

Есипов Ю.В.

Основы расчета мер вероятности и возможности возникновения происшествий и примеры систем

1. Правила определения вероятности и возможности по логической модели происшествия

Преобразование логической (булевой) функции происшествия (ЛМП), $y = f(x_1, x_2, \dots, x_i)$, в вероятностную и возможность (нечёткую) формы происшествия (которые представим, соответственно, аббревиатурами – ВФП и НФП) выполним следующим образом.

Вероятностную форму функции происшествия (как выполнение логического условия, $y = 1$) представим в виде

$$\text{Pro}(y = 1) = F_B(p_1, p_2, \dots, p_i), \quad (1)$$

где $\text{Pro}(\cdot)$ – оператор вероятности (probability);

функция $F_B(\cdot)$ – алгебраическая форма функции вероятности, заданная на множестве $\{p_i\}$ вещественных переменных – вероятностей исходов $\text{Pro}(x_i = 1) = p_i$, получаемая как результат применения **элементарных правил** преобразования от ЛМ в ВМ.

Возможностную (нечёткую) форму функции происшествия, которое также представим как выполнение условия, $y = 1$, запишем в виде

$$\text{Pos}(y = 1) = F_H(\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_i), \quad (2)$$

где $\text{Pos}(\cdot)$ – оператор вероятности (possibility);

$F_H(\cdot)$ – заданная на «нечёткой» сигнатуре нечеткая форма функция от множества $\{\pi_i\}$ вещественных переменных – возможностей (нечётких) мер исходов $\text{Pos}(x_i = 1) = \pi_i$, которая есть результат применения **элементарных правил** преобразования от ЛМ в НМ.

1.1. Элементарные правила преобразования от логической (булевой) модели в вероятностную модель

1) Булевы переменные y и x_i , принимающие значения: 0 ∨ (или) 1, заменяют переменными P и p_i , которые заданы на интервале $[0, 1]$ вещественных чисел. Причем отметим, что значение $p_i = 0$ означает, что выполнение условия $x_i = 1$ не возможно или невыполнимо. Тогда как условие $p_i = 1$ означает, что условие $x_i = 1$ достоверно.

2) Операцию логического сложения (дизъюнкцию) двух переменных $x_1 \vee x_2$ заменяют на основе преобразования вида:

$$y = x_1 \vee x_2 \rightarrow P = 1 - (1 - p_1) \cdot (1 - p_2). \quad (3)$$

3) Операцию логического умножения (конъюнкцию) двух переменных $x_1 \wedge x_2$ заменяют операцией вида:

$$y = x_1 \wedge x_2 \rightarrow P = p_1 \cdot p_2. \quad (4)$$

4) Операцию отрицания «не x_i » (причем $x_i \vee \text{«не } x_i\text{»} = 1$) заменяют преобразованием вида:

$$y = \text{не } x_i \rightarrow P = 1 - p_i. \quad (5)$$

1.2. Элементарные правила преобразования от логической (булевой) модели в нечёткую (возможностную) модель

1) Булевы переменные y и x_i , принимающие значения: 0 ∨ (или) 1, заменяют переменными, далее называемыми возможностными (нечёткими) мерами, Π и π_i , которые заданы на интервале $[0, 1]$ вещественных чисел. Причем значение $\pi_i = 0$ означает, что выполнение условия $x_i = 1$ не возможно с уверенностью $1 - \alpha$, где α – уровень различимости нечетких параметров, с помощью которых описывают условие $x_i = 1$. Физический смысл этому поясняется при определении возможностной меры на основе параметрической модели происшествия «воздействие – восприимчивость» (см. п.3)

2) Преобразование логической функции происшествия в её возможностную форму основано на использовании следующих элементарных операций – замещений:

2.1. булева переменная x_i замещается соответствующей возможностной мерой π_i :

$$x_i \rightarrow \pi_i; \quad (6)$$

2.2. операция «логическое и» (\wedge) замещается операцией (\min) из сигнатуры четких и нечетких множеств:

$$\wedge \rightarrow \min; \quad (7)$$

2.3. операция «логическое или» (\vee) замещается операцией (\max) из сигнатуры четких и нечетких множеств:

$$\vee \rightarrow \max. \quad (8)$$

2. Типовые примеры построения вероятностной функции происшествия

Рассмотрим следующие элементарные типовые логические функции, с помощью которых можно анализировать и учитывать бесповторные предпосылки происшествия.

$$1) y = x_1 \vee x_2; \rightarrow \text{Pro}(y = 1) = P = 1 - q_1 \cdot q_2 = 1 - (1 - p_1) \cdot (1 - p_2) = p_1 + p_2 - p_1 \cdot p_2. \quad (9)$$

$$2) y = x_1 \wedge x_2; \rightarrow \text{Pro}(y = 1) = P = p_1 \cdot p_2. \quad (10)$$

$$3) y = x_1 \vee x_2 \cdot x_3 = x_1 \vee z_i; \rightarrow P = p_1 + p_2 \cdot p_3 - p_1 \cdot p_2 \cdot p_3. \quad (11)$$

$$4) y = (x_1 \vee x_2) \cdot x_3 = z_1 \cdot x_3. \rightarrow P = p_1 \cdot p_3 + p_2 \cdot p_3 - p_1 \cdot p_2 \cdot p_3. \quad (12)$$

Вероятности p_i предпосылок происшествия находят статистически, что наиболее достоверно, но, как правило, в рискологии не достижимо. Вследствие того, что рассматриваемые системы являются уникальными или нетиповыми.

Если это не удастся, то на основании построения и применения следующих моделей.

1) Гипотетических моделей о распределении случайных параметров воздействия и восприимчивости (с использованием модели превышения воздействия и восприимчивостью).

2) Теоретических моделей с рассмотрением интенсивностей предпосылок происшествия, простейшей и часто применяемой из которых является экспоненциальная зависимость вероятности возникновения предпосылки (аналог «экспоненциального закона» надежности).

3. Типовые примеры построения возможностной функции происшествия

Для элементарных логических функций, п.2, на основании правил п.1.2 построим следующие их возможностные формы функции происшествия.

$$1) y = x_1 \vee x_2; \rightarrow \text{Pos}(y = 1) = \Pi = \max(\pi_1, \pi_2). \quad (13)$$

$$2) y = x_1 \wedge x_2; \rightarrow \text{Pos}(y = 1) = \Pi = \min(\pi_1, \pi_2). \quad (14)$$

$$3) y = x_1 \vee x_2 \wedge x_3 \rightarrow \text{Pos}(y = 1) = \Pi = \max(\pi_1, \min(\pi_2, \pi_3)). \quad (15)$$

$$4) y = (x_1 \vee x_2) \wedge x_3 \rightarrow \text{Pos}(y = 1) = \Pi = \min(\pi_3, \max(\pi_1, \pi_2)). \quad (16)$$

Возможностные меры π_i предпосылок происшествия найдем на основании представления параметров воздействия s и восприимчивости r , как нечеткие величины. Например, для условия (13) получим

$$\pi_1 = \text{Pos}(x_1 = 1) = \text{Pos}(s \geq r). \quad (17)$$

4. Построение факторного параметрического базиса конкретной технической системы

Виды материальных факторов:

- 1 – механический (гравитационный);
- 2 – тепловой (термодинамический);
- 3 – электрический (электромагнитный);
- 4 – радиоактивный (ионизационно-корпускулярный);
- 5 – фооновый (рентгеновское и гамма-излучения);
- 6 – оптический (волны инфракрасного, видимого и ультрафиолетового излучения);
- 7 – химический (реакции горения, восстановления и др.);
- 8 – биологический (бактериологические, физиологические реакции и др.);
- 9 – факторы других видов

Описание каждого **фактора** совокупностью параметров

В физике принята стандартная система единиц измерения физических величин (система СИ), с помощью которой выражают основные и производные виды параметров.

Так, в частности, механический фактор ($t = 1$) описывается следующими основными видами параметров (единицами СИ): **длина**, которую обозначим номером $n = 1$; **масса**, обозначим номером $n = 2$; **время**, номер $n = 3$.

Основные величины (параметры) СИ

1. Длина, l , метр, м
2. Масса, m , килограмм, кг
3. Время, t , секунда, с
4. Сила электрического тока, I , ампер, А
5. Термодинамическая температура, T , Кельвин, $K = T - 273,15$
6. Количество вещества, n , моль
7. Сила света, I , кандела

Дополнительные величины (параметры)

1. Плоский угол, α , рад
2. Телесный угол, Ω , стерадиан

Использование системы СИ позволяет выражать любые (**производные**) параметры любого фактора через основные виды физических величин.

Такие параметры как **энергия**, **мощность** и **плотность мощности**, являющие собой параметры любого фактора, представляются следующими размерностями:

$$Дж = м^2 \cdot кг \cdot с^{-2}; Вт = м^2 \cdot кг \cdot с^{-3}; Вт/м^2 = кг \cdot с^{-3}$$

Условно говоря, в описании энергии и мощности любого фактора участвуют виды **базовых** параметров с **номерами** 1, 2 и 3. Значит, по сочетанию и количественному выражению (размерности) номеров параметров можно формально судить о содержательности любого фактора.

Аналогично можно формализовать **любой** другой производный параметр **любого** фактора.

Универсальный и производный факторный параметрический базис (ФПБ) системы

Введенные множества и операции над ними представляют собой выраженные в **универсальной** форме **факторный параметрический базис** системы “ПОО – СМЗ – ОВФ”:

$$УФПБ = \langle V, F, R, M, T, L, K, SM \rangle, \quad (18)$$

где SM – совокупность операций алгебры множеств и операций

$$ПФПБ = \langle V^I, F^I, R^I, M_I, T, L, K, SM \rangle \quad (19)$$

5. Определение вероятности и возможности (нечеткой меры) на основе параметрической модели «воздействие – восприимчивость»

5.1. Вероятностная модель "воздействие s - восприимчивость r "

Нормальное распределение, также называемое распределением Гаусса — распределение вероятностей, которое в одномерном случае задается функцией плотности вероятности, совпадающей с функцией Гаусса:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}, \quad (20)$$

где параметр μ — математическое ожидание (среднее значение), медиана и мода распределения,

а параметр σ — стандартное отклонение (σ^2 — дисперсия) распределения.

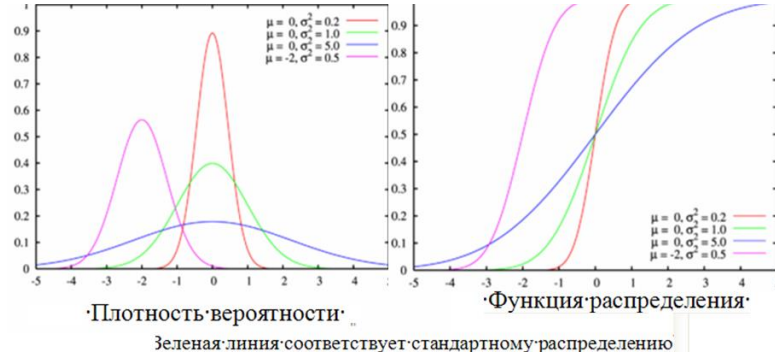


Рисунок 1. График плотности и функции нормального распределения вероятности случайной величины

Вероятность выполнения элементарной предпосылки ($x = 1$) определяется на основе вероятности выполнения условия **превышения** воздействия s над восприимчивостью r

$$\text{Pro}(x = 1) = \text{Pro}(s \geq r) = 1 - \Phi(u) = 0.5 \operatorname{erfc}(u) \quad (21)$$

$$u = (\mu_r - \mu_s) / (\sigma_r^2 + \sigma_s^2)^{0.5} \quad (22)$$

Дополнительная функция ошибок, обозначаемая $\operatorname{erfc}(u)$

(Далее предполагается замена переменных: x на u).

$$\operatorname{erfc} x = 1 - \operatorname{erf} x = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^{\infty} e^{-t^2} dt \quad (23)$$

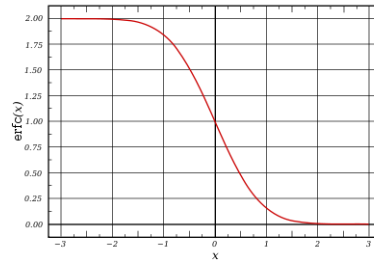


Рисунок 2. График дополнительной функции ошибок $\operatorname{erfc}(u)$

5.2. Возможностная (нечеткая) модель "воздействие s - восприимчивость r "

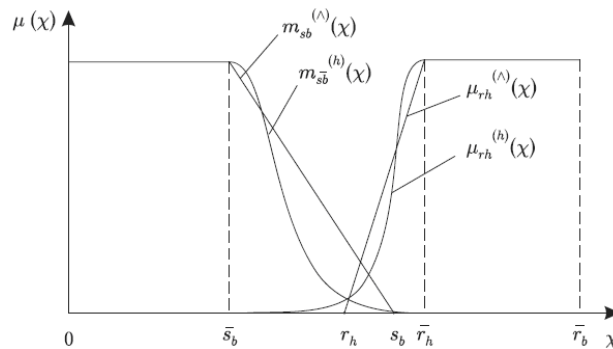


Рисунок 3. Линейная (л) и нормальная (h) аппроксимации нечеткой параметрической модели "воздействие s - восприимчивость r "

области для ядер нечетких величин s, r , обозначаемых в виде:

$$\bar{s} \in [0, \bar{s}_h], \quad \bar{r} \in [r_b, \bar{r}_h];$$

области для носителей этих величин на уровне их α -среза [11], рис. 3.8:

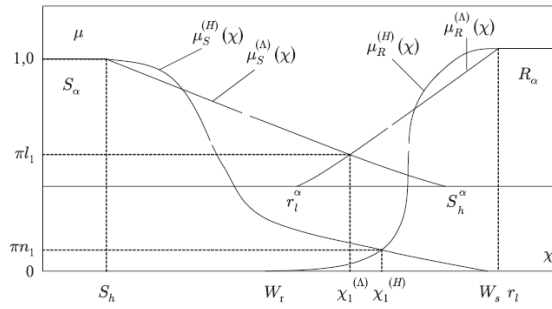


Рисунок 4. К выводу ВМ для линейной и нормальной аппроксимаций "воздействие s - восприимчивость r "

Возможностные меры (ВМ) π_i предпосылок происшествия найдем на основании представления параметров воздействия s и восприимчивости r , как нечеткие величины. Например, для условия $(x_l = 1)$ получим

$$\pi_l = \text{Pos}(x_l = 1) = \text{Pos}(s \geq r). \quad (24)$$

На основании [Есипов, Самсонов, Черемисин], принимая допущение о линейной аппроксимации нечетких параметров (в *наименее* информативном варианте их получения) запишем

$$\pi_l = 1 - \bar{z}b, \quad (25)$$

где $\bar{z}b$ – называемый «приведенный запас» безопасности

$$\bar{z}b = (\bar{r} - \bar{s}) / (\Delta_r + \Delta_s), \quad (26)$$

в котором \bar{r} и \bar{s} – соответственно, «ядра» нечетких параметров восприимчивости r и воздействия s ; а Δ_r и Δ_s – «интервалы размытости» нечетких параметров восприимчивости r и воздействия s .

При гауссовой аппроксимации нечетких параметров ВМ происшествия можно найти по формуле

$$\pi_l^N = \exp(-k_e \cdot \bar{z}b^2), \quad (27)$$

где k_e коэффициент «нормальной» размытости, со значениями 4,5; 8; 12,5, которым соответствует уровень (квантиль) доверия $1 - v$: 0,9968; 0,999968; 0,9999997.

Кроме того, значение π^N можно получить по графику, рисунок 5.

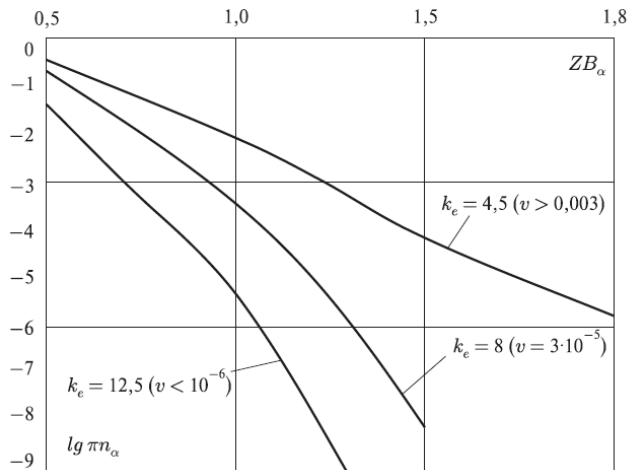


Рисунок.5 Расчетные зависимости возможностной меры π^N в функции от приведенного запаса безопасности $\bar{z}b$ и уровня различимости при гауссовой аппроксимации нечетких параметров

6. Приложение рассмотренных правил и моделей к задачам установления количественных показателей безопасности и риска технических систем

6.1. Алгоритм определения показателей безопасности технической системы

Для конкретной технической системы «объект – защита – среда – человек» выбрать вершинный исход, установить его предпосылки, построить лингвистическую модель реализации вершинного исхода, построить логическую модель с учетом, по возможности, полного набора связей предпосылок, для каждой предпосылки построить параметрическую модель её реализации на основе модели «воздействие – ослабление – восприимчивость» и на основе выбора (обоснования) для неё производных параметров, с учетом проведения инженерной экспертизы взятой технической системы ТС1 в рамках (терминах) модели «воздействие – ослабление –

восприимчивость» составить таблицы значений «ядер» и интервалов «размытости», рассчитать возможные меры реализации элементарных предпосылок, построить возможностную форму функции реализации вершинного исхода (функцию связности элементарных предпосылок), подставить в неё возможные меры реализации элементарных предпосылок и получить итоговый результат в виде значения ВМ возникновения вершинного исхода в конкретно рассматриваемой ТС1.

6.2. Рассмотрение задачи на конкретном примере.

Пример.

1. Комплексный анализ условий труда в сепараторно–роликовом цехе (СРЦ)

Сепараторно – роликовый цех (СРЦ) представляет собой помещение с бетонным покрытием, естественным и искусственным освещением, рисунок 1.

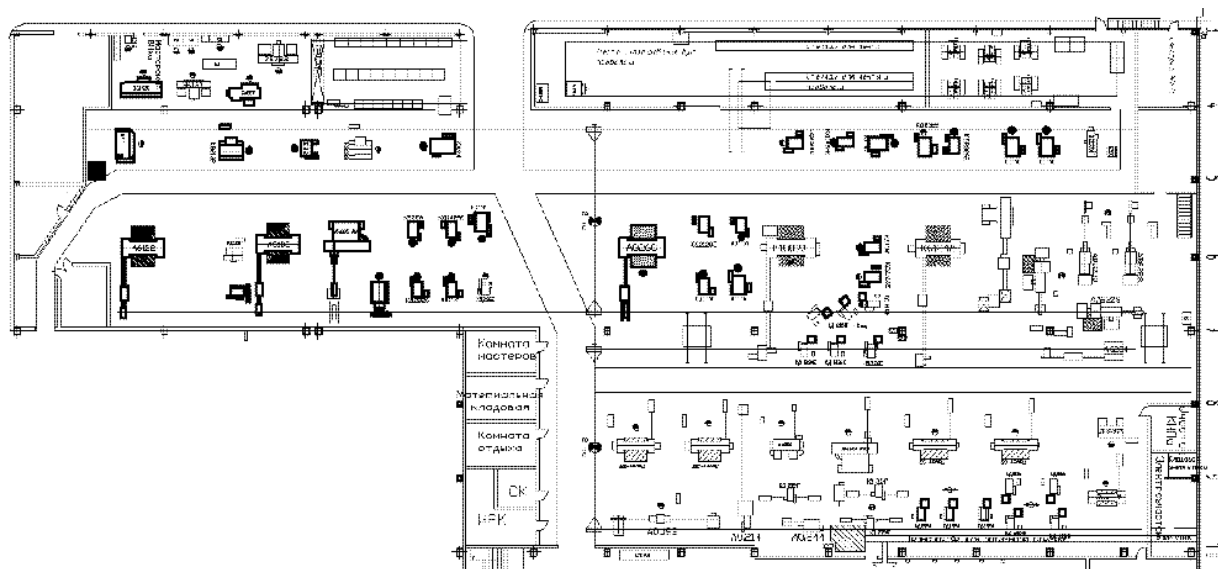


Рисунок 6. Участок изготовления сепараторов

Из анализа карт аттестации данные для комплексной оценки фактического состояния условий труда на рабочих местах цеха, рисунок 1, сведен в Таблицу 1. На участке изготовления сепараторов фактором повышения работоспособности является соблюдение обновленного режима труда и отдыха, сокращенный рабочий день, дополнительные перерывы.

Таблица 1

Параметры производственных факторов участка изготовления сепараторов

Наименование производственного фактора	ПДУ, допустимый уровень	Фактический уровень	Относит. уровень
Температура, $T^{\circ}C$	15-21	15.4	< 1
Относительная влажность, $\varphi\%$	15-75	68	< 1
Скорость воздуха, $v, м/с$	0.4	0.15	< 1
Освещенность, $E, лк$	200	34	3.5
Уровень шума, $I, дБ$	60	75	1.25
Плотность мощности ЭМИ, $P_{эми}, Вт/м^2$	1	3	3
Доза ИИ, $D, мкЗв$	15	12	< 1
Производственная пыль, $N_{II}, мг/м^3$	1	1.6	1.6
Концентрация оксида углерода $N_{CO}, мг-моль/м^3$	5	6	1.2
Концентрация диоксида азота $N_{NO}, мг-моль/м^3$	0.2	0.4	2
Тепловое излучение, $P_{ти}, Вт/м^2$	140	300	2.1

Таблица 2 Результаты измерения и расчета интенсивности шума на участке РСЦ

	1000 Гц	2000 Гц
$L_1, дБ$	85	82
$L_2, дБ$	88	84
$L_3, дБ$	86	82
$L_{сум}, дБ$	92	87
$L_{доп}, дБ$	80	78

Как следует из Таблицы 2, значения уровня шума превышают допустимые на 30 – 40 дБ.

2. Расчет показателя эффекта суммации

Из таблицы 1 «Параметры производственных факторов участка изготовления сепараторов» выберем те номера i факторов, относительный уровень ($n / ОБУВ$), которых больше единицы. В результате сформируем таблицу 3, позволяющую дифференцированно провести расчет слагаемых и результирующее значение показателя эффекта суммации для участка изготовления сепараторов.

Таблица 3 Исходные данные для комплексной оценки условий труда на участке сепараторно-роликового цеха

№ фактора	Наименование производственного фактора	ПДУ, допустимый уровень	Фактический уровень	Относительный уровень или ПЭС ₁
1	Освещенность, Е, лк	200	34	3.5
2	Уровень шума, I, дБ	60	75	1.25
3	Плотность мощности ЭМИ, $P_{ЭМИ}$, Вт/м ²	1	3	3
4	Производственная пыль, N_{II} , мг/м ³	1	1.6	1.6
5	Концентрация оксида углерода N_{CO} , мг·моль/м ³	5	6	1.2
6	Концентрация диоксида азота N_{NO} , мг·моль/м ³	0.2	0.4	2
7	Тепловое излучение, $P_{ти}$, Вт/м ²	140	300	2.1
I	Комплекс факторов $I = \{1 \dots 7\}$	1	> 1	ПЭС _{изл} + ПЭС _{мк} = 7.75+6.9 = 14.6

Как следует из Таблицы 3, при расчете результирующего значения показателя эффекта суммации выявлены две группы вредных факторов, а именно факторы излучений и микроклимата. Раздельный расчет показателей эффекта суммации для этих групп дал следующий результат:

ПЭС_{изл} = 7.75, ПЭС_{мк} = 6.9, ПЭС₁ = 14.6.

3. Пример комплексной оценки заболеваний работников на участке СРЦ на основе возможностной мер предпосылок

Достоверный прогноз заболеваний работников основан на 1) применении эффективных способов и средств защиты (коллективных и индивидуальных) и 2) на статистических данных о пропусках рабочих дней по болезни.

При этом имеется следующее противоречие.

Каждый работник перед заболеванием находился в комплексе факторов рабочих и вредных условий.

Врач ставит диагноз о заболевании по интегральному показателю: ОРЗ, профессиональная болезнь и т. д.

Санитарно-гигиенические нормы и ПДУ (выраженные значениями параметров факторов) заданы на основе исследований и дифференцированных оценок параметров восприимчивости людей к действию отдельных факторов рабочей среды.

Как следствие, имеют место ошибки в принятии решений об обосновании организационно-технических мер безопасности и о выборе способов и средств защиты работников конкретно взятых производственных участков.

Здесь предлагается следующий вариант учета влияния комплекса факторов на здоровье работников.

1) Построение факторных дифференциальных и интегральных критериев предпосылок заболеваний на основе параметрической модели «воздействие - восприимчивость».

2) Построение логической функции связности предпосылок заболеваний.

3) Расчет как дифференциальных, так и интегральных возможностных мер предпосылок заболеваний.

4) Расчет ВМ типовых заболеваний (ОРЗ, профессиональная болезнь и т. д.) по расчетным дифференциальным или интегральным ВМ предпосылок заболеваний.

5) Сравнительный анализ полученных оценок и формирование плана предупредительных мероприятий.

Таблица 4. Данные расчета возможностной меры дифференциальной предпосылки заболеваний работников на участке

№ фактора	Наименование производственного фактора	ПДУ, допустимый уровень параметр восприимчивости	Фактический уровень или параметр воздействия	Запас безопасности/ ВМ в линейной аппроксимации
1	Освещенность, Е, лк	200-350, Δ=150	130, Δ=100	0.28/0.72
2	Уровень шума, I, дБ	60, Δ=10	75, Δ=20	0.5/0.5
3	Плотность мощности ЭМИ, $P_{ЭМИ}$, кВт/м ²	1, Δ=3	3, Δ=1	0.5/0.5
4	Производственная пыль, N_{II} , мг/м ³	1, Δ=5	1.6, Δ=3	0.075/0.925
5	Концентрация оксида углерода N_{CO} , мг·моль/м ³	5, Δ=5	6, Δ=5	0.1/0.9
6	Концентрация диоксида азота N_{NO} , мг·моль/м ³	0.2, Δ=0.2	0.4, Δ=0.2	0.5/0.5
7	Тепловое излучение, $P_{ти}$, Вт/м ²	140, Δ=100	180, Δ=10	0.36/0.64
I	Комплекс факторов $I = \{1 \dots 7\}$			

С точки зрения организационно-технических мер безопасности и при выборе способов и средств защиты такой дифференцированный подход оказался экономически эффективным. Раздельно может быть произведен расчет и могут быть модифицированы следующие

системы защиты, к которым относятся системы: 1) освещения; 2) экранирования шума и вибрации; 3) вентилирования; 4) теплоизоляции.

4. Описание и количественная интервальная оценка параметров условий труда, как параметров воздействия на работников

Таблица 5

i	булево условие	параметрическое условие	приведенный запас, $\bar{z}b = (\bar{r} - \bar{s})/(\Delta_r + \Delta_s)$	возможностная мера, $\pi^{L_i} = 1 - \bar{z}b$; $\pi^{G_i} = \exp(-k_e \cdot \bar{z}b^2)$
1	$z_1 = 1$	$n_{\text{пг}} \geq \text{ПДК}_{\text{пг}}$		
2	$z_2 = 1$	$n_{\text{о2}} \geq 15\%$		
3	$z_3 = 1$	$q \geq 1 \text{ кВт} \cdot \text{м}^{-2}$		
4	$z_4 = 1$	$T \geq 70^\circ \text{C}$		

4.1. Установление и количественная интервальная оценка параметров заболевания дыхательных органов работника с исходами: удушье; воспаление органов дыхания

4.2. Построение структурно-логической модели вершинного исхода (функции связности предпосылок) с учетом двух предпосылок заболевания

$$y = y_1 \vee y_2; \quad y_1 = z_1 \vee z_2; \quad y_2 = z_3 \wedge z_4 \Rightarrow \quad y = z_1 \vee z_2 \vee z_3 \cdot z_4$$

$$\pi_c = \text{Pos}(y=1) = \max(\pi_{y_1}, \pi_{y_2}) = \max(\pi_{z_1}, \pi_{z_2}, \min(\pi_{z_3}, \pi_{z_4}))$$

4.3. Расчет возможностных мер предпосылок отравления и длительности пребывания на основании нечеткой параметрической модели «воздействие – восприимчивость».

$$\begin{aligned} y_1 &= z_1 \vee z_2 \vee 1 \\ y_2 &= z_3 \cdot z_4 \cdot 0 \\ y_3 &= z_1 \vee z_2 \vee (z_1 \cdot z_3 \cdot z_4 \vee z_2) \\ y &= z_1 \vee z_2 \vee z_3 \cdot z_4 \end{aligned}$$

Комплексное задание по дисциплинам СА ТП и ААК

При анализе условий труда работников эксперт определил четыре раздельного действия опасных и вредных фактора: механический – 1; тепловой – 2; химический – 3, физический – 4 и оптический – 5, а также комплексный производственный фактор, выражаемый Показателем Эффекта Суммации (ПЭС), см. Таблицу 1.

Таблица 1. Сводная таблица исходных данных и промежуточных результатов оценки показателей (для расчета ВМ элементарных предпосылок π^{L_i})

№ п/п (x_i)	Производный фактор	Параметр восприимчивости (пороговое значение)	Запас безопасности $\bar{z}b$	Возможностная мера π^{L_i}
1	Освещенность, Е, лк		1.5	
2	Уровень шума, I, дБ		1.3	
3	Динамический удар осколков от механического оборудования, энергия А, Дж.		2	
4	Плотность мощности ЭМИ, $P_{\text{эми}}$, Вт/м ²		2.1	
5	Производственная пыль, $N_{\text{п}}$, мг/м ³		1.7	
6	Концентрация оксида углерода $N_{\text{со}}$, мг·моль/м ³		1.4	
7	Концентрация диоксида азота $N_{\text{но}}$, мг·моль/м ³		1.9	
8	Тепловое излучение, $P_{\text{ти}}$, Вт/м ²		2	
9	Комплексный производный фактор ПЭС	≤ 3	1.5	
10	Скорость воздуха, v , м/с		3	

Учебные варианты 1 ... 10 составленных экспертом логических моделей $\{y_1, y_{10}\}$ заболевания (происшествия) от выявленных им предпосылок x_i , первая колонка таблицы 1 имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} y_1 &= x_1 \vee x_2 \wedge x_3; \quad y_2 = (x_4 \vee x_5) \wedge x_6; \quad y_3 = x_7 \vee x_8 \wedge x_9; \quad y_4 = (x_3 \vee x_5) \wedge x_{10}; \\ y_5 &= (x_1 \vee x_2) \wedge x_4; \quad y_6 = x_4 \vee x_7 \wedge x_6; \quad y_7 = (x_9 \vee x_7) \wedge x_{10}; \quad y_8 = x_1 \vee (x_2 \wedge x_3) \wedge x_4; \\ y_9 &= (x_5 \vee x_6) \wedge (x_7 \wedge x_8); \quad y_{10} = (x_9 \vee x_2) \wedge x_{10} \end{aligned}$$

Требуется для заданного варианта по значению **возможностной меры заболевания работника** оценить фактический уровень безопасности или вредности (опасности) условий труда и разработать предложения по созданию условий труда, соответствующим 2 классу.

УДК 620.179; 531.7

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ЗОН РИСКА СЛОЖНОЙ СИСТЕМЫ НА ОСНОВЕ КРИТЕРИЯ «ВОЗДЕЙСТВИЕ – ВОСПРИИМЧИВОСТЬ»**MODELLING AND VISUALIZATION OF ZONES OF RISK OF SOPHISTICATED SYSTEM ON THE BASIS OF CRITERION «INFLUENCE - THE SUSCEPTIBILITY»**

Есипов Ю.В., Горшкова Ю.В., Шишкин Р.И.

Учреждение Российской академии наук Южный научный центр РАН
Работа проводилась в рамках грантов РФФИ 06-08-01259а и 09-08-00437а

Введение. Концепция факторного параметрического моделирования и возможностного (нечеткого) оценивания показателей риска [1,2] заключается в построении формального множественного базиса с нечеткой алгеброй и нечеткими множествами факторов и параметров воздействия, преобразования (ослабления) и восприимчивости [3,4]. Ключевой моделью, на основе которой определяются как качественные предпосылки происшествий, так и количественные показатели (меры определенности) реализации происшествий в системе (показатели риска системы), является параметрическая модель превышения воздействия (нагружения) над восприимчивостью (несущей способностью). В теории живучести и стойкости такую параметрическую модель называют «физическим законом поражения» [5-7]. В концепции оценки риска [1,2] в качестве параметров воздействия и восприимчивости принимаются основные и производные единицы системы физических величин СИ. Если применить известные методы преобразования из «физического закона» в «координатный закон поражения» [5,7] и выразить процессы воздействия и восприимчивости внутри системы не в качестве отдельных физических величин, а в форме факторного параметрического базиса [2,3], то могут быть решены задачи: а) снижения размерности модели безопасности системы; б) визуализации зон риска; в) упрощения представления «гиперкуба» опасности [1,2] как геометрической модели ФПБ системы.

Постановка задачи.

В самом общем виде прямое и обратное преобразования из параметрической, например $f_s(p)$, в пространственную $\varphi_s(r)$ форму, можно описать зависимостями

$$s = f_s(p), \quad r = f_r(p); \quad (1)$$

$$p = \varphi_s(s), \quad p = \varphi_r(r), \quad (2)$$

где s и r – соответственно параметры воздействия и восприимчивости [1,2],

p – полярный радиус в цилиндрической системе координат.

В теории оценки стойкости (живучести) типичным примером зависимости $s = f_s(p)$ является зависимость избыточного давления во фронте ударной волны ΔP_Φ от расстояния между источником (l) взрыва и объектом (k) поражения при её распространении в пространстве (на местности). С другой стороны, в этом примере зависимость $r = f_r(p)$ описывает зависимость показателя стойкости $\Delta P_\Phi^{\text{пр}}$ приемника k (объекта поражения) от расстояния до источника l .

При этом аналитическую зависимость вероятности поражения

$$p = \text{Pro}(\Delta P_\Phi \geq \Delta P_\Phi^{\text{пр}}) \quad (3)$$

называют «физическим законом поражения», а зависимость

$$p = \text{Pro}(p(\Delta P_\Phi) \geq p(\Delta P_\Phi^{\text{пр}})) \quad (4)$$

– «координатным законом поражения».

Предположим, что преобразования (1,2) производятся по каждому из видов действующего фактора (механическому, тепловому, химическому и т. д.), входящих в состав факторного параметрического базиса ФПБ [1,2].

Требуется, по известному факторному параметрическому базису конкретной системы (ФПБ1) построить её пространственный факторный базис (ПФБ1) и на его основе решить задачу о моделировании и визуализации зон риска системы «защита (каналы распространения и ослабления) – объект (конструкция и потенциально опасные элементы) – среда (источники внешних воздействующих факторов)».

Решение. Для установления меры возможности π возникновения происшествия в конкретной системе производят построение её факторного параметрического базиса (ФПБ1) и используют параметрическую модель вида [1,2] «нечеткое воздействие s – нечеткая восприимчивость r », где множества – носители S_α и R_α этих нечетких параметров выражают через ядра \bar{s} , \bar{r} и пределы размытости s_{h^α} , r_{h^α} на уровне α – среза, рисунок 1:

$$R_\alpha = \{ \chi | \chi \in X, \mu_R(\chi) \geq \alpha : \bar{r}_l^\alpha, \bar{r}_h^\alpha \}; \quad (5)$$

$$S_\alpha = \{ \chi | \chi \in X, \mu_s(\chi) \geq \alpha : \bar{s}_l^\alpha = 0, \bar{s}_h^\alpha, s_{h^\alpha} \}; \quad (6)$$

$$\bar{s} \in [0, \bar{s}_h], \quad \bar{r} \in [r_l, \bar{r}_h]. \quad (7)$$

При этом возможностную меру π возникновения происшествия в этой системе в общем виде устанавливают на основании критериальной зависимости

$$\pi = \text{Pos}(S_\alpha \geq R_\alpha), \quad (8)$$

где $\text{Pos}(\cdot)$ – от англ. possibility, оператор нечеткой (возможностной) меры.

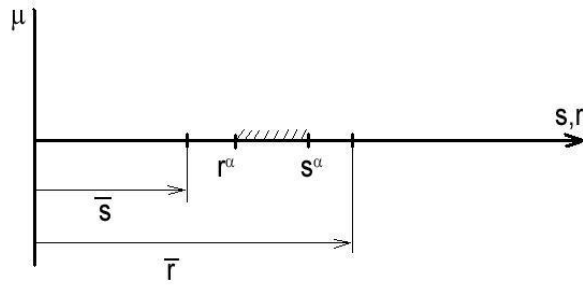


Рисунок 1. Модель «нечеткое воздействие s – нечеткая восприимчивость r »

В *линейной* аппроксимации функций принадлежности нечетких параметров s и r на уровне α -среза, возможностная мера π_α происшествия есть отношение длины интервала пересечения $[r^\alpha, s^\alpha]$ носителей к сумме длин областей размытости $(\Delta_s^\alpha + \Delta_r^\alpha)$ [2, формула (3.79)]:

$$\pi_\alpha = (s^\alpha - r^\alpha) / (\Delta_s^\alpha + \Delta_r^\alpha) = 1 - zb / (\Delta_s^\alpha + \Delta_r^\alpha) = 1 - \bar{z}b_\alpha, \quad (9)$$

где длины «практических» областей размытости определяются по зависимостям:

$$\Delta_s^\alpha = s^\alpha - s_h, \quad \Delta_r^\alpha = r_l - r^\alpha \quad (10)$$

Параметры $zb = r_l - s_h$ и $\bar{z}b_\alpha = zb / (\Delta_s^\alpha + \Delta_r^\alpha)$ называются, соответственно, абсолютный и приведенный параметрические «запасы безопасности».

Рассмотрим решение задачи в плоской геометрической модели, рисунок 2. Пусть на основании зависимостей (1,2) через полярный радиус ρ , как нечеткий универсальный параметр, можно выразить ядра и области размытости (7,10) параметров воздействия и восприимчивости следующим образом:

$$(\bar{s} \rightarrow \rho_l), (\bar{r} \rightarrow \rho_k), (\Delta_s^\alpha \rightarrow \Delta_l), (\Delta_r^\alpha \rightarrow \Delta_k), \quad (11)$$

где ρ_k и ρ_l – соответственно, ядра нечетких полярных координат (радиусов поражения), через которые выражаем восприимчивость приемника k и воздействие источника l ;

Δ_k и Δ_l – погрешности представления параметров восприимчивости и воздействия (интервал различимости носителя нечеткого параметра по уровню различимости α), определяемые следующим образом:

$$\Delta_k = \rho_k^\alpha - \rho_k; \quad \Delta_l = \rho_l^\alpha - \rho_l \quad (12)$$

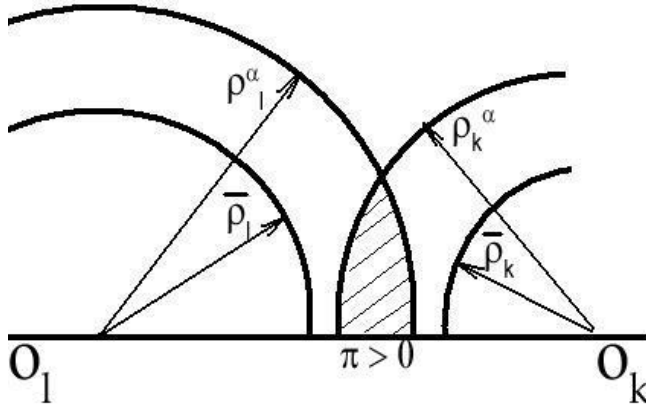


Рисунок 2. Параметрическая модель «нечеткое воздействие s от источника (l) – нечеткая восприимчивость r приемника (k)» в цилиндрических координатах, где O_l и O_k , соответственно координаты источника и приемника

Обозначим d – расстояние между приемником и источником воздействия,

$$d = |O_l O_k| \quad (13)$$

Если в (9) произвести замену переменных: $r = (\rho_k - d)$ и $s = \rho_l$, тогда с учетом (11,12) получим зависимость возможностной меры при линейной аппроксимации нечетких параметров ρ_k и ρ_l

$$\pi = 1 - (d - \rho_k - \rho_l) / (\Delta_k + \Delta_l) \quad (14)$$

Полученное выражение (14) есть результат преобразования «физической модели» происшествия в «координатную», где нечеткие параметры восприимчивости и воздействия в пространственном факторном параметрическом базисе выражены через ядра и различимые радиусы зон восприимчивости и воздействия.

Применение зависимости (14) позволяет снизить размерность задачи анализа опасности системы и упростить визуализацию зон риска. Кроме того, для наглядности на плане (карте) местности системы все предпосылки к происшествию в виде пересечения областей воздействия и восприимчивости можно было выделить следующим образом:

А) $\pi = 0$ – предпосылки к происшествию нет, пересечения множеств ρ_k^α и ρ_l^α нет;

Б) $\pi \leq 0,5$ – имеются предпосылки к происшествию, они геометрически интерпретируются пересечением множеств ρ_k^a и ρ_l^a , возможностная мера реализации которого оценивается в интервале от 0 до 50 (%);

В) $\pi \geq 0,5$ – геометрическая интерпретация в виде пересечения множеств ρ_k^a и ρ_l^a , при которых мера возможности возникновения предпосылки к происшествию оценивается выше от 50%.

Рассмотрение полученных результатов на примерах.

Пример 1. Рассмотрим систему, содержащую один источник и один приемник воздействия. Пусть пространственные параметры модели происшествия связаны между собой следующими отношениями: $\Delta_l = 4 \cdot \Delta_k = 0.4d$; $\rho_l^a = 0.5d$; $\rho_k^a = 0.2d$. Требуется определить возможностную меру возникновения происшествия с одновременной визуализацией его на плане системы.

Подставив исходные данные задачи в зависимости (12) и (14), соответственно получим:

$\rho_k^a = 0.3d$, $\rho_l^a = 0.9d$; $\pi = 1 - (d - 0.2d - 0.5d)/(0.5d) = 0.4$, вариант (Б).

Пример 2. Рассмотрим Западную промышленную зону в составе 1) нефтебазы «Ростов-Терминал» и 2) Ростовской–на–Дону «Газонапорной станции». Расстояние между центрами двух объектов составляет $d = 800$ м. Получены следующие результаты предварительной экспертизы этих объектов (1, 2) по тепловому и механическому факторам в виде оценок параметров воздействия, возникающего при инициировании каждого объекта, и параметров их восприимчивости:

$\Delta_1 = 807$ м, $\rho_1 = 55$ м; $\Delta_2 = 60$ м, $\rho_2 = 25$ м.

Требуется оценить и визуализировать опасность возникновения пожара в системе.

Решение примера 2. Из анализа экспертных данных следует, что в этой системе реализация происшествия возможна, если объект (1) – источник, а объект (2) – приемник параметров воздействий, поскольку только $\Delta_1 + \rho_1 > d$. Подставляя исходные данные в зависимости (12) и (14) получим

$\rho_1^a = 862$ м, $\rho_2^a = 85$ м; $\pi = 1 - (800 - 55 - 25)/(867) \approx 0.17$, вариант (Б).

Таким образом, инициирование пожара в газонапорной станции возможно с мерой 0.17, при условии возникновения пожара на нефтебазе «Ростов-Терминал». Для увеличения безопасности рассматриваемой системы требуется снизить меру определенности π^c_1 возникновения пожара на нефтебазе «Ростов-Терминал» с учетом действия внешних (е), не рассмотренных в данной задаче, негативных факторов. Поэтому с учетом соотношения π и π^c_1 возможны следующие варианты при оценке возможностной меры π_{TC} происшествия в системе:

1) $\pi_{TC} = \pi$, если $\pi^c_1 > \pi$;

2) $\pi_{TC} = \pi^c_1$.

Например, во втором варианте при $\pi^c_1 = 10^{-4} = \pi_{TC}$.

Заключение. На основании развития физических и координатных представлений поражения разработана пространственная параметрическая модель и критерии для определения возможностной меры реализации предпосылок происшествий, которые позволяют наглядно демонстрировать степень опасности (безопасности) сложной системы в составе нескольких объектов. Рассмотрены упрощенные и визуальные подходы к количественному выражению опасности сложной технической системы.

Литература

1. Есипов Ю.В. Моделирование опасностей и установление меры определенности происшествия в системе // Проблемы машиностроения и надежности машин. № 3. 2003. с. 112-117.
2. Есипов Ю.В., Самсонов Ф.А., Черемисин А.И. Мониторинг и оценка риска систем «защита – объект – среда» // М.: ЛКИ. 2008. 136 с.
3. Есипов Ю.В. Возможностная оценка отказов в нечеткой системе «факторы – объект» // Автоматика и вычислительная техника. 2002. № 1. с. 14-23.
4. Есипов Ю.В. Метод возможностной (нечеткой) оценки риска сложных технических систем (глава 6 в монографии) // Безопасность России. Анализ риска и проблем безопасности // Воробьев Ю.Л., Лавров Н.П., Махутов Н.А., Осипов В.И., Фалеев М.И., Фролов К.В., Шойгу С.К. В 4-х частях. Ч.1-2; Ч.3-4. МГФ «Знание». 2006, 2008. с.278-291.
5. Безопасность России. Правовые, социально-экономические и научно-технические аспекты. Изд. В 6 томах. Под общей редакцией К.В. Фролова и Н.А. Махутова // Том 1. М.: МГФ «Знание», 1998. – 448 с.; Том 2. Часть 2. М.: МГФ «Знание», 2003. – 624 с.
6. Махутов Н. А. Развитие и применение методов управления риском в задачах обеспечения техногенной безопасности и технического регулирования // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. М.: ВИНТИ. 2006. № 1. с. 35-50.
7. Аварии и катастрофы. Предупреждение и ликвидация последствий. Учебное пособие в 5-ти книгах. Книга 2. В.А. Котляревский, А.В. Виноградов. М.: Издательство Ассоциации строительных ВУЗов. 1996. 384 с.
8. Есипов Ю.В., Мишенькина Ю.С. К проблеме построения комплексного параметрического критерия безопасности сложных систем // Вестник Южного научного центра. Т.4. №3. стр. 16-22.

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ЗОН РИСКА СЛОЖНОЙ СИСТЕМЫ НА ОСНОВЕ КРИТЕРИЯ «ВОЗДЕЙСТВИЕ – ВОСПРИИМЧИВОСТЬ»

Есипов Ю.В., Горшкова Ю.В., Шишкин Р.И.

Южный научный центр РАН

Аннотация

На основе развития физического и координатного представлений поражения объектов разработана пространственная параметрическая модель определения возможностной меры реализации предпосылок происшествий, которая позволяет наглядно демонстрировать степень опасности (безопасности) системы. Разработан визуальный подход к количественному выражению опасности технической системы.

MODELLING AND VISUALIZATION OF ZONES OF RISK OF SOPHISTICATED SYSTEM ON THE BASIS OF CRITERION «INFLUENCE - THE SUSCEPTIBILITY»

Esipov Yuriy Veniaminovich, Gorshkova Yliya Viktorovna, Shishkin Roman Igorevich

Southern centre of science of the Russian Academy of Sciences

Abstract.

In basis of development of physical and coordinate representations the space parametrical model for definition of possibility measure of precondition incident realization are offered. This approach allow evident to demonstrate of dangerous (safety) degree system. The visual approach in quantitative expression of technical system risk are considered.

Подписи к рисункам:

Рисунок 1. Модель «нечеткое воздействие s – нечеткая восприимчивость r »

Рисунок 2. Параметрическая модель «нечеткое воздействие s от источника (l) – нечеткая восприимчивость r приемника (k)» в цилиндрических координатах, где O_l и O_k , соответственно координаты источника и приемника

УДК 620.179; 531.7

РАЗРАБОТКА ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСНОГО
КРИТЕРИЯ ПРОИСШЕСТВИЙ НА ПРИМЕРЕ СИСТЕМЫ
«ГАЗОВОЗДУШНАЯ СМЕСЬ – ФАКТОРЫ ИНИЦИИРОВАНИЯ»

Ю.В. Есипов, Ю.С. Мишенькина

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, грант 06-08-01259

Представлены результаты описания комплексного характера возникновения происшествий и разработки параметрического комплексного критерия инициирования газовой-воздушной среды в газовой коммуникационной системе. На примерах анализируются возможные ошибки в оценке показателей безопасности и риска потенциально опасной системы при моделировании одномерных и комплексных предпосылок опасности.

Ключевые слова. Безопасность, предпосылки пожара, критерии оценки риска.

Введение. В настоящее время в процесс проектирования и анализа сложных технических систем введены элементы вероятностной оценки безопасности и риска [1-4]. Однако полноценное применение логико-вероятностного метода затруднено из-за подбора исходных данных в форме вероятностей иницирующих событий [2]. Вследствие этого, применение известных методологий для количественной оценки безопасности может привести или к недооценке угроз, или к неоправданно высоким затратам на обеспечение безопасности. Кроме того, как правило, все разработанные методики носят однопараметрический характер. Произошедшая недавно в России серия аварий и взрывов на газовых коммуникациях жилых домов и обслуживающих предприятий указали на слабую эффективность профилактической и прогностической деятельности, как специалистов, так и рабочего персонала.

Вследствие этого, как в методическом, так и практическом аспектах, задача разработки методов количественного анализа и оценки свойства «безопасность – опасность» и риска сложных технических систем (СТС) вида «газовые коммуникации – негативные факторы – средства и мероприятия защиты – человек – окружающая среда» в настоящее время не решена и является актуальной.

В условиях, как правило, малой статистики и сложности связей относительно выявленных предпосылок происшествий в технической системе, такая система может рассматриваться как «уникальная» и для неё показатели безопасности могут быть определены на основе метода факторного параметрического моделирования и возможностной оценки [5,6]. Известно, что повышение достоверности оценки безопасности связано с изучением комплексного характера условий возникновения происшествий и построением комплексных параметрических критериев выявления предпосылок происшествий [1,3,6]. Такой подход позволяет минимизировать ошибку пропуска инициирования происшествия (ошибку второго рода), что важно для систем повышенной опасности.

Постановка задачи. Известно [1,2,8], что в настоящее время показатели риска, как правило, определяются по однопараметрическим моделям и критериям. Рассмотрим условия инициирования газовой-воздушной (метановой) смеси (ГВС), описываемой следующими параметрами: температурой T и концентрацией n ГВС при внесении в нее источника инициирования (например, искры), действующего в течение времени τ и с учетом литературных источников [2,3,7] произведем их качественный физико-химический анализ. Из такого анализа следует, что при определенной длительности $\tau = \tau_1$ иницирование в точке A , рисунок 1, произойдет, если

$$(n > n_1^{cr}) \wedge (T > T_1^{cr}) \text{ при условии, что } \tau \geq \tau_1. \text{ Если же длительность иницирования оказывается меньше, например, } \tau_2 < \tau_1,$$

то иницирование может произойти при гораздо больших температурах (рисунок 1, точка B): $(n > n_1^{cr}) \wedge (T > T_2^{cr})$. Как видно, кривые τ_1, τ_2 на рисунке 1 представляют собой критериальные кривые, разделяющие область (n, T) на подобласти устойчивого равновесия и устойчивого иницирования. При этом следует заметить, что $n^{cr} > 0$ и $T^{cr} > 0$.

Рассмотрим теперь зависимости для концентрации и температуры. Как и в первом случае, эти зависимости можно выразить через критериальные кривые $n = f(\tau, T)$ и $T = f(\tau, n)$, рисунок 2. Как видно из рисунка 2.а, область (T, τ) устойчивого равновесия сужается при возрастании концентрации газа ($n_2 > n_1$) в ГВС. Тогда как из рисунка 2.б следует, что область устойчивого равновесия (n, T) уменьшается при возрастании температуры ГВС ($T_2 > T_1$). Приведенные качественные кривые наглядно демонстрируют взаимозависимость параметров (T, n, τ) относительно начала иницирования.

Таким образом, при рассмотрении возникновения происшествия только от одного, в данном рассмотрении, химического вида фактора, условие иницирования ГВС должно задаваться следующим комплексом условий

$$(T \geq T^{cr}) \wedge (n \geq n^{cr}) \wedge (\tau \geq \tau^{cr}), \quad (1)$$

где T, n, τ – соответственно выражают параметры воздействия, формализуемые в рамках факторного параметрического базиса как $\{S_{\{m\}t=4}\}$; $T^{cr}, n^{cr}, \tau^{cr}$ – параметры восприимчивости к иницированию ГВС, формализуемые как $\{r_{\{m\}t=4}\}$, где m, t – номера видов параметров и факторов в рассматриваемой системе, $t = 4$ – номер химического фактора [5,6], см. также пример 1.

Применение комплексных многопараметрических критериев для описания и выявления происшествий и их предпосылок в системе достижимо [6,8], если найдены границы (области допустимых значений) комплексных показателей восприимчивости

$$r^{(*)}_{\{m\}tk} = \{r^{(*)}_{m=1tk}, r^{(*)}_{m=2tk}, r^{(*)}_{m=3tk}\}. \quad (2)$$

Тогда фрагмент комплексного параметрического критерия иницирования в терминологии факторного параметрического моделирования [5,6] имеет вид

$$(s_{\{m\}112} \geq r_{\{m\}12}) \vee (s_{\{m\}212} \geq r_{\{m\}22}). \quad (3)$$

Если действия однородных факторов источников с номерами, например 2 и 3, происходят одновременно и (или) совместно, то их объединение есть или алгебраическое суммирование, или выражение нормы этих воздействий. В первом варианте:

$$(s_{\{m\}124} + s_{\{m\}134}) \geq r_{\{m\}14}. \quad (4)$$

Если представить параметры воздействия и восприимчивости как нечеткие величины, то мера определенности возникновения иницирования происшествия (пожара) находится в виде возможностной меры [9]

$$\pi = Pos\left((T \geq T^{cr}; n \geq n^{cr}) \left(\tau \geq \tau^{cr} \right) \right). \quad (5)$$

Таким образом, на примере описания инициирования ГВС разработан комплексный критерий выявления предпосылок происшествий, учет которого проявляется как в задании множества значений восприимчивости элементов R_{cr} , формула (2), отличных от одномерных, так и в уточнении характера и значений воздействий относительно выявленных потенциально опасных элементов системы.

Анализ полученных результатов. Задание в качестве порогов начала инициирования, например, (T_1^{cr}, n_1^{cr}) (по условиям стационарности, т.е. постоянного действия иницирующего фактора) приводит к значительному ужесточению требований

безопасности. Как видно из анализа рисунка 1, на самом деле иницирование произойдет при (T_2^{cr}, n_1^{cr}) , где $T_2^{cr} > T_1^{cr}$.

Аналогично, при учете только зависимости (T, τ) или (n, τ) , то есть только температуры (или концентрации), использование табличных значений иницирования [3,4] приводит к ошибкам пропуска происшествия. Например, из рисунков 2.а и 2.б видно, что при одинаковой длительности τ_0^{cr} иницирование возникает на меньших температурах ($T_2^{cr} < T_1^{cr}$), если $n_2 > n_1$.

Следовательно, комплексные критерии выявления предпосылок происшествий позволяют более точно и полно определить показатели безопасности (опасности) системы.

Примеры апробации полученных результатов. На основе построения факторного параметрического базиса системы [5, 10] и рассмотренного здесь комплексного критерия разработан алгоритм расчета как возможностной меры, так и интегрального риска системы, реализация которого представлена в следующих примерах. В первом примере рассматривается подсистема «газораспределительные коммуникации – негативные факторы» и анализируются её показатели безопасности на основе однопараметрического и комплексного критериев. Получены значения интегрального риска в обоих случаях.

Второй пример приводится для сравнительного анализа предложенного метода факторного параметрического моделирования с известным логико-вероятностным методом [2]. Решение по нахождению возможностной меры отказа критического потенциально опасного элемента системы найдено по однопараметрическому и комплексному критерию, с учетом однородных воздействий.

Пример 1. Произведем возможностную оценку риска подсистемы «газораспределительные коммуникации – негативные факторы», представленную на рисунке 3.

По уровню ущерба в системе упорядочены следующие потенциально опасные элементы (ПОЭ), (множество K): 1) конденсатосборник; 2) клапан приемо-запорной коммутации (ПЗК); 3) фильтр; 4) регулятор давления газа; 5) электроприборы; 6) локальный объем помещения, где возможно иницирование горения метановой газо-воздушной смеси.

В качестве критического Cr происшествия выбирается пожар в системе. Сформируем множество видов опасных и вредных факторов TI и множество производных параметров MI :

$TI = \{t = 1 - \text{механический}; t = 2 - \text{тепловой}; t = 3 - \text{электрический}; t = 4 - \text{химический факторы}\}.$

$MI = \{m = 1 - \text{напряжение, } \sigma; m = 2 - \text{давление, } p; m = 3 - \text{температура, } T; m = 4 - \text{количество вещества, } n; m = 5 - \text{плотность электрического тока, } j; m = 6 - \text{длительность, } \tau\}.$

Построим факторный параметрический базис (ФПБ) данной системы [10]. В результате получим подмножество OB , на основании которого построена структурная схема факторных связей источников и приемников – потенциально опасных элементов, рисунок 4.

Для сравнительного анализа комплексного и одномерного критериев выпишем условия иницирования потенциально опасных элементов и образования вторичных факторов в форме производного факторного параметрического базиса в однопараметрической и комплексной форме, как с учетом, так и без учета средств защиты (СЗ). Данные подготовительного этапа, для краткости, приведем только по элементам ПОЭ-2 и ПОЭ-6, таблица 1.

Таблица 1 – Условия иницирования потенциально опасных элементов

№ ПОЭ	Условия иницирования ПОЭ 1 – в физических производных параметрах; 2 – в форме параметров производного ФПБ; 3 – с учетом комплексного критерия
2	<p>1: $(\sigma \geq \sigma_{зан.ар.}) \vee \left((p^{C3(безC3)} \geq p_0) \wedge (T \geq T_0) \wedge (n^{C3(безC3)} \geq n_{расч}) \wedge (\tau \geq \tau_{всн}) \right);$</p> <p>2: $(s_{1102} \geq r_{112}) \vee \left((s_{2432}^{C3(безC3)} \geq r_{242}) \wedge (s_{3432} \geq r_{342}) \wedge (s_{4432}^{C3(безC3)} \geq r_{442}) \wedge (s_{6432} \geq r_{642}) \right);$</p> <p>3: $(s_{1102} \geq r_{112}) \vee \left((s_{2432}^{C3(безC3)} \geq r_{242}^{kp}) \wedge (s_{3432} \geq r_{342}^{kp}) \wedge (s_{4432}^{C3(безC3)} \geq r_{442}^{kp}) \wedge (s_{6432} \geq r_{642}) \right);$</p>
6	<p>1: $((T \geq T_0) \wedge (\tau \geq \tau_0)) \vee ((j \geq j_0) \wedge (\tau \geq \tau_{всн})) \wedge \left((p^{C3(безC3)} \geq p_{расч}) \wedge (T^{C3(безC3)} \geq T_0) \wedge (n \geq n_{расч}) \wedge (\tau \geq \tau_0) \right) \vee ((T \geq T_0) \wedge (\tau \geq \tau_0));$</p> <p>2: $\left((s_{\{3,6\}256} \geq r_{\{3,6\}26}) \vee (s_{\{5,6\}356} \geq r_{\{5,6\}36}) \right) \wedge \left((s_{\{2,3,4,6\}426}^{\tilde{N}Q\hat{a}\hat{a}\hat{c}\tilde{N}Q} \geq r_{\{2,3,4,6\}46}) \vee (s_{\{2,3,4,6\}436}^{\tilde{N}Q\hat{a}\hat{a}\hat{c}\tilde{N}Q} \geq r_{\{2,3,4,6\}46}) \vee (s_{\{2,3,4,6\}446}^{\tilde{N}Q\hat{a}\hat{a}\hat{c}\tilde{N}Q} \geq r_{\{2,3,4,6\}46}) \vee (s_{\{3,6\}206} \geq r_{\{3,6\}26}) \right);$</p> <p>3: $\left((s_{\{3,6\}256} \geq r_{\{3,6\}26}) \vee (s_{\{5,6\}356} \geq r_{\{5,6\}36}) \right) \wedge \left((s_{24\{2,3,4\}6}^{C3(безC3)} \geq r_{246}) \vee (s_{34\{2,3,4\}6}^{C3(безC3)} \geq r_{346}^{kp}) \vee (s_{44\{2,3,4\}6} \geq r_{346}^{kp}) \vee (s_{\{3,6\}206} \geq r_{\{3,6\}26}) \right);$</p>

Выражения (2:) и (3:) в строках Таблицы 1 представляют комплексные критерии иницирования, которые проявляются в задании других значений параметров восприимчивости R_{cr} , отличных от одномерных. Поэтому при критических значениях $T^{kp} < T_0; n^{kp}_{расч} < n_{расч}$ действительное значение возможностной меры возникновения пожара в газовой коммуникационной системе оказывается больше оценки, получаемой при применении одномерных критериев иницирования (рисунок 1).

Возьмем из [3,7] значения критической температуры и концентрации и выразим их через значения одномерных показателей в виде $T^{cr}_3 = 0.88 T_3; n^{cr}_3 = 0.91 n_3$. В предположении о длительности процесса иницирования $(\tau \geq \tau_{всн})$, по разработанному алгоритму [5, 10] произведем расчет возможностной меры иницирования всех ПОЭ газовой коммуникационной системы.

Построим логическую и нечеткую форму функции связности системы относительно критического элемента ПОЭ-6:

$$y_6 = ((x_{3256} \wedge x_{6256}) \vee (x_{5356} \wedge x_{6356})) \wedge ((x_{3206} \wedge x_{6206}) \vee (x_{2426} \wedge x_{3426} \wedge x_{4426} \wedge x_{6426}) \vee (x_{2436} \wedge x_{3436} \wedge x_{4436} \wedge x_{6436}) \vee (x_{2446} \wedge x_{3446} \wedge x_{4446} \wedge x_{6446})); \quad (6)$$

$$\Pi_6^{бес\text{СЗ}} = \text{Pos}(y_6=1)^{бес\text{СЗ}} = \min(\max(\min(\pi_{3256}, \pi_{6256}), \min(\pi_{5356}, \pi_{6356})), \max(\min(\pi_{3206}, \pi_{6206}), \min(\pi_{2426}, \pi_{3426}, \pi_{4426}, \pi_{6426}), \min(\pi_{2436}, \pi_{3436}, \pi_{4436}, \pi_{6436}), \min(\pi_{2446}, \pi_{3446}, \pi_{4446}, \pi_{6446}))); \quad (7)$$

$$\Pi_6^{СЗ} = \min(q_6, \Pi_6^{бес\text{СЗ}}). \quad (8)$$

На основании зависимостей (7) и (8) произведем расчет возможностной меры возникновения критического происшествия в системе с учетом, как комплексного, так и одномерного критериев, а также с учетом (и без учета) средств защиты. При этом были получены следующие результаты:

$$\Pi_{6(бк)}^{бес\text{СЗ}} = 0,05613, \quad \Pi_{6(к)}^{бес\text{СЗ}} = 0,05034, \quad \Pi_6^{СЗ} = 0,0001. \quad (9)$$

Выразим интегральный риск рассматриваемой системы [5,6] как произведение возможностной меры возникновения самого нежелательного исхода в системе на ущерб от его возникновения. При наличии статистики о воздействии учитываемых внешних факторов в рамках рассматриваемой системы, например, 0,2 (1/год), и значении ущерба, например, $U_{cr} = 10^4$ МРОТ, полученные результаты (9) можно представить в принятой форме интегрального риска:

$$R(бк)_{U^{бес\text{СЗ}}} = 561,3 \text{ (МРОТ/год)}, \quad R(к)_{U^{бес\text{СЗ}}} = 503,4 \text{ (МРОТ/год)}, \quad (10)$$

$$R_{U^{СЗ}} = 1 \text{ (МРОТ/год)}.$$

Следовательно, рассчитанное по комплексному критерию значение интегрального риска меньше его значения, полученного на основе одномерного представления условий инициирования.

Пример 2. Произведем количественную оценку безопасности системы, представленной на рисунке 5. Возможностная мера отказа критического ПОЭ найдена по комплексному и одномерному критериям. При этом с помощью логико-вероятностного метода [2,12] была произведена оценка вероятностной меры как предпосылок, так и инициирования критического элемента (ПОЭ-4).

Как следует из графической схемы опасности системы, рисунок 5, активный отказ (иницирование) ПОЭ-4 возможен в случае инициирования третьего и первого или третьего и второго элементов. В терминологии факторного параметрического моделирования данной системы запишем

$$Y_1 = Y_{\{1,2\}214}, \quad Y_2 = Y_{\{1,3,6\}22\{3,4\}}, \quad Y_3 = Y_{\{2,3\}234}. \quad (11)$$

Предварительно подготовленные исходные данные о рассматриваемой системе представим в виде Таблицы 2.

Таблица 2. Формализованные в рамках модели «воздействие s - восприимчивость r » исходные данные и результаты расчета возможностных мер (уровень различимости $1 - \alpha = 0,997$)

	X_{2234}	X_{3234}	X_{1214}	X_{2214}	X_{3224}	X_{1224}	X_{6224}
R	5	4	4,5	5	4	4,5	4
Δr	1,6	0,9	0,7	1,6	0,9	0,7	0,8
S	2,3	2,1	2,2	2,2	2,2	2,1	2,5
Δs	0,55	0,6	1,1	0,3	0,7	1,2	0,9
zb_α	1,2558	1,2666	1,2777	1,4736	1,1250	1,2631	0,8823
π_{n_α}	0,00083	0,00073	0,00064	0,00005	0,00336	0,00076	0,0301

На основании графического представления, рисунок 5, и зависимости (11) выразим булеву (12), логическую (13) и нечеткую (14) формы функции связности происшествия в системе

$$y_4 = (y_1 \vee y_2) \wedge y_3, \quad (12)$$

$$y_4 = (x_{2234} \wedge x_{3234}) \wedge ((x_{1214} \wedge x_{2214}) \vee (x_{3224} \wedge x_{1224} \wedge x_{6224})), \quad (13)$$

$$\Pi_4 = \min(\min(\pi_{2234}, \pi_{3234}), \max(\min(\pi_{1214}, \pi_{2214}), \min(\pi_{3224}, \pi_{1224}, \pi_{6224}))). \quad (14)$$

С учетом подстановки данных Таблицы 2, последняя строка, в формулу (14), получим следующее значение возможностной меры инициирования критического ПОЭ-4 без учета комплексности: $\Pi_4_{бк} = 7,32 \cdot 10^{-4}$.

Рассчитаем возможностную меру инициирования ПОЭ-4 с учетом комплексного критерия. Для этого сравним булевы переменные: x_{3234} и x_{3224} ; x_{1214} и x_{1224} , а также x_{2234} и x_{2214} . Выберем для них значения комплексной восприимчивости, формула (2), и произведем суммирование по норме параметров однородных факторов, действующих на ПОЭ, формула (4). В результате получим: $\Pi_4_k = 4,99 \cdot 10^{-2}$.

Из сравнения полученных результатов следует, возможностная мера Π_4_k более чем на порядок больше возможностной меры возникновения происшествия, полученной по одномерным критериям. Это демонстрирует, что применение комплексного критерия позволяет уменьшать меру ошибки пропуска происшествия (ошибку «второго рода»).

В рамках логико-вероятностного метода [2,12] для решения данной задачи имеются следующие варианты подготовки и использования исходных данных: 1) известны вероятности инициирования элементов ПОЭ-1, ПОЭ-2 и ПОЭ-3 (что затруднено для уникальных систем); 2) известны вероятности гипотез о функциях распределения вероятности и их характеристик для использования параметрической модели «воздействие – восприимчивость» [13]; 3) в качестве мер определенности [9,14] использовать значения возможностных мер инициирования элементов, см. пример 1.

Рассмотрим первый вариант. На основании правил перехода [2] преобразуем булеву форму (12) в вероятностную форму возникновения происшествия в системе и получим:

$$\text{Pro}(y_4 = 1) = p_3(1 - (1 - p_1)(1 - p_2)) = p_3(p_1 + p_2 - p_1 p_2), \quad (15)$$

$$\text{где } p_3 = p_{2234} \cdot p_{3234}; \quad p_1 = p_{1214} \cdot p_{2214}; \quad p_2 = p_{3224} \cdot p_{1224} \cdot p_{6224}. \quad (16)$$

Если $p_1 p_2 \ll p_1 + p_2$, то

$$\text{Pro}(y_4 = 1) \approx p_3(p_1 + p_2). \quad (17)$$

Рассчитаем вероятность возникновения происшествия, формула (15), в предположениях о равной вероятности его предпосылок и выполнении экспоненциального распределения вероятности их поступления:

$$p = p_1 = p_2 = p_3 = 1 - \exp(-\lambda_1 \cdot \tau_1), \quad (18)$$

где λ_1 – интенсивность возникновения предпосылок происшествий; τ_1 – длительность наблюдения.

На основе статистических данных наблюдений за реальными газовыми коммуникационными системами за 5 лет эксплуатации отмечается от 2 до 5 предпосылок (инцидентов) на элементах таких систем. В предположении о стационарности процессов воздействий в рамках рассматриваемой системы вероятность реализации предпосылки в течение суток составляет $p = 0,0011 \dots 0,0027$. А искомая вероятность происшествия находится в диапазоне: $\text{Pro}(y_4 = 1) \approx 2p^2 = (1,21 \dots 7,29) \cdot 10^{-6}$.

Как видно, полученные различными методами оценки показателей безопасности различаются более чем на три порядка. Для высоконадежных систем такая разница в оценке показателей безопасности и риска не приемлема [2,8].

Заключение. При исследовании безопасности системы с помощью комплексного критерия можно получить уточнение условий и предпосылок выявления происшествия. Моделирование комплексности инициирования происшествия в системе основано на учете совместности действия одно и многопараметрических факторов в пространстве и во времени, поступающих от разных источников на один или несколько приемников. С позиции минимизации ошибки пропуска и (или) не обнаружения происшествия применение комплексного критерия способствует значительному повышению достоверности оценки риска, а также оптимизации средств и мер защиты, снижению потерь, а значит, и повышению безопасности системы в целом.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, грант 06-08-01259

Авторы:
Ю. Есипов

Ю. Мишенькина

Подписи к рисункам и таблицам в статье Ю.В. Есипова, Ю.С. Мишенькиной

«Разработка Параметрического Комплексного Критерия Происшествия в Газовой Коммуникационной Системе»

Рисунок 1 – Критериальные кривые (n , T)

Рисунок 2 – Критериальные кривые (T , τ) и (n , τ)

Рисунок 3 – Упрощенная структурная схема газораспределительной сети

Рисунок 4 – Структурная схема системы с прямыми факторными связями

Рисунок 5 – Структурно-логическая схема опасности системы

Таблица 1 – Условия инициирования потенциально опасных элементов

Таблица 2 – Формализованные в рамках модели «воздействие s - восприимчивость r » исходные данные и результаты расчета возможных мер (уровень различимости $1 - \alpha = 0,997$)

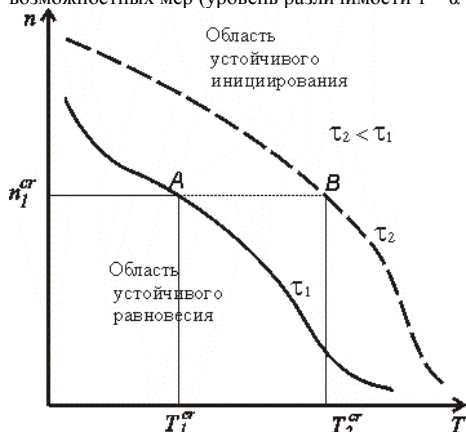


Рис 1

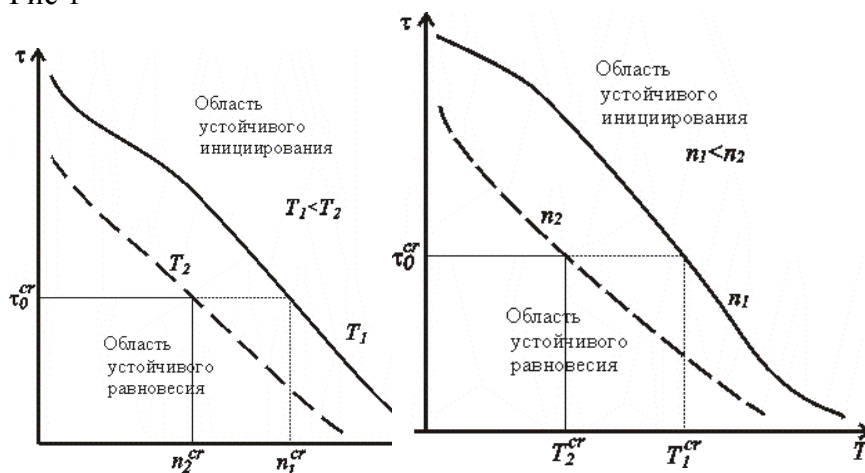


Рис 2

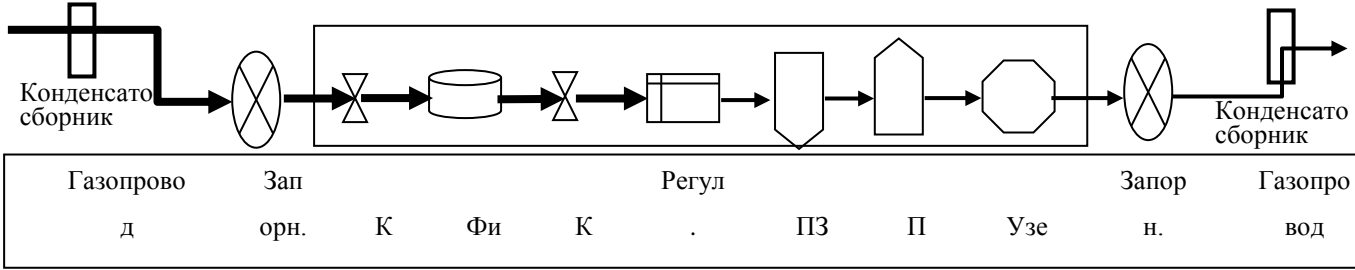


Рис 3

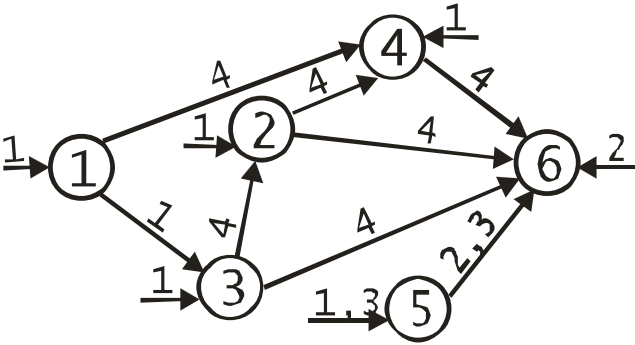


Рис 4

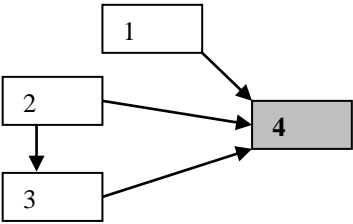


Рис 5