

# ОБОСНОВАНИЕ СИСТЕМЫ КРИТЕРИЕВ ЗАЖЖЕНИЯ ТОПЛИВНЫХ БАКОВ ОСКОЛОЧНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ\*

О.Ю. ФЕДОСОВ, канд. техн. наук

Управление перспективных межвидовых исследований  
и специальных проектов Минобороны России,  
119160, Москва, Комсомольский проспект, 18, e-mail: olefed78@mail.ru

© Федосов О.Ю., 2023

Проведено обоснование системы критериев зажжения топливных баков транспортных средств при воздействии высокоскоростных осколочных элементов на основе современных представлений теории горения топливно-воздушных смесей в турбулентном потоке. Рассмотрен физический механизм процесса около- и внутрибакового зажжения паров топлива высокоскоростным осколочным элементом для топливных баков, защищенных обшивкой транспортного средства. Представлены пять критериев зажжения топливных баков, выполнение которых приводит к поражению топливного бака. Предложена формула условной вероятности поражения отсеков, содержащих топливный бак к зажигательному действию осколочных элементов. Показана структурная блок-схема математической модели расчета условной вероятности поражения топливных баков.

*Ключевые слова:* канал перфорации, кинетический нагрев, критерий, моделирование, рециркуляция, сверхскоростное взаимодействие, температура.

**DOI: 10.46573/2658-5030-2023-1-92-102**

## ВВЕДЕНИЕ

Под воздействием высокоскоростного осколочного элемента (ОЭ) на топливную систему объекта зажжение паров топлива может произойти как внутри топливного бака (ТБ), так и в околобаковом пространстве. Исследование процесса зажжения топливной системы (ТС) высокоскоростными ОЭ направлено на установление количественных соотношений между исходными параметрами ОЭ и отсека, содержащего ТБ, и результатами воздействия: взрывом, пожаром, разрушениями в отсеке. Поскольку зажжение происходит в процессе потери сплошности среды внутри ТБ и турбулентного перемешивания его содержимого, обоснование системы критериев зажжения ТБ объекта в данной работе строится на современных трактовках теории горения топливно-воздушных смесей в турбулентном потоке.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Рассмотрим физический механизм процесса околобакового зажжения паров топлива (рис. 1). Осколочный элемент, движущийся с большой скоростью, пробивает обшивку ТБ. После этого летит следом за ОЭ поток частиц – запреградное осколочное поле (ЗОП). Частицы имеют высокую температуру, при движении в воздухе происходит их теплообмен с воздухом. Из-за того, что время движения частиц мало, а их теплоемкость большая (по сравнению с теплоемкостью воздуха), частицы практически не остывают, остаются в расплавленном состоянии и по достижении стенки ТБ

---

\* Материалы были представлены на научном семинаре «Золотовские чтения», посвященном 100-летию со дня рождения выдающегося российского математика, академика АН СССР Золотова Евгения Васильевича (6–7 октября 2022, Тверь, Тверской государственный технический университет).

прилипают к ней или пробивают ее. Частицы, в зависимости от скорости движения, могут существовать в пространстве между внешней обшивкой и стенкой ТБ некоторое время и нагревают при этом воздух. В зоне факела распыла поток частиц материала обшивки и ОЭ температура газа становится выше, чем в окружающем эту зону газе.

После пробития стенки ТБ ОЭ внедряется в жидкость (керосин). Вместе с ним в керосин попадают некоторые частицы от обшивки, движущаяся следом за ОЭ, и ЗОП от обшивки и стенки ТБ. Часть нагретых частиц стенки ТБ движется в обратном направлении, к обшивке. Они также подогревают газ в пространстве между обшивкой и стенкой ТБ в зоне образовавшихся пробоин.

При внедрении лидирующего ОЭ и ЗОП в жидкость в ней происходят кавитация и частичное испарение жидкости при ее контакте с горячим лидирующим ОЭ и ЗОП, попавшим в жидкость. Пары жидкости выбрасываются в пространство между обшивкой и стенкой ТБ в предварительно разогретый объем воздуха. Кроме того, после прохождения лидирующего ОЭ глубоко в жидкость можно ожидать возникновения кумулятивного эффекта в ней: схлопывания образовавшихся при прохождении ОЭ кавитационных полостей и связанного с этим попадания струек жидкости в образовавшееся отверстие в стенке ТБ. Эти струйки распадаются и образуют поток капель, стремящийся к обшивке объекта. Некоторые из этих капелек могут достигнуть поверхности обшивки, предварительно подогретой при пробитии, и испариться.

В результате всех перечисленных процессов в пространстве между обшивкой объекта и стенкой ТБ образуется область (облако) нагретой до некоторой температуры паро-газо-капельной смеси, способной к самовоспламенению. Эта область (облако) окружена газом, имеющим начальную температуру окружающей среды.

В нагретом облаке паро-газо-капельной смеси начинается химическое реагирование (из-за того, что окислитель и горючее смешаны). Скорость химической реакции нарастает или убывает по закону Аррениуса [1], что обуславливается соотношением быстроты тепловыделения в паро-газо-капельном облаке, происходящего за счет химического реагирования, и отвода тепла в окружающее пространство – облако воздуха (на периферии пути пробития).

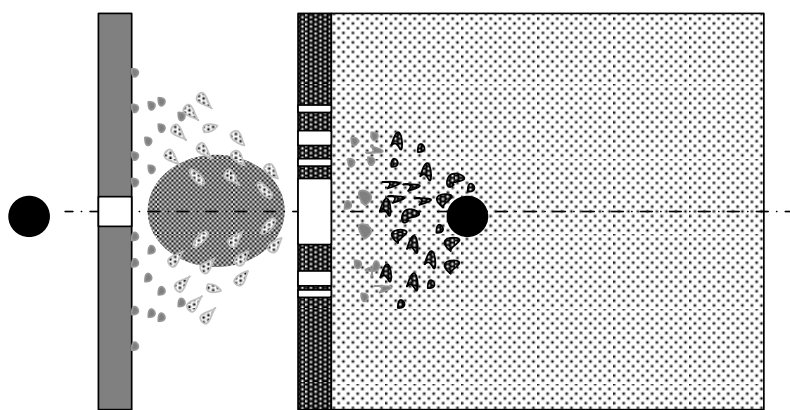


Рис. 1. Механизм процесса зажигания ТБ высокоскоростным ОЭ

Два указанных процесса (тепловыделение и теплоотвод) определяют критические условия (критические характеристики области), при которых существует неустойчивое тепловое равновесие. Если параметры облака превышают критические, то происходят самовоспламенение и затем зажигание, если не превышают – то затухание химического реагирования.

Наглядное представление о процессах, обуславливающих зажигание и дальнейшее развитие ситуации (устойчивое горение либо затухание), дает схема движения ОЭ в

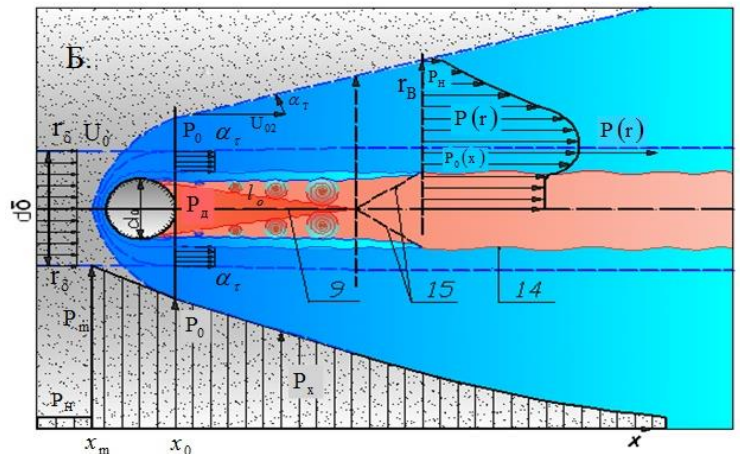


Рис. 2. Схема процесса турбулентного перемешивания топлива в ТБ в ближнем аэродинамическом следе за единичным ОЭ: 1 – головная ударная волна в сжимаемой жидкости перед ОЭ; 2 – передняя граница подогрева жидкости (тепловой пограничный слой); 3 – граница жидкости или фазового перехода из жидкости в пар; 4 – граница шарика-осколка; 5 – передняя граница вихревого свободного пограничного слоя; 6 – эпюра профиля скорости свободного пограничного слоя; 7 – эпюра профиля скорости сжатой струйки жидкости радиуса  $r_8$ ; 8 – крупный вихрь вихревого слоя; 9 – зона рециркуляции; 10 – нижняя граница вихревого слоя, огибающая крупные вихри; 11 – максимальный радиус вращения крупного вихря ( $\ell_v$ ); 12 – сечение захвата паровой струйки крупным вихрем ( $\Delta\delta_n$ ); 13 – схема течения крупного вихря; 14 – жидкая стенка канала перфорации начала дальнего следа; 15 – скачок присоединения

Самовоспламенение паро-газо-капельной реагирующей в газовой фазе смеси заданного объема и температуры в окружении нереагирующего газа происходит с меньшей температурой. Математическая модель представляет собой систему обыкновенных дифференциальных уравнений, выражающих законы сохранения массы и энергии в осредненных по объему параметрах, учитывающих межфазный тепло- и массообмен. В задаче также имеются критические условия самовоспламенения

Самовоспламенение паро-газо-капельной реагирующей в газовой фазе смеси заданного объема и температуры в окружении нереагирующего газа происходит с меньшей температурой. Математическая модель представляет собой систему обыкновенных дифференциальных уравнений, выражающих законы сохранения массы и энергии в осредненных по объему параметрах, учитывающих межфазный тепло- и массообмен. В задаче также имеются критические условия самовоспламенения

(критическая температура и критический диаметр облака). Такой подход позволяет учесть основные теплофизические, химико-кинетические параметры и начальные условия, определяющие самовоспламенение и последующее зажжение, связать характеристики ОЭ, обшивки объекта и стенки ТБ с величинами этих параметров и приблизительно спрогнозировать, зажжется или не зажжется керосин после пробития обшивки и стенки ТБ.

При проникновении ОЭ со сверхзвуковой скоростью в ТБ позади ОЭ возникает зона, которую определим как канал перфорации ОЭ (есть еще канал перфорации горючего), в котором образуется зона рециркуляции ближнего воздушного следа, затягиваемого в канал перфорации горючего самим ОЭ. Остановимся подробнее на соотношениях, обуславливающих геометрические, термодинамические и гидрогазодинамические параметры процесса проникания ОЭ, его лобового, парового и жидкого пристеночного пограничных слоев, донной зоны рециркуляции со свободным пограничным слоем и вихревой составляющей. Все эти параметры определяют критерии зажжения.

Результаты экспериментальных исследований, представленные в [2], показывают, что при пробитии ОЭ модели ТБ с типом керна ТС-1, заполненного пенополиуретаном (ППУ) ОЭ-100, при некоторых определенных параметрах процесса соударения происходит зажжение паров керосина внутри ТБ, и, как следствие, керосин начинает гореть. Поскольку зажжение происходит в процессе потери сплошности среды внутри ТБ и турбулентного перемешивания его содержимого, обоснование системы критериев зажжения ТБ ВЦ в данной работе строится на современных представлениях теории горения топливно-воздушных смесей в турбулентном потоке, основной вклад в развитие которой внесли российские ученые И.В. Беспалов, А.Г. Прудников, Е.С. Щетинков [3] и тепловой теории Я.Б. Зельдовича [4]. Данные теории соответствуют тем процессам, которые возникают при попадании высокоскоростного ОЭ внутрь ТБ.

Согласно современным представлениям теории горения топливно-воздушных смесей в турбулентном потоке, в канале перфорации на границе зоны рециркуляции ближнего воздушного следа образуются крупные вихри, которые могут обеспечить требуемую стехиометрию и другие условия для возгорания образовавшихся топливных локальных смесей [3].

Однако, как показали экспериментальные исследования [2], пробитие ОЭ модели ТБ с керосином типа ТС-1, заполненного ППУ, не всегда приводит к зажжению паров этого керосина (так, видимое возгорание необязательно переходит в пожар). Из этого следует важный вывод, что необходимым условием для поражения ТБ является выполнение не только критериев зажжения, но также критерия процесса распространения горения.

Проведенный анализ показывает, что процесс поражения ТБ обуславливают несколько факторов, главными из которых выступают температура, энергия потока ОЭ, проникающих в ТБ, критериальная стехиометрия газовой смеси и условия для распространения горения. Следовательно, образование высокотемпературного очага пожара из продуктов горения и массы выбитого вещества, которая способна нагреть воздух между преградами до высокой температуры и создать критические условия для зажжения окружающих паров керосина, будет определяться комбинацией нескольких критериев. Невыполнение хотя бы одного из них приведет к непоражению ТБ объекта за счет зажигательного действия ОЭ. Поэтому при оценке эффективности зажигательного действия ОЭ по ТБ предлагается использовать систему, состоящую из пяти критериев зажжения. Рассмотрим первый из них, который назовем критерием кинетического нагрева  $K_{p1}(KH)$ .

При зажигании нагретым телом температура его поверхности может быть больше температуры самовоспламенения, однако зажигания не произойдет. Дело в том, что у поверхности температура быстро падает, а концентрация горючего снижается. Баланс тепла при этом менее благоприятен, чем при самовоспламенении. Предельная критическая температура зажигания оказывается выше температуры самовоспламенения. Эта разница тем больше, чем меньше размер источника тепла (нагретого тела). Причем чем меньше размеры (облако) зажигающего тела и чем больше его скорость, тем выше должна быть его температура для того, чтобы готовая топливовоздушная смесь начала гореть [1, 3].

Таким образом, первый критерий определяется свойствами топлива, так как для каждого вида топлива существует критическое значение температуры  $T_{кр}$ , ниже которой зажжения не происходит:

$$K_{p1}(KH) = T / T_{кр} \geq 1,$$

где  $T_{кр}$  – температура продуктов полного сгорания стехиометрической смеси, которая является справочной величиной [3].

При решении задачи о воспламенении паров керосина, смешанного с воздухом, необходимо знать температуру  $T$ , которая образуется при нагреве потоком частиц парогазо-воздушной смеси. Поскольку время движения частиц ЗОП мало, а их теплоемкость большая (по сравнению с теплоемкостью воздуха), частицы остывают не сильно, остаются в расплавленном состоянии и по достижении стенки ТБ. Необходимо отметить, что для нагрева цилиндрического объема воздуха диаметром 10 мм и высотой 100 мм с температурой 300 К до температуры 600 К требуется всего 3 Дж энергии [3].

Для расчета текущей температуры может применяться математическая модель, разработанная в Научно-исследовательском институте прикладной математики и механики Томского государственного университета [5], позволяющая оценивать возникающее распределение температуры в условиях высокоскоростного удара.

Второй критерий, выполнение которого необходимо для зажжения ТБ, находят из условия минимальных механических разрушений, необходимых для создания каверны (зоны горения), диаметр  $D$  должен превышать минимальный ( $D_{кр}$ ), ниже которого зажжения также не происходит [2]. Выполнение данного условия обозначим как критерий (с индексом «2») минимальной перфорации стенки ТБ и канала армированного жидкого топлива, численно равный

$$K_{p2}(ПФ) = D / D_{кр} \geq 1.$$

Армирование ППУ кардинально меняет процессы, возникающие внутри ТБ после воздействия. До настоящего времени считалось, что армирование ППУ приводит к невозможности поражения ТБ за счет зажигательного действия. Однако проведенные экспериментальные исследования [2] показали, что при увеличении энергетики воздействующего ОЭ может произойти механическое повреждение ТБ с вырыванием части ППУ. В этом случае исчезают препятствия для образования смесового облака с критическим диаметром. Экспериментально установлено, что для керосина типа ТС-1 при диаметре канала перфорации армированного жидкого топлива менее 29 мм горение ТБ с ППУ не происходит. Поэтому в качестве  $D_{кр}$  в [2] предлагается использовать критериальный параметр, равный 29 мм. Значение  $D$  в [2] рассчитывается по формулам «Модель 1В».

Рассмотрим третий (с индексом «3») критерий задержки, или периода индукции воспламенения, обозначенный как  $K_{p3}(ИН)$ . Период индукции химической реакции воспламенения, согласно [3], должен быть меньше (или равен на границе действия этого

критерия) времени совместного пребывания горючего и воздуха (окислителя). Периодом индукции, или временем запаздывания самовоспламенения, называют время, за которое в горючем веществе с температурой  $T_0$  достигается температура самовоспламенения  $T_c$  [3]. Согласно тепловой теории [4], под температурой самовоспламенения понимают самую низкую температуру вещества, при которой происходит резкое увеличение скорости экзотермических реакций, заканчивающихся возникновением пламенного горения (то есть когда тепловыделение и теплоотвод становятся равны). При определении температуры самовоспламенения невозможно измерить период индукции, поэтому за этот период принимают время с момента нагрева вещества до появления пламени.

При попадании ОЭ в горючую смесь паров или газов с воздухом некоторый объем смеси нагревается и одновременно охлаждается ОЭ. Воспламенение смеси в этом случае зависит от соотношения периода индукции смеси и времени охлаждения ОЭ. Если период индукции больше времени охлаждения ОЭ до температуры, которая ниже температуры самовоспламенения, то воспламенения смеси не происходит. Если же период индукции меньше времени охлаждения ОЭ, смесь воспламеняется [4].

Температура самовоспламенения горючего вещества не является постоянной величиной. Эта температура, согласно тепловой теории самовоспламенения, зависит от скорости тепловыделения и скорости теплоотвода, которые в свою очередь обуславливаются объемом горючего вещества в ТБ, его концентрацией, давлением, формой ТБ (удельной поверхности теплоотвода) и пр. С увеличением объема ТБ скорость теплоотвода уменьшается, температура самовоспламенения должна понижаться соответственно, хотя, как эксперименты показывают, при объеме горючего вещества более 12 л температура самовоспламенения горючей смеси изменяется незначительно [2]. Объясняется это тем, что в значительных объемах горючая смесь самовоспламеняется не сразу по всему своему объему, а в тех местах, в которых создались наиболее оптимальные условия. Температура самовоспламенения смеси возрастает с уменьшением диаметра ОЭ (подобно тому, как увеличивается температура самовоспламенения газовой смеси при уменьшении ее объема).

Период индукции для одного и того же вещества неодинаков и зависит от состава горючей смеси, температуры и давления. Чем ниже температура нагрева горючего вещества при самовоспламенении, тем больше период индукции. Температура самовоспламенения горючей смеси уменьшается при повышении давления, что обусловлено увеличением скорости реакции [6].

Критерий задержки, или периода индукции воспламенения,  $K_{p3}(ИИ)$  определяется по формуле, предложенной А.Г. Прудниковым [6]:

$$K_{p3}(ИИ) = \frac{\tau_{ind} \cdot u_0}{12 \cdot d_0} \leq 1,$$

где  $u_0$  – скорость ударной волны;  $d_0$  – диаметр ОЭ, в которой

$$\tau_{ind} = \frac{\exp \frac{893}{T_g}}{P_g^{1,7}} + \frac{8 \cdot 10^{-3} \exp \frac{9600}{T_g}}{P_g},$$

где  $g$  – индекс параметра в донной зоне рециркуляции;  $P_g$  – донное давление, бар;  $T_g = T_n / \tau(M_o)$  – температура воздуха в донной зоне рециркуляции К;  $T_n$  – начальная температура воздушного потока (для  $H = 0$  км  $T_n = 288$  К),

Структурная схема расчета критерия задержки или воспламенения  $K_{pz}(ИИ)$  представлена на рис. 3.

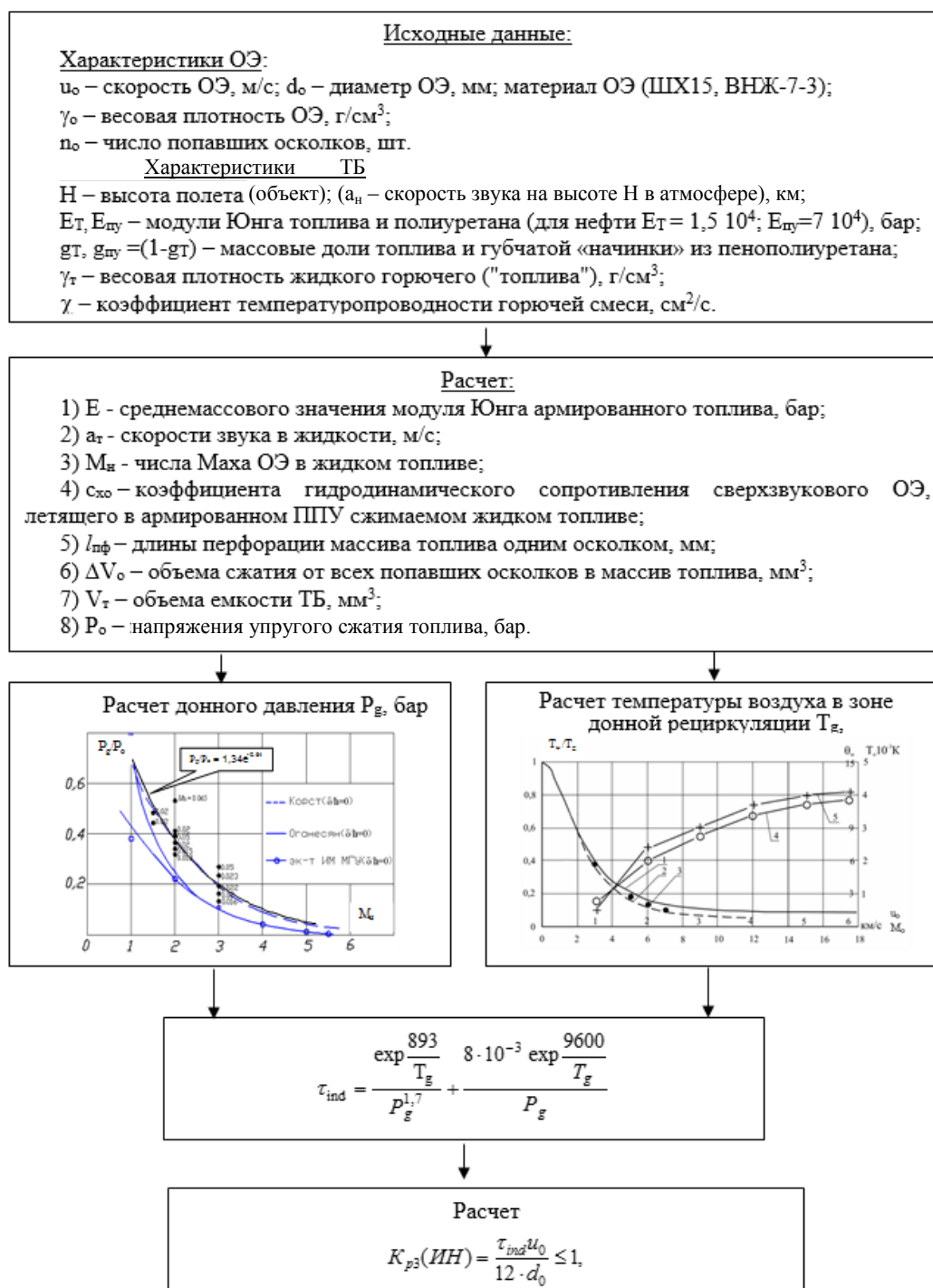


Рис. 3. Структурная схема расчета критерия задержки, или периода индукции, воспламенения  $K_{pz}(ИИ)$

Гидродинамика потока гомогенных и гетерогенных смесей в следе за плохо обтекаемым телом наиболее основательно рассмотрена в [6, 7]. Турбулентное горение представляет собой беспорядочный, нестационарный процесс турбулентного смешения объемов продуктов сгорания и свежей смеси и реагирование последней вследствие повышения ее температуры. Скорость движения объемов турбулизированной среды обуславливается скоростью вращения вихрей. Эти объемы (а вместе с ними и заключенная в них субстанция) могут перемещаться по турбулизированной среде практически неограниченно со скоростью, определяемой коэффициентом турбулентной диффузии. Поэтому параметры потока, в отличие от ламинарного фронта пламени в турбулентной зоне сгорания, будут случайными функциями от координат пространства и времени (в частности, мгновенное значение параметра потока и температура в произвольной точке турбулентного факела не равны средней по времени температуре в этой же точке).

Условия воспламенения горючей смеси зависят от предложенного А.Г. Прудниковым критерия (с индексом «4»)  $K_{p4}(BC)$ , определяющего режим микротурбулентного горения крупных вихрей свободного пограничного слоя ближнего следа ОЭ [6]:

$$K_{p4}(BC) = \frac{V_0 \cdot \tau_{ind}}{7 \cdot l_{zp}} \geq 1,$$

где  $v_0$  – среднеквадратичная скорость турбулентности в крупных вихрях, м/с;  $l_{zp} \approx 2d_0$  – длина зоны рециркуляции за ОЭ, мм.

Проведенные исследования показали [2], что вспышка горючей смеси может произойти, но распространения фронта пламени ламинарного горения в окружающую горючую смесь не будет. В рассматриваемых условиях для этого, согласно теории теплового воспламенения Я.Б. Зельдовича, необходимо, чтобы за время, в течение которого заканчивается вспышка горючей смеси толщина очага вспышки была бы (по меньшей мере) равна двойной толщине ламинарного фронта пламени [4], то есть условие распространения фронта горения вдоль столба горюче-воздушной смеси (в канале перфорации ОЭ от зажженных объемов смеси конечного сечения ближнего следа) можно записать в виде пятого критерия распространения горения (с индексом «5»):

$$K_{p5}(PI) = \frac{\tau_{\phi\phi}}{\tau_{преб}} = \frac{D_m \cdot u_0}{u_n^2 \cdot 12 \cdot d_0} \leq 1,$$

где  $\tau_{\phi\phi} \approx \frac{D_m}{u_n^2}$  – время формирования фронта горения (по тепловой модели горения

Я.Б. Зельдовича);  $D_m = D_m^o \left( \frac{T_g}{T_n} \right)^{1,75}$  – зависимость молекулярной диффузии от температуры.

$\frac{u_n}{u_0} \approx \left( \frac{u_n^{0,2} \cdot V_{TC}^{0,8}}{u_0} \right)$  – зависимость интенсивности турбулентного, гомогенного горения от  $u_n$ ,  $V_{TC}$ .

Структурная блок-схема математической модели расчета условной вероятности поражения ТБ представлена на рис. 4. Входными параметрами (аргументами) этой модели являются начальные параметры воздействия ОЭ. Выходным параметром математической модели служит условная вероятность поражения ТБ.

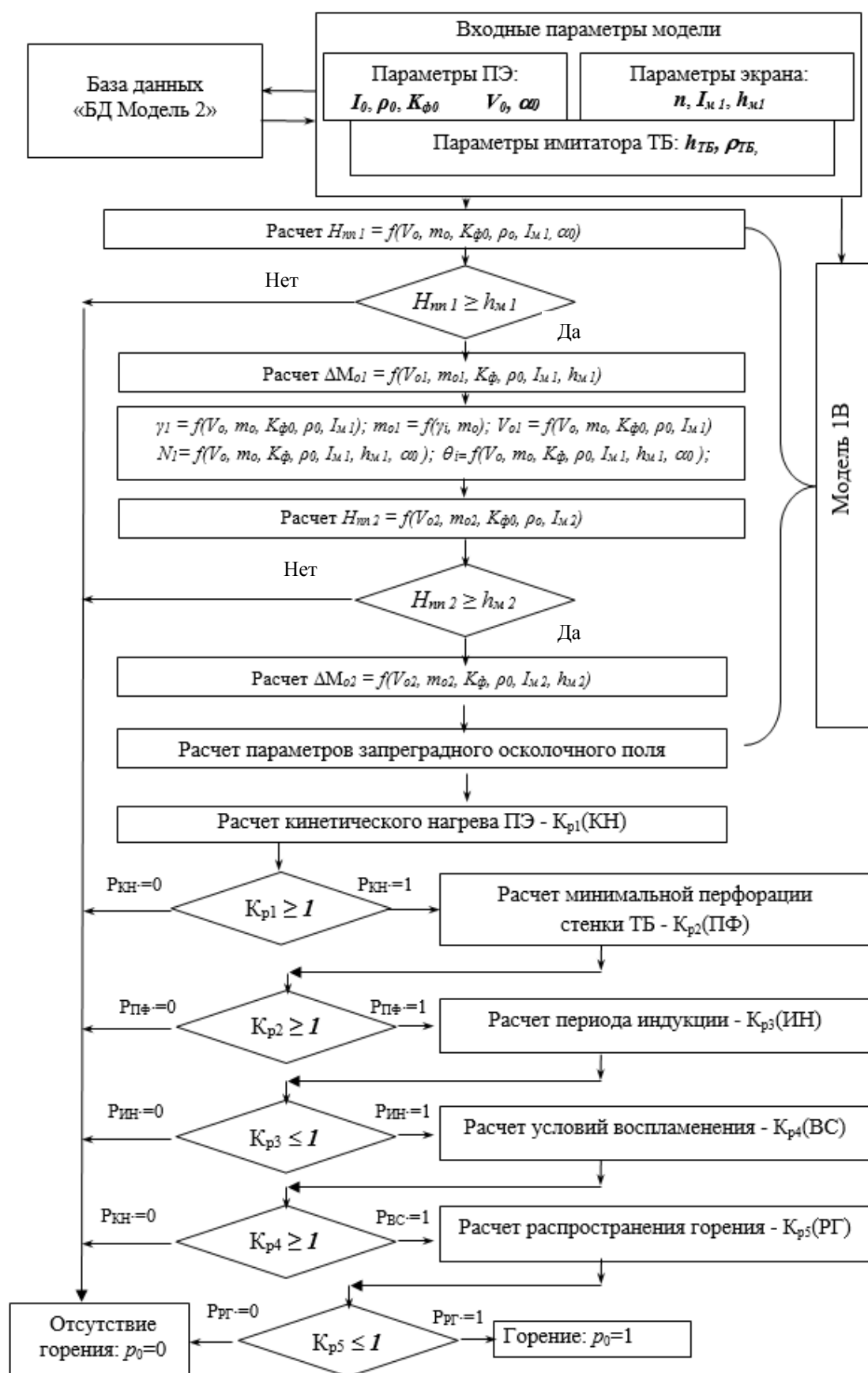


Рис. 4. Блок-схема математической модели расчета вероятности поражения ТБ

Алгоритм расчета вероятности зажжения ТБ цели  $p_0$  можно представить следующим образом. Стенка ТБ – последняя преграда, после ее пробития определяются параметры осколочного поля, попавшего в ТБ. Результаты расчета параметров осколочного поля, попавшего в ТБ, являются начальными параметрами для последовательного расчета пяти критериев зажжения ТБ: кинетического нагрева  $K_{p1}(KH)$ ; минимальной перфорации  $K_{p2}(ПФ)$ ; задержки, или периода индукции воспламенения,  $K_{p3}(ИН)$ ; условия воспламенения  $K_{p4}(BC)$ ; распространения горения  $K_{p5}(PG)$  (для физической модели). При невыполнении любого из них считается, что вероятность поражения  $p_0 = 0$ . Если все пять критериев выполняются, то  $p_0 = 1$ .

С учетом вышеизложенного условная вероятность поражения исходных отсеков, содержащих ТБ, из-за зажигательного действия ОЭ будет определяться по формуле

$$p_0 = P_{KH} \cdot P_{ПФ} \cdot P_{ИН} \cdot P_{BC} \cdot P_{PG},$$

где  $P_{KH}$  – вероятность кинетического нагрева паров топливной смеси осколками выше критического значения температуры для данного вида топлива;  $P_{ПФ}$  – вероятность механического разрушения (перфорации) стенки ТБ с образованием канала перфорации армированного жидкого топлива, диаметр которого превышает критический;  $P_{ИН}$  – вероятность, учитывающая время запаздывания самовоспламенения в процессе зажжения ТБ;  $P_{BC}$  – вероятности воспламенения топлива ОЭ при попадании его в жидкую фазу ТБ;  $P_{PG}$  – вероятность распространения горения топлива.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При проведении оценок чувствительности ТБ транспортных средств как сложной системы к воздействию ОЭ целесообразным оказывается иерархическое моделирование. Сначала осуществляют моделирование процесса пробития преград, защищающих топливо, для получения параметров осколочного поля, попавшего в ТБ, затем с помощью предложенной модели оценивают систему критериев зажжения топливных баков транспортных средств при воздействии высокоскоростных осколочных элементов. Зажжение ТБ указанных средств высокоскоростными ОЭ будет зависеть от реализации комбинации пяти необходимых критериев. Невыполнение хотя бы одного из них приводит, как мы отмечали, к непоражению ТБ.

С учетом вышеизложенного условная вероятность поражения ТС, содержащих ТБ, из-за зажигательного действия ОЭ будет определяться по формуле расчета условной вероятности поражения этих отсеков, приведенной ранее. Данная формула, по сути, представляет собой методику оценки зажигательного действия осколков по отсекам ТБ транспортных средств.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Щетинков Е.С. Физика горения газов. М.: Наука. 1965. 739 с.
2. Иницирующее и зажигательное действие боевых частей зенитных ракетных комплексов: учебное пособие / под ред. В.М. Кашина. СПб.: БГТУ. 2009. 244 с.
3. Прудников А.Г. К вопросу о вихревом горении // *Физика горения и взрыва*. 2010. Т. 46. № 6. С. 12–31.
4. Зельдович Я.Б., Баренблатт Г.И., Либрович В.Б., Махвиладзе Г.М. Математическая теория горения и взрыва. М.: Наука. 1980. 478 с.

5. Белов Н.Н., Демидов В.Н., Ефремова Л.В. Компьютерное моделирование динамики высокоскоростного удара и сопутствующих физических явлений // *Известия вузов. Физика*. 1992. Т. 35. № 8. С. 5–48.

6. Прудников А.Г., Подвальный А.М. Высокопроизводительные вычислительные алгоритмы замкнутых систем статистических уравнений и уравнений теплогазоаэродинамики многосредной механики взаимодействующих сред. *Информационные технологии в науке, образовании, телекоммуникации и бизнесе IT+SE'11: Материалы XXXVIII Международной конференции и дискуссионного научного клуба*. Украина, Крым, Ялта-Гурзуф. 2011. С. 29–32.

**Для цитирования:** Федосов О.Ю. Обоснование системы критериев зажжения топливных баков осколочными элементами // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2023. № 1 (17). С. 92–102.

## JUSTIFICATION OF THE SYSTEM OF CRITERIA FOR IGNITING FUEL TANKS WITH FRAGMENTATION ELEMENTS

O.Yu. FEDOSOV, Cand. Sc.

Department of Advanced Interspecific Research  
and Special Projects Ministry of Defense of Russian Federation,  
8, Komsomolsky Ave., Moscow, 119160, e-mail: olefed78@mail.ru

The system of criteria for ignition of fuel tanks of vehicles under the influence of high-speed fragmentation elements is justified on the basis of modern concepts of the theory of combustion of fuel-air mixtures in a turbulent flow. Gorenje is the physical mechanism of the process of near- and in-tank ignition of fuel vapor by a high-speed fragmentation element for fuel tanks protected by the vehicle skin is considered. Five criteria for igniting fuel tanks are presented, the fulfillment of which leads to damage to the fuel tank. A formula for the conditional probability of damage to compartments containing a fuel tank to the incendiary effect of fragmentation elements is presented. A structural block diagram of a mathematical model for calculating the conditional probability of damage to fuel tanks is presented.

**Keywords:** perforation channel, kinetic heating, criterion, modeling, recirculation, ultra-high-speed interaction, temperature.

Поступила в редакцию/received: 13.08.2022; после рецензирования/revised: 13.09.2022;  
принята/accepted: 15.10.2022