости 420 л и 310 л, соответственно. Экипаж танка имеет возможность управлять отбором топлива из разных групп баков с помощью механических кранов (поз. 13, 14 на рис. 2).

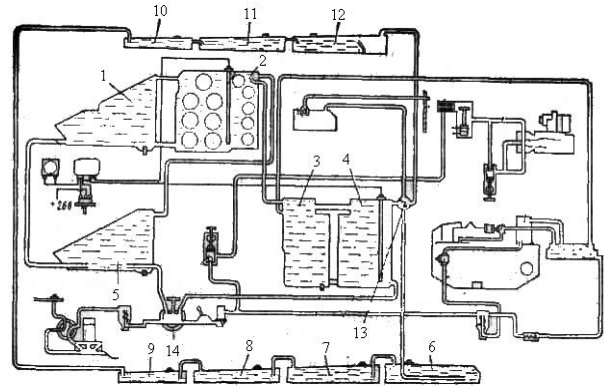


Рис. 2. Система питания двигателя топливом на танках типа Т-64:

1-5 – внутренняя группа баков;

6-12 – наружная группа баков;

13 – кран отключения наружных баков;

14 – топливораспределительный кран [1]

В экстренной ситуации (поражение машины снарядом и т.п.) является маловероятным, что экипаж машины будет отключать наружную группу баков, или переключать отбор на одной из внутренних групп баков для уменьшения последствий возможного возгорания. Более того, это не предусмотрено инструкциями для экипажа. Как результат, днище боевого отделения и отделения управления в случае пробоя внутреннего бака будет заполнено, как минимум, топливом одной группы баков при соответствующем положении топливораспределительных кранов, и, как максимум, – полным запасом топлива машины. В силовое отделение топливо не попадет из-за наличия герметичной перегородки между этими отделениями. Поэтому, считается целесообразным вместо механических топливных кранов оборудовать машину электромеханическими кранами с целью перекрытия связи между группами топливных баков в момент возникновения пожара.

В качестве примера, рассчитаем кривую массового расхода топлива, истекающего из бака, заполненного топливом марки «Л» объемом $V_0 = 0,1 \text{ м}^3$. Полагаем, что пробоина диаметром $d = 0,01 \text{ м}$ возникла в нижней части бака, при этом начальный уровень топлива составил $h_0 = 0,2 \text{ м}$. Рассчитаем площадь сечения топливного бака $S = V_0/h = 0,5 \text{ м}^2$. Будем полагать, что площадь сечения топливного бака не изменяется по высоте.

Площадь поперечного сечения пробоины в баке составит $S_0 = 7,85 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2$.

В процессе выхода топлива скорость его истечения будет уменьшаться в связи со снижением уровня топлива (следует из выражения (1)). Так как скорость истечения зависит от количества топлива в баке, то требуется установить кривую изменения уровня топлива во времени. Используя закон сохранения массы, получим выражение:

$$Sdh = -Qdt, \quad (3)$$

где S – площадь сечения топливного бака;

Q – объемный расход топлива;

dh – приращение высоты уровня топлива за время dt .

Интегрируя выражение (3) при постоянной площади сечения топливного бака $S = \text{const}$ и используя начальное условие $h(0) = h_0$ для определения постоянной интегрирования, получим кривую изменения уровня топлива во времени:

$$h(t) = \frac{2A\sqrt{h_0 - t^2}}{4A^2}, \quad (4)$$

где A – константа, равная $A = \frac{S}{S_0\sqrt{2\rho_{ж}}}$, (S_0 – площадь поперечного сечения пробоины).

Из кривой уровня топлива получим кривую изменения массы топлива в баке в виде:

$$m(t) = \rho_{ж} S \frac{2A\sqrt{h_0 - t^2}}{4A^2}. \quad (5)$$

Применительно к приведенному примеру, время полного истечения топлива составляет около 2 мин (рис. 3). Полученный результат свидетельствует о достаточно быстром заполнении днища машины топливом в случае осколочного пробоя топливных баков. Поэтому является целесообразным осуществлять откачку разлившегося топлива из днища машины с помощью водяных откачивающих насосов, встроенных в машину. Производительности танкового насоса, составляющей 100 – 150 л/мин, достаточно для откачивания разлившегося топлива. При этом, управление насосами следует включить в блок пожарной автоматики.

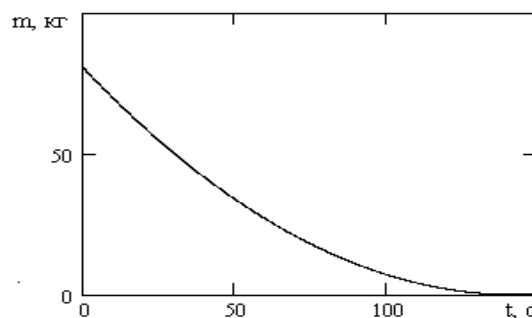


Рис. 3. Расчетная кривая изменения массы топлива в баке согласно заданных условий задачи

Расчет зависимости избыточного давления от условий взрыва паров дизельного топлива

В результате воспламенения паров топлива происходит нарастание давления во внутреннем объеме машины, что может привести к барическому поражению экипажа. Поэтому требует рассмотрения вопрос критических давлений, приводящих к поражению экипажа, и возможных мер по ограничению роста давления. Согласно [4], последствия воздействия давления на человека распределяются по диапазону превышения давления (табл. 1).

В работе [5] барическое воздействие взрыва описано в виде модели ущерба при взрыве $N(\Delta p) = \Phi(\text{Pr} - 5)$. Данная функция отображает вероятности поражения человека (летальный исход) при воздействии избыточного давления на фронте ударной волны Δp через пробит-функции [4]:

$$\text{Pr} = -77,1 + 6,91 \ln \Delta p, \quad (6)$$

или [4]

$$\text{Pr} = -2,44 \cdot \ln(7380 / \Delta p + 1,9 \cdot 10^9 / (I \cdot \Delta p)), \quad (7)$$

где Δp – избыточное давление (Па);

I – импульс ($\text{Н/м}^2\text{с}$).

К данным выражениям следует добавить выражение нормальной функции распределения:

$$\Phi(z) = \frac{1 + \text{erf}(z/\sqrt{2})}{2}. \quad (8)$$

Построив график вероятности поражения человека от давления согласно представленным выражениями (6) – (7) получим (рис. 4), что при давлении во внутреннем объеме машины около 0,2 МПа наступает практически летальное поражение экипажа.

Таблица 1

Общая характеристика барического воздействия взрыва на человека [6]

Характер барического воздействия взрыва на человека	Давление, кПа
Для человека безопасно	< 10
Легкое поражение (ушибы, вывихи, временная потеря слуха, общая контузия)	20...40
Среднее поражение (контузия головного мозга, повреждение органов слуха, разрыв барабанных перепонки, кровотечение из носа и ушей)	40...60
Сильное поражение (сильная контузия всего организма, потеря сознания, переломы конечностей, повреждения внутренних органов)	60... 100
Порог смертельного поражения	100
Летальный исход в 50% случаев	250...300
Безусловное смертельное поражение	> 300

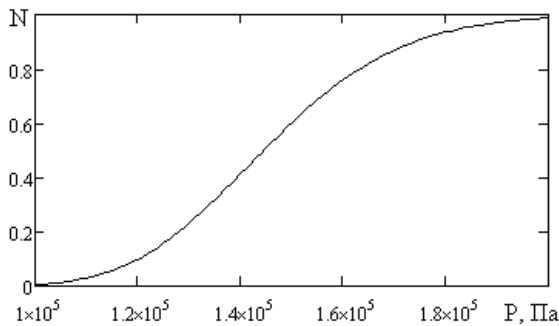


Рис. 4. Зависимость вероятности N барического поражения человека от давления P

Кривая возрастания давления идеального газа в закрытом объеме определяется законом изохоры:

$$\frac{P}{T} = \text{const.} \quad (9)$$

Полагая, что начальное давление во внутреннем объеме машины соответствует атмосферному $P_0 = 1,013 \cdot 10^5$ Па, а комнатной температуре $T_0 = 293$ К, получим, что в результате возрастания температуры среднее барическое поражение наступит при достижении температуры в диапазоне 408...466 К, а сильное поражение при 466...582 К. В таком случае достаточно кратковременного воздействия, то есть термическое поражение может не наступить.

Для расчета избыточного давления воспользуемся методикой работы [7]. Расчет проведен применительно к боевому отделению основного боевого танка типа Т-64. Полагаем, что машина полностью заправлена. Во внутреннем объеме боевого отделения расположена внутренняя группа топливных баков с дизельным топливом марки "З" (ГОСТ 305-82) объемом $V_a \approx 0,75$ м³. Объем боевого отделения $V_{отд} \approx 8$ м³ Свободный объем отделения $V_{св} \approx 3$ м³. Площадь нижней части боевого отделения $F \approx 8$ м².

Молярная масса дизельного топлива марки "З" $M = 172,3$ кг·кмоль⁻¹. Брутто-формула $C_{12,343}H_{12,889}$. Плотность жидкости при температуре $t = 25$ °С $\rho_{ж} = 804$ кг·м⁻³. Константы уравнения Антуана: $A = 5,07828$; $B = 1255,73$; $C_A = 199,523$. Температура вспышки $T_{всп} > 40$ °С. Теплота сгорания $H_T = 43,59$ МДж·кг⁻¹. Нижний концентрационный предел распространения пламени $C_{НКПР} = 0,6$ % (об.).

При определении избыточного давления взрыва в качестве расчетного варианта возникновения пожара принимается пробитие топливного бака кумулятивной струей и вытекание из него дизельного топлива в объем боевого отделения и отделение управления. За расчетную температуру T_p принимается максимальная абсолютная температура воздуха в районе эксплуатации машины с учетом ее повышения во внутреннем объеме на $\Delta T = 5...10$ °С из-за тепловыделения систем и механизмов танка.

Плотность ρ_n газа при заданной T_p и атмосферном давлении определяется по выражению [8]:

$$\rho_n = \frac{M}{V_0 \cdot (1 + \alpha \cdot T_p)} \quad [\text{кг/м}^3], \quad (10)$$

где M – молярная масса газа, V_0 – объем кмоль газа при нормальных условиях, равный $V_0 = 22,413$ м³·кмоль⁻¹; α – коэффициент температурного расширения газа, равный $\alpha = 0,00367/\text{град} (\text{°C})$.

Данное выражение позволяет оценить снижение плотности топливоздушного заряда с ростом его температуры.

Объем $V_{ж}$ и площадь разлива F_n поступившего при расчетной аварии дизельного топлива определяют по выражению:

$$V_{ж} = V_a + q \cdot t_a + \pi \cdot r_1^2 \cdot L, \quad (11)$$

где V_a – объем «мгновенно» пролитого топлива (распыление топлива взрывом); q – расход дизельного топлива при его вытекании из бака [м³/с], t_a – время вытекания топлива [с], r_1 – внутренний радиус трубопроводов с топливом, L – общая длина трубопроводов.

Суммарная площадь днища боевого отделения и отделения управления танка $F = 8,5$ м².

Производительность водооткачивающего насоса при противодавлении 5 м водяного столба составляет не менее 100 л/мин.

Поскольку площадь днища машины меньше рассчитанной площади разлива дизельного топлива, то окончательно принимаем $F_n = F = 8,5$ м².

Расчет давления насыщенных паров проведем по уравнению Антуана, которое используется в упрощенной методике расчета параметров взрывопожарной опасности легко воспламеняющихся и горючих жидкостей, изложенной в работе [7]. Выражение для расчета давления p_n насыщенных паров имеет вид [7]:

$$p_n = 10^{\left(\frac{A - \frac{B}{T_p + C_A}}{T_p + C_A}\right)} \quad [\text{кПа}], \quad (12)$$

где A, B, C_A – константы Антуана (задаются по справочным данным [3]);

T_p – расчетная температура.

Значения показателей пожарной опасности дизельного топлива приведены в табл. 2 [5].

Определим изменение давления насыщенных паров летнего и зимнего дизельного топлива с ростом температуры (рис. 5).

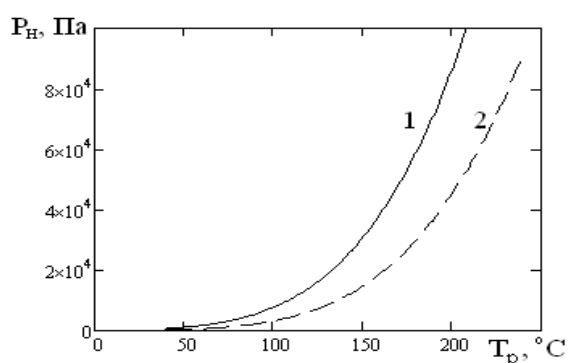
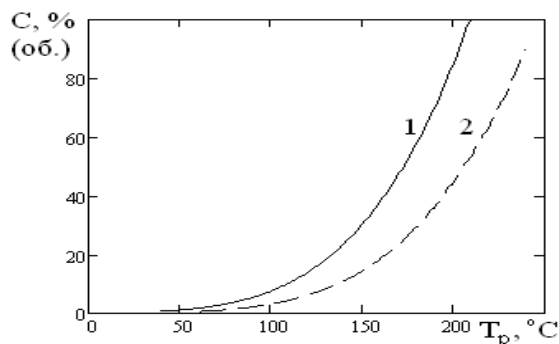
Парциальное давление каждого газа (компонента) в воздухе (смесь газов) пропорционально его объемной доле (из закона Дальтона). Отсюда, рассчитаем изменение объемной доли паров в зависимости от температуры (рис. 6).

Так как верхний концентрационный предел распространения пламени в смеси дизельного топлива с воздухом составляет около $C_{ВКПРП} \approx 5$ %, то согласно кривых (рис. 6) верхний температурный предел распространения пламени составляет в зависимости от типа топлива от 100 до 120 °С.

Таблица 2

Значения показателей пожарной опасности дизельного топлива [5]

	Продукт (ГОСТ, ТУ)	
	Дизельное топливо "З" (ГОСТ 305-73)	Дизельное топливо "Л" (ГОСТ 305-73)
Молярная масса, $\text{кг} \cdot \text{кмоль}^{-1}$	172,3	203,6
Температура вспышки, $^{\circ}\text{C}$	$>+35$	$>+40$
Температура самовоспламенения, $^{\circ}\text{C}$	+225	+210
Константы уравнения Антуана	A	5,07818
	B	1255,73
	C_A	199,523
Температурный интервал значений констант уравнения Антуана, $^{\circ}\text{C}$	40÷210	60÷240
Нижний концентрационный предел распро- странения пламени, % (об.)	0,61	0,52
Теплота сгорания, $\text{кДж} \cdot \text{кг}^{-1}$	43590	43419

Рис. 5. Кривая зависимости давления P_n насыщенных паров зимнего (1) и летнего (2) дизельного топлива от температуры T_p среды в бронеобъектеРис. 6. Кривая зависимости объёмной доли C насыщенных паров зимнего (1) и летнего (2) дизельного топлива от температуры T_p среды в бронеобъекте

Так как температура самовоспламенения данной смеси превосходит 200°C , то в случае интенсивного насыщения внутреннего объема бронеобъекта парами топлива это может обеспечить предотвращение возникновения пожара. Для создания в свободном объеме отделения управления и боевом отделении концентрации паров топлива, превышающей верхний концентрационный предел распространения пламени требуется объем паров топлива

около $V_T = V_{св} \cdot C_{ВКПР} \approx 0,15 \text{ м}^3$. Используя выражение (10) зависимости плотности газа от температуры, получим, что при температуре 100°C необходимо израсходовать топливо массой

$$m_T = V_T \rho_T \approx 0,85 \text{ кг.}$$

Поэтому топливо может рассматриваться как средство пожаротушения, основанное на вытеснении кислорода парами топлива. Очевидно, что данный метод тушения пожара может быть использован только после эвакуации экипажа.

Интенсивность испарения дизельного топлива W рассчитывается по выражению [7]:

$$W = 10^{-6} h \cdot p_n \sqrt{M}, \quad (13)$$

где h – коэффициент, зависящий от скорости и температуры воздушного потока над поверхностью испарения жидкости, определяемый по справочным данным;

p_n – давление насыщенного пара в [кПа], M в [кг/кмоль].

В случае отключения фильтровентиляционной установки и герметизации машины, то есть отсутствия вентиляции, значение коэффициента h принимается равным 1,0. Используя выражение (13), получим интенсивность испарения дизельного топлива $W = 9,45 \cdot 10^{-6} \text{ кг}/(\text{м}^2\text{с})$.

Масса паров дизельного топлива, поступивших во внутренний объем, рассчитывают по выражению:

$$m = W F_{и} T, \quad (14)$$

где T – длительность испарения.

При длительности $T=600 \text{ с}$ получим $m=0,048 \text{ кг}$.

При поражении танка в процессе пробития осколками топливных баков возможно образование аэрозоля, при этом дизельное топливо исходно нагрето ниже температуры вспышки. В этом случае коэффициент участия горючего во взрыве принимается равным $Z = 0,3$.

Стехиометрическая концентрация паров топлива, % (об.), вычисляют по формуле:

$$C_{ст} = \frac{100}{1 + 4,84\beta}, \quad (15)$$

где $\beta = n_C + \frac{n_H - n_X}{4} - \frac{n_O}{2}$ – стехиометрический коэффициент кислорода в реакции сгорания; n_C, n_H, n_O, n_X – число атомов С, Н, О и галоидов в молекуле горючего. Значение стехиометрической концентрации паров дизельного топлива исходя из химической брутто-формулы дизельного топлива составляет $C_{ст} = 1,12\%$ (об.).

Избыточное давление взрыва ΔP для паров топлива рассчитывают по выражению:

$$\Delta P = (P_{max} - P_0) \frac{mZ}{V_{св} P_H} \frac{100}{C_{ст}} \frac{1}{K_H}, \quad (16)$$

где P_{max} – максимальное давление взрыва стехиометрической топливовоздушной смеси в замкнутом объеме; P_0 – начальное давление, кПа; K_H – коэффициент, учитывающий не герметичность внутреннего объема машины.

Полагаем, что экипаж принял положение боевому, то есть люки закрыты. Тогда $K_H = 1$.

Известно, что для стехиометрической дизельно-воздушной смеси $P_{max} \approx 900$ кПа. Тогда при $P_0 = 101$ кПа в расчетном варианте из выражения (16) имеем $\Delta P = 50$ кПа. При таком избыточном давлении получим среднее поражение (контузия головного мозга, повреждение органов слуха, разрыв барабанных перепонки, кровотечение из носа и ушей).

Откачка пролитого топлива из днища машины и принудительная вентиляция внутреннего объема машины позволит снизить концентрацию паров топлива до пределов, когда барическое воздействие взрыва для человека становится безопасным.

Выводы

В результате оценки времени вытекания топлива через пробойину диаметром около 10 мм в баке

объемом 100 л во внутренний объем машины установлено, что время вытекания составит до 2 мин. Что свидетельствует о коротком времени возникновения пожароопасной среды.

Предложено осуществлять откачку топлива, разлитого на днище машины, автоматическое перекрытие между группами баков и вентилирование с целью предотвращения формирования горючей смеси и снижения последствий барического действия взрыва.

Список литературы

1. Объект 434. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. – М.: Воениздат.: Министерство обороны СССР, 1986. – Кн.2. – 766 с. (Нормативный документ Министерства обороны. Техническое описание).
2. Бабакин А. Танки и БМП горели в горах Дагестана / А. Бабакин // Газета «Независимое военное обозрение», 2004. – № 9.
3. Яворский Б.М. Справочник по физике / Б.М. Яворский, А.А. Детлах. – М.: Наука, 1968. – 939 с.
4. Количественная оценка риска химических аварий Колодкин В.М., Муринов А.В., Петров А.К., Горский В.Г. / под ред. В.М. Колодкина. – Ижевск: Издательский дом «Удмуртский университет», 2001. – 228 с.
5. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов и средства их тушения: Справ. изд.: в 2 кн. / А.Н. Баратов, А.Я. Корольченко, Г.Н. Кравчук и др. – М.: Химия, 1990. – 496 с.
6. Матрюков Б.С. Безопасность в чрезвычайных ситуациях / Б.С. Матрюков. – М.: Издательский центр «Академия», 2007. – 336 с.
7. Определение категорий помещений и зданий по взрывопожарной и пожарной опасности. НПБ 105-95.
8. Бейкер У. Взрывные явления. Оценка и последствия / Бейкер У., Кокс П., Уэстайн П.: пер. с англ. – М.: Мир, 1986. – Т. 1. – 319 с.

Поступила в редколлегию 19.01.2012

Рецензент: д-р техн. наук, проф. О.Н. Фоменко, Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков.

ОЦІНКА ВИБУХОПОЖЕЖНОЇ НЕБЕЗПЕКИ ПАРИ ПАЛИВА У ВНУТРІШНЬОМУ ОБ'ЄМІ БРОНЕ-ОБ'ЄКТУ

А.А. Назаренко, О.В. Стаховський, К.В. Коритченко, С.П. Данилевський

У даній роботі проведена оцінка часу витікання палива через пробойну в бак у внутрішній об'єм машини, що впливає на утворення горючої паливно-повітряної суміші. Розглянуті умови формування пари палива в концентраційних межах розповсюдження полум'я у відділенні управління і бойовому відділенні танка у разі витікання палива. Досліджено можливі наслідки баричної дії вибуху пари палива у внутрішньому об'ємі машини. Запропоновані заходи щодо запобігання вибуху і зниження його наслідків.

Ключові слова: броньоб'єкт, вибухопожежна небезпека, дизельне паливо.

ESTIMATION OF FIRE-EXPLOSION DANGER OF FUEL VAPOR INTO INTERNAL VOLUME OF ARMORED VEHICLES

A.A. Nazarenko, O.V. Stakhovskiy, K.V. Koritchenko, S.P. Danilevskiy

Estimation of time of fuel stream through a hole in a tank at the internal volume of machine is conducted in the given work. This affect on formation of combustible fuel-air mixture. The terms of forming of fuel steams in the concentration limits of flame distribution in the section of management and battle section of tank in the case of the fuel streaming are considered. The possible consequences of pressure action of fuel steams explosion are explored in the internal volume of machine. Measures on prevention of explosion and decline of his consequences are offered.

Keywords: armored vehicle, fire-explosion danger, diesel fuel.