

О ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕОРИИ НЕЧЕТКИХ МНОЖЕСТВ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЕРОЯТНОСТИ ВЗРЫВА ИЗДЕЛИЙ, УЗЛОВ, СОДЕРЖАЩИХ ВВ, ПРИ НИЗКОСКОРОСТНЫХ УДАРНЫХ НАГРУЖЕНИЯХ (УДАРНЫХ МЕХАНИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ) В АВАРИЙНОЙ СИТУАЦИИ

А. С. Шмаков

ОЦНСБ ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. академ. Е. И. Забабахина», г. Снежинск

Предлагается подход к оценке вероятности взрыва¹⁾ изделий, узлов, содержащих ВВ, при возможных падениях, соударениях, столкновениях при обращении с ними в процессе эксплуатации, сборки и разборки при их однократном и однофакторном нагружении.

При низкоскоростном ударном нагружении изделий, узлов, содержащих ВВ, в местах контакта деталей из ВВ с элементами конструкции изделий возникают контактные давления и, соответственно, напряжения растяжения или (и) сжатия в деталях из ВВ. Так как узлы с ВВ являются многослойными конструкциями с упруго-пластичными связями, то при действии нагрузок в аварийной ситуации детали узлов с ВВ имеют возможность перемещаться как в пределах допусков, так и выходить за их границы. При разрушении деталей из ВВ возможно также перемещение частей деталей из ВВ. При разрушении изделий, узлов, содержащих ВВ, и их деталей возможно внедрение металлических частей деталей в детали из ВВ.

Поэтому при низкоскоростном ударном нагружении изделий, узлов, содержащих ВВ, в условиях аварийной ситуации взрыв ВВ может произойти от следующих причин:

- 1) воздействие контактных **давлений** со сдвигом смежных деталей;
- 2) воздействие контактных **давлений** при защемлении тонкого слоя ВВ;
- 3) разрушение деталей из ВВ при воздействии **давления**;

4) разрушение силовых деталей изделий, узлов, содержащих ВВ, и **внедрение** осколков этих деталей в ВВ;

5) **внедрение** инородных (не входящих в конструкцию изделия, узла с ВВ) элементов, предметов в детали из ВВ.

В перечислении жирным шрифтом выделены основные факторы, влияющие на вероятность взрыва ВВ в аварийной ситуации с изделием, узлом, содержащим ВВ. Это – давление на ВВ и возможность внедрения в ВВ твердых предметов.

Условия возбуждения взрыва ВВ при механических воздействиях

Предпосылкой взрыва ВВ при ударе является образование и развитие в ВВ «горячих точек» - очагов горения. Развитие горения в этих очагах и последующего взрыва ВВ регламентируется давлением. Существуют и экспериментально измерены величины, ниже которых развитие очагов не происходит. С учетом этого определяются критические скорости соударения изделия, узлов, содержащих ВВ, с преградой.

Критическая скорость при ударе о концентратор – максимальная скорость, когда

¹⁾ Под понятием «взрыв ВВ» здесь и далее будем понимать одно из следующих возможных событий: взрывчатое превращение, взрыв, детонация ВВ.

после пробития концентратором напряжений инертных преград перед ВВ остаточная скорость еще не создает на границе «концентратор-ВВ» давление, достаточное для перехода очагов горения в источник взрывной реакции.

В справочниках для ВВ приводятся два значения максимально возможных давлений, при которых очаги загорания не получают развития. Эти значения давления были получены на приборе, в котором происходит трение стального ролика о поверхность ВВ под давлением. Опыт производится при наличии и отсутствии песка. Первое значение давления $P_{кр.внед.}$ получено для случая, когда «горячие точки» образуются при трении тугоплавких инородных для ВВ частиц о стальную поверхность. Второе значение – $P_{кр.соуд.}$ получено для случая, когда в зоне трения (деформации ВВ) отсутствуют твердые включения, и очаги образуются за счет внутреннего трения ВВ. При этом $P_{кр.внед.} < P_{кр.соуд.}$, и эти критические параметры существенно отличаются²⁾.

При очень малых и малых скоростях удара узла, изделия, содержащего ВВ, мы уверены, что разрушение узла, изделия не происходит и расчет вероятности взрыва ВВ можем вести по критическому параметру для случая соударения. При больших и очень больших скоростях удара узла, изделия, содержащего ВВ, мы считаем, что происходит разрушение узла, изделия и расчет вероятности взрыва ВВ необходимо проводить по критическому параметру для случая внедрения. Между этими крайними случаями находится зона неизвестности. Это та область, в которой мы не можем с определенностью утверждать, каким из параметров взрывобезопасности пользоваться.

Кроме того, в аварийной ситуации, когда элементы конструкции сложным обра-

зом взаимодействуют друг с другом, могут образовываться или не образовываться осколки элементов конструкции. Мы не в состоянии определить ни их массу, ни их скорость. Вообще осколок конструкции может и не внедриться в ВВ, но создать при этом определенное давление на поверхности ВВ, которое в совокупности с прочими условиями может оказаться достаточным для инициирования ВВ. Также затруднительно точно определить, какое давление на детали ВВ реализуется, есть ли смещение деталей ВВ при аварийной ситуации. Все эти факторы (наличие осколков, их масса, скорость, давление на детали из ВВ, наличие сдвига смежных деталей из ВВ) определяют, будет взрыв ВВ или нет. При отсутствии точных знаний об этих факторах мы обречены либо отбрасывать ряд факторов, либо делать оценки с запасом.

Основатель нечеткой логики профессор Л. Заде выдвинул утверждение, названное им **принципом несовместимости** (1973 г.) [1, 2]: «По мере возрастания сложности системы наша способность формулировать точные и при этом осмысленные утверждения о ее поведении уменьшается вплоть до некоторого порога, за которым точность и смысл становятся практически взаимоисключающими характеристиками». Точное моделирование с использованием точечных оценок возможно лишь в случае простых систем с малым числом входных величин. Для нетривиальных систем, с большим числом факторов приходится использовать информацию, представленную с помощью теории нечетких множеств. Поэтому выходом из этой ситуации является разработка модели о вероятности взрыва изделий, узлов с ВВ при ударных механических воздействиях на основе теории нечетких множеств. Такая модель поможет избежать перечисленных проблем, т.к. модели на основе теории нечетких множеств могут и должны использоваться в первую очередь там, где применение классических моделей вызывает трудности.

²⁾ В акустическом приближении скорость V удара концентратора по детали из ВВ, при которой достигается давление P , рассчитывается по формуле $V = P / (1/\rho_0 c_0 + 1/\rho_1 c_1)$, где ρ – плотность, c – скорость звука, а индексы «0» и «1» относятся соответственно к ВВ и материалу концентратора, с которым соударяется деталь из ВВ.

О природе неопределенности

Существуют два вида неопределенности: стохастическая и лексическая.

Примером *стохастической* неопределенности может служить утверждение: «Вероятность взрыва узла с ВВ при его падении с высоты X метров составляет Y ».

Событие «падение узла с ВВ с высоты X метров» является в данном случае точно определенным. Точное значение вероятности взрыва ВВ при наступления этого события можно вычислить по формуле:

$$q = \Phi(U_q) = \Phi \left[\frac{V - \bar{V}_{кр}}{\bar{V}_{кр} \cdot W_{\bar{V}_{кр}}} \right] = \Phi \left[\frac{1 - \bar{\eta}}{\bar{\eta} \cdot W_{\bar{\eta}}} \right], \quad (1)$$

где $\Phi(U_q) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{U_q} e^{t^2/2} dt$;

– значение интегральной функции нормального распределения при квантиле U_{Pi} , определяется по таблицам [3];

U_q – квантиль нормального распределения;

V – скорость встречи изделия, узла, содержащего ВВ, ВВ с преградой;

$\bar{V}_{кр}$, $W_{\bar{V}_{кр}}$ – критическая скорость встречи изделия, узла, содержащего ВВ, ВВ с преградой и коэффициент вариации ($\bar{V}_{кр} \cdot W_{\bar{V}_{кр}} = \sigma_{\bar{V}_{кр}}$, $\sigma_{\bar{V}_{кр}}$ – среднее квадратическое отклонение).

Стохастическая неопределенность в данной ситуации проявляется в виде вероятности возникновения конкретного, *точно определенного* события – взрыва узла с ВВ при падении с высоты X метров.

Примером *лексической* неопределенности может служить утверждение: «Вероятность взрыва узла с ВВ при его падении с небольшой высоты мала». Здесь присутствуют два понятия:

1) падение узла с ВВ с небольшой высоты;

2) малая вероятность.

Оба эти понятия являются нечеткими, неточными и зависят от субъективных представлений того, кто их выражает.

Сказанное можно подытожить следующим образом:

– *стохастическая* неопределенность означает неопределенность появления события, которое само по себе является точно описанным;

– *лексическая* неопределенность означает неопределенность в описании события.

Особенности конструкции изделий, узлов, содержащих ВВ, которые влияют на характер воздействия на ВВ при ударе, можно выразить следующим образом: *буртики, кронштейны в конструкции изделия, крепящие узел с ВВ, играют двойную роль: и как защита при умеренной скорости удара, и как источник взрыва, концентратор напряжения при большой скорости удара.*

В этом утверждении присутствуют нечеткие понятия: «умеренная скорость удара», «большая скорость удара», что является собой лексическую неопределенность в описании свойств изделий, содержащих ВВ. Поэтому модель реакции изделия, узла с ВВ при ударных механических воздействиях можно представить с позиции теории нечетких множеств. При этом основными понятиями, связанными с нечеткими множествами, будут:

– лингвистическая переменная³⁾ – «скорость удара»;

– лингвистические терм-множества³⁾ – «умеренная скорость удара» и «большая скорость удара».

При умеренной скорости удара на опасных элементах конструкции изделия, узла, содержащего ВВ, возникают перегрузки, которые не приводят к недопустимым деформациям, при этом отсутствуют концентраторы напряжений, способные внедриться

³⁾ Далее прилагательное «лингвистическая» будем опускать, подразумевая при этом, что переменные и терм-множества этих переменных являются лингвистическими.

в ВВ. В этом случае для оценки вероятности взрыва по формуле (1) в качестве критического параметра взрывобезопасности будем использовать критическую скорость соударения ВВ. При большой скорости удара на опасных элементах изделия, узла, содержащего ВВ, возникают перегрузки, приводящие к недопустимым деформациям или разрушению элементов конструкции, при этом образуются концентраторы напряжений, способные внедриться в ВВ. В этом случае для оценки вероятности взрыва по формуле (1) в качестве критического параметра взрывобезопасности будем использовать критическое значение скорости, которое характерно для внедрения в ВВ посторонних предметов.

На основании этих соображений будем строить модель реакции изделия, узла, содержащего ВВ, на ударные механические воздействия. Представим, какие бывают нечеткие модели.

Два основных типа нечетких моделей [4]:

- 1) модели Мамдани;
- 2) модели Такаги-Сугено (TS-модели).

От модели Мамдани модели Такаги-Сугено отличаются формой правил. Если в случае модели Мамдани, описывающей систему с одним входом и одним выходом (SISO), правила имеют вид:

ЕСЛИ (x есть A), ТО (y есть B),

(где A , B – нечеткие множества типа «малая скорость удара» или «скорость удара близкая к 5 м/с», «высокая вероятность взрыва»), то в случае TS-модели правила имеют вид:

ЕСЛИ (x есть A), ТО ($y = f(x)$).

Вместо нечеткого множества заключение каждого правила содержит функцию $f(x)$, которая может быть как линейной, так и нелинейной. Если в модели системы типа SISO база правил имеет вид:

R_1 : ЕСЛИ (x есть A_1), ТО ($y = f_1(x)$),

...

R_m : ЕСЛИ (x есть A_m), ТО ($y = f_m(x)$),

то значение на выходе модели вычисляется на основе степени активации отдель-

ных заключений f_i , $I = 1, \dots, m$, в соответствии с формулой [4]:

$$y = \frac{\sum_{i=1}^m \mu_{A_i}(x) \cdot f_i(x)}{\sum_{i=1}^m \mu_{A_i}(x)}, \quad (3)$$

где $\mu_{A_i}(x)$ – степень принадлежности элемента x множеству A_i .

Пусть мы имеем некие гипотетические изделия и узлы, содержащие ВВ. Эти изделия и узлы обладают свойствами, которые представлены в табл. 1, для определенного ВВ критические скорости соударения и внедрения рассчитываются по формуле, которая представлена в примечании 2, на основании данных о критических давлениях, взятых из справочников по ВВ. Составим TS-модель системы типа SISO с базой правил вида (2) для определения вероятности взрыва изделия, узла, содержащего ВВ, при ударных механических воздействиях.

Таблица 1

Исходные данные «свойства гипотетической конструкции изделия, узла, содержащего ВВ»

| № | Варианты системы «изделие – узел – ВВ» | V_1 , м/с | V_2 , м/с |
|----|--|-------------|-------------|
| 1. | Вариант № 1 (узел с ВВ) | 7,5 | 17,5 |
| 2. | Вариант № 2 (изделие с ВВ) | 12,5 | 22,5 |

Примечание:

V_1 – скорость соударения изделия, узла, содержащего ВВ, при которой гарантированно нет разрушения конструкции, нет концентраторов напряжений (расчетно-экспериментальные данные);

V_2 – скорость соударения изделия, узла, содержащего ВВ, при которой гарантированно разрушается конструкция, присутствуют концентраторы напряжений (расчетно-экспериментальные данные).

В практических приложениях теории нечетких множеств используется большое количество различных типов функций принадлежности. Функции принадлежности, состоящие из прямолинейных участков, применяются на практике достаточно часто, что обусловлено их простотой, также для их

задания требуется малый объем данных (см. табл. 1). В начале предположим, что для описания реакции изделия, узла, содержащего ВВ, при механических ударных нагрузках достаточно использовать функции принадлежности трапецевидной формы. Общий вид такой функции представлен на рис. 1.

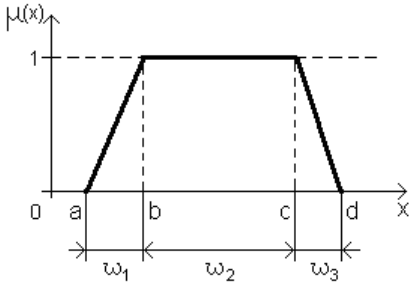


Рис. 1. Ассиметричная трапецевидная функция принадлежности

В случае трапецевидной функции принадлежности вводятся следующие логические переменные:

$$\omega_1 = \begin{cases} 1 & \text{для } a \leq x < b, \\ 0 & \text{в других случаях,} \end{cases} \quad (4)$$

$$\omega_2 = \begin{cases} 1 & \text{для } b \leq x < c, \\ 0 & \text{в других случаях,} \end{cases} \quad (5)$$

$$\omega_3 = \begin{cases} 1 & \text{для } c \leq x < d, \\ 0 & \text{в других случаях,} \end{cases} \quad (6)$$

Функция принадлежности, имеющая форму ассиметричной трапеции, может быть представлена в виде:

$$\mu(x) = \omega_1 \left(\frac{x-a}{b-a} \right) + \omega_2 + \omega_3 \left(\frac{d-x}{d-c} \right). \quad (7)$$

На рис. 2–4 представлены трапецевидные функции принадлежности для нашей задачи.

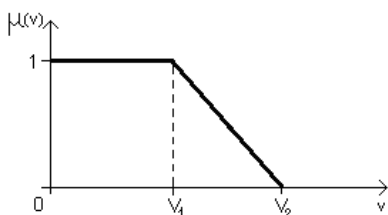


Рис. 2. Терм-множество «умеренная скорость удара»

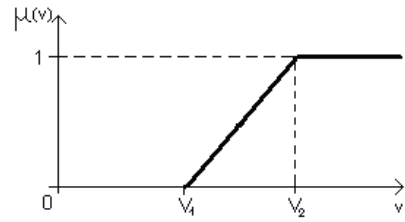


Рис. 3. Терм-множество «большая скорость удара»

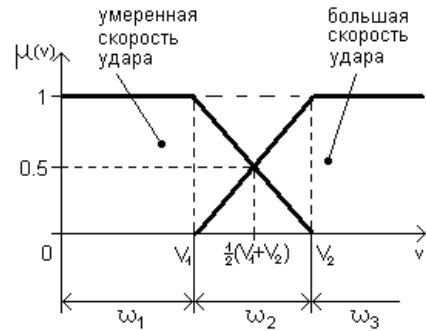


Рис. 4. Переменная «скорость удара» с терм-множествами «умеренная скорость удара» и «большая скорость удара»

Определим лингвистическую переменную «скорость удара» для *первого варианта* системы «изделие – узел – ВВ». В соответствии с формулой (7) и рис. 2, 4 для данных из таблицы 1 (*первая строка*) функция принадлежности лингвистической переменной «скорость удара» будет представлена в виде:

– к терм-множеству «умеренная скорость удара»

$$\mu_1(v) = \omega_1 + \omega_2 \left(\frac{V_2 - v}{V_2 - V_1} \right) = \omega_1 + \omega_2 \left(\frac{17,5 - v}{17,5 - 7,5} \right) = \omega_1 + \omega_2 \left(\frac{17,5 - v}{10} \right); \quad (8)$$

– к терм-множеству «большая скорость удара»

$$\mu_2(v) = \omega_2 \left(\frac{v - V_1}{V_2 - V_1} \right) + \omega_3 = \omega_2 \left(\frac{v - 7,5}{17,5 - 7,5} \right) + \omega_3 = \omega_2 \left(\frac{v - 7,5}{10} \right) + \omega_3 \quad (9)$$

при

$$\omega_1 = \begin{cases} 1 & \text{для } 0 \leq v < 7.5, \\ 0 & \text{в других случаях,} \end{cases} \quad (10)$$

$$\omega_2 = \begin{cases} 1 & \text{для } 7.5 \leq v < 17.5, \\ 0 & \text{в других случаях,} \end{cases} \quad (11)$$

$$\omega_3 = \begin{cases} 1 & \text{для } 17.5 \leq v < +\infty, \\ 0 & \text{в других случаях.} \end{cases} \quad (12)$$

Здесь и далее v – скорость соударения изделия, узла, содержащего ВВ.

По аналогии, определим лингвистическую переменную «скорость удара» для второго варианта системы «изделие – узел – ВВ». В соответствии с формулой (7) и рис. 2, 4 для данных из табл. 1 (вторая строка) функция принадлежности лингвистической переменной «скорость удара» будет представлена в виде:

– к терм-множеству «умеренная скорость удара»

$$\mu_1(v) = \omega_1 + \omega_2 \left(\frac{V_2 - v}{V_2 - V_1} \right) = \omega_1 + \omega_2 \left(\frac{22,5 - v}{22,5 - 12,5} \right) = \omega_1 + \omega_2 \left(\frac{22,5 - v}{10} \right); \quad (13)$$

– к терм-множеству «большая скорость удара»

$$\mu_2(v) = \omega_2 \left(\frac{v - V_1}{V_2 - V_1} \right) + \omega_3 = \omega_2 \left(\frac{v - 12,5}{22,5 - 12,5} \right) + \omega_3 = \omega_2 \left(\frac{v - 12,5}{10} \right) + \omega_3 \quad (14)$$

при

$$\omega_1 = \begin{cases} 1 & \text{для } 0 \leq v < 12,5, \\ 0 & \text{в других случаях} \end{cases} \quad (15)$$

$$\omega_2 = \begin{cases} 1 & \text{для } 12,5 \leq v < 22,5, \\ 0 & \text{в других случаях} \end{cases} \quad (16)$$

$$\omega_3 = \begin{cases} 1 & \text{для } 22,5 \leq v < +\infty, \\ 0 & \text{в других случаях} \end{cases} \quad (17)$$

База правил нашей TS-модели будет иметь вид:

$$R_1: \text{ЕСЛИ } (v - \text{«умеренная»}), \text{ ТО } (q_1 = f_1(v, V_{кр}^{сoуд})), \quad (18)$$

$$R_2: \text{ЕСЛИ } (v - \text{«большая»}), \text{ ТО } (q_2 = f_2(v, V_{кр}^{внед})),$$

где q_1 и q_2 – вероятности взрыва ВВ, рассчитанные по формуле (1) для случаев соударения ВВ и внедрения в ВВ осколков, элементов конструкции узла, изделия.

При использовании многоугольных функций принадлежности обеспечивается выполнение условия разбиения единицы, в соответствии с которым сумма степеней принадлежности для любого элемента x , знаменатель в формуле (3), должна равняться 1. С учетом этого значение на выходе модели (18), вероятность взрыва ВВ – q_Σ , вычисляется на основе степени активации отдельных заключений в соответствии с формулой:

$$q_\Sigma = \mu_1(v) \cdot f_1(v, V_{кр}^{сoуд}) + \mu_2(v) \cdot f_2(v, V_{кр}^{внед}). \quad (19)$$

Результаты вычислений по модели (19) с заданной базой правил (18) и принятыми функциями принадлежности, рассчитываемыми по формулам (8–17), при исходных данных из табл. 1 представлены на рис. 5–7. На рис. вероятность взрыва ВВ обозначена для узла с ВВ – «3а», для изделия с ВВ – «3б».

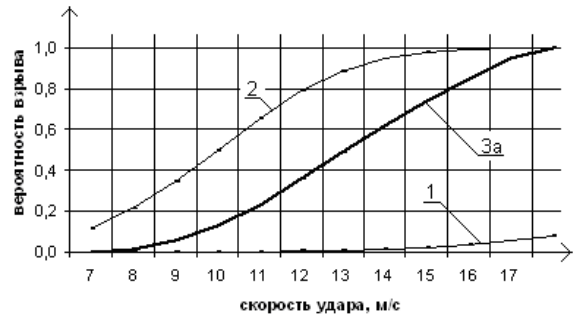


Рис. 5. Вероятность взрыва для первого варианта (узел с ВВ) при ударном воздействии:

1 – вероятность взрыва узла с ВВ при отсутствии концентраторов напряжений (расчет проводится по параметру $\bar{V}_{кр}^{сoуд}$); 2 – вероятность взрыва узла с ВВ при наличии концентраторов напряжений (расчет проводится по параметру $\bar{V}_{кр}^{внед}$); 3а – вероятность взрыва узла с ВВ по модели, основанной на нечеткой логике

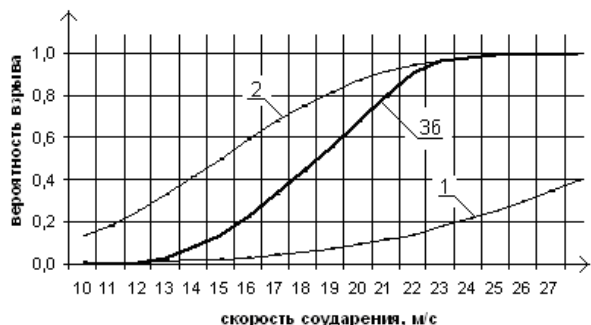


Рис. 6. Вероятность взрыва для второго варианта (изделие с ВВ) при ударном воздействии: 1 – вероятность взрыва узла с ВВ при отсутствии концентраторов напряжений (расчет проводится по параметру $\bar{V}_{кр}^{сoud}$); 2 – вероятность взрыва узла с ВВ при наличии концентраторов напряжений (расчет проводится по параметру $\bar{V}_{кр}^{внед}$); 3б – вероятность взрыва узла с ВВ по модели, основанной на нечеткой логике

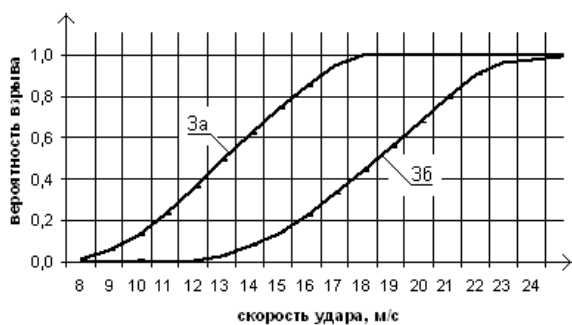


Рис. 7. Вероятность взрыва для первого (узел с ВВ) и второго (изделие с ВВ) варианта системы при ударном воздействии по модели, основанной на нечеткой логике: 3а – вероятность взрыва узла с ВВ; 3б – вероятность взрыва изделия с ВВ

Для кривых, приведенных на рис. 7, можно подобрать функцию. Правая сигмоидальная функция задается с помощью выражения [5]:

$$f(x) = 1/(1+\exp(-a \cdot (x-b))), \quad (20)$$

где a и b – параметры, задающие наклон функции и координату точки ее перегиба.

Параметр b задает координату точки (точку перегиба), в которой значение функции равно 0,5. Коэффициент a определяет наклон функции в точке перегиба – с увеличением его значения растет величина

наклона. При $a = 10$ вид функции близок к ступенчатому. Коэффициент наклона a и параметр b можно вычислить, подставив в (20) значения известных вероятностей и скоростей удара. Таким образом, получим функции, по которым возможно определять вероятность взрыва узла, изделия, содержащего ВВ, при определенных механических воздействиях (ударах, падениях этих узлов, изделий).

Предложенный подход является состоятельным настолько, насколько точно мы можем определять значения параметров, используемых при расчетах:

1) параметры, описывающие свойства конкретного ВВ – значения максимально возможного давления, при которых очаги загорания во ВВ не получают развития (экспериментальные данные):

- первое значение давления для случая, когда «горячие точки» образуются при трении тугоплавких инородных для ВВ частиц о стальную поверхность;

- второе значение для случая, когда в зоне трения, деформации ВВ, отсутствуют твердые включения, и очаги образуются за счет внутреннего трения ВВ;

2) параметры, описывающие свойства конкретного узла, изделия, содержащего ВВ (расчетно-экспериментальные данные):

- скорость соударения узла, изделия, при которой они гарантированно не разрушаются;

- скорость соударения узла, изделия, при которой гарантированно происходит их разрушение, появляются концентраторы напряжений;

- скорость, с которой ВВ ударяется об окружающие его детали, в зависимости от скорости удара узла, изделия, содержащего это ВВ;

- скорость внедрения осколков, элементов деталей, окружающих ВВ, в зависимости от скорости удара узла, изделия;

3) параметры осколков, элементов деталей (форма, скорость), которые образуются в зависимости от скорости удара узла, изделия, содержащего ВВ.

В части дальнейшего развития предложенного подхода можно предложить следующее.

Провести анализ типов функции принадлежности нечеткого множества и определить наиболее подходящую из них для решения нашей задачи. Кроме функции принадлежности, состоящей из прямолинейных участков, которая была использована для построения нашей модели, существуют другие функции принадлежности: гауссовы, сигмоидальные, гармонические, полиномиальные. Можно использовать гауссову функцию принадлежности для описания области между значениями скоростей, когда происходит разрушение узла, изделия, а когда – нет. Интуитивно представляется, что эти значения подчиняются нормальному закону распределения.

Для лучшего представления процессов, происходящих при внедрении в ВВ осколков, элементов деталей, окружающих ВВ, можно построить соответствующую модель. Эта модель может быть основана на нечеткой логике и предусматривать расчет вероятности взрыва ВВ по двум параметрам. Первый – скорость внедрения, которой обладает осколок, элемент внедряющейся в ВВ детали в самом начале своего пути, когда он имеет максимальную скорость. Второй – давление, которое создал осколок, элемент внедрившейся в ВВ детали (когда он уже внедрился). Это будет отражать следующую картину: по мере внедрения инородного тела в ВВ его скорость линейно падает до нуля, и при этом увеличивается давление, создаваемое за счет сдавливания ВВ. При одинаковой начальной скорости внедрения глубина внедрения разная для концентраторов различной формы: чем больше площадь концентратора, по которой происходит его взаимодействие с ВВ, тем меньше глубина проникновения. И для различных концентраторов (например, стержней различного диаметра) взрыв ВВ при их внедрении будет происходить в зависимости от

давлений и скоростей. При малом диаметре концентратора достаточно небольшой начальной скорости, чтобы произошел взрыв ВВ, но при этом такой концентратор должен создать большое давление, чтобы был взрыв ВВ. Для того, чтобы произошел взрыв ВВ при внедрении концентратора большого диаметра, необходима большая начальная скорость, и при этом достаточно создать умеренное давление в ВВ. Таким образом, мы можем представить взаимосвязь всех этих параметров. Поэтому в этом случае при создании нечеткой модели необходимо использовать оба значимых параметра (скорость внедрения, давлением, которое при этом создается) в их взаимосвязи с параметром, определяющим форму и размер концентратора. Такая модель будет, безусловно, намного сложнее модели, представленной в этой статье, но она позволит обоснованно подойти к определению вероятности как взрыва ВВ при внедрении в него посторонних предметов в частности, так и взрыва ВВ при низкоскоростных ударных нагружениях в целом.

Список литературы

1. Заде Л. А. Основы нового подхода к анализу сложных систем и процессов принятия решений. – В кн.: Математика сегодня. М.: Знание, 1974.
2. Заде Л. А. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений. – М.: Мир, 1976.
3. Большев Л. Н., Смирнов Н. В. Таблицы математики
4. русской статистики, М.: Вычислительный центр АН СССР, 1968.
5. Нечеткое моделирование и управление / А. Пегат, пер. с англ. – 2-е изд. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2013.
6. Выгодский М. Я. Справочник по высшей математике, М.: Наука, 1965.