

УДК: 004.942

## Нечеткое моделирование механизма передачи панического состояния среди людей с различными видами темперамента

С. В. Калачин

Национальный исследовательский Мордовский государственный университет имени Н. П. Огарёва,  
Россия, 430005, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68

E-mail: s.v.kalachin@mail.ru

*Получено 30.05.2021, после доработки — 14.07.2021.*

*Принято к публикации 20.07.2021.*

Массовое скопление людей всегда представляет собой потенциальную опасность и угрозу для их жизни. К тому же ежегодно в мире в давке, основной причиной которой является массовая паника, гибнет очень большое количество людей. Поэтому изучение феномена массовой паники, ввиду ее чрезвычайной социальной опасности, представляет собой важную научную задачу. Имеющаяся информация о процессах ее возникновения и распространения относится к разряду неточной. Поэтому в качестве инструмента для разработки математической модели механизма передачи панического состояния среди людей с различными видами темперамента выбрана теория нечетких множеств.

При разработке нечеткой модели было сделано предположение о том, что паника, из эпицентра шокирующего стимула, распространяется среди людей по волновому принципу, проходя с различной частотой через разные среды (виды темперамента человека), и определяется скоростью и интенсивностью циркулярной реакции механизма передачи панического состояния. Поэтому разработанная нечеткая модель, наряду с двумя входами, имеет два выхода — скорость и интенсивность циркулярной реакции. В блоке «Фазификация» вычисляются степени принадлежности числовых значений входных параметров (частоты волны распространения паники и восприимчивости человека к паническим ситуациям) к нечетким множествам. Блок «Вывод» на входе получает степени принадлежности для каждого входного параметра и на выходе определяет результирующую функцию принадлежности скорости циркулярной реакции и ее производную, являющуюся функцией принадлежности для интенсивности циркулярной реакции. В блоке «Дефазификация» с помощью метода центра тяжести определяется количественное значение для каждого выходного параметра. Оценка качества разработанной нечеткой модели, проведенная посредством вычисления коэффициента детерминации, показала, что разработанная математическая модель относится к разряду моделей хорошего качества.

Полученный результат в виде количественных оценок циркулярной реакции позволяет улучшить качество понимания психических процессов, происходящих при передаче панического состояния среди людей. Кроме того, это дает возможность усовершенствовать существующие и разрабатывать новые модели хаотичного поведения людей, которые предназначены для выработки эффективных решений в кризисных ситуациях, направленных на полное либо частичное предотвращение распространения массовой паники, приводящей к возникновению панического бегства, давки и появлению человеческих жертв.

Ключевые слова: массовая паника, механизм передачи панического состояния, нечеткая модель, функция принадлежности

UDC: 004.942

## Fuzzy modeling the mechanism of transmitting panic state among people with various temperament species

**S. V. Kalachin**

National Research Ogarev Mordovia State University,  
68 Bolshevistskaya st., Saransk, 430005, Russia

E-mail: s.v.kalachin@mail.ru

*Received 30.05.2021, after completion — 14.07.2021.*

*Accepted for publication 20.07.2021.*

A mass congestion of people always represents a potential danger and threat for their lives. In addition, every year in the world a very large number of people die because of the crush, the main cause of which is mass panic. Therefore, the study of the phenomenon of mass panic in view of her extreme social danger is an important scientific task. Available information, about the processes of her occurrence and spread refers to the category inaccurate. Therefore, the theory of fuzzy sets has been chosen as a tool for developing a mathematical model of the mechanism of transmitting panic state among people with various temperament species.

When developing an fuzzy model, it was assumed that panic, from the epicenter of the shocking stimulus, spreads among people according to the wave principle, passing at different frequencies through different environments (types of human temperament), and is determined by the speed and intensity of the circular reaction of the mechanism of transmitting panic state among people. Therefore, the developed fuzzy model, along with two inputs, has two outputs — the speed and intensity of the circular reaction. In the block «Fuzzyfication», the degrees of membership of the numerical values of the input parameters to fuzzy sets are calculated. The «Inference» block at the input receives degrees of belonging for each input parameter and at the output determines the resulting function of belonging the speed of the circular reaction and her derivative, which is a function of belonging for the intensity of the circular reaction. In the «Defuzzyfication» block, using the center of gravity method, a quantitative value is determined for each output parameter. The quality assessment of the developed fuzzy model, carried out by calculating of the determination coefficient, showed that the developed mathematical model belongs to the category of good quality models.

The result obtained in the form of quantitative assessments of the circular reaction makes it possible to improve the quality of understanding of the mental processes occurring during the transmission of the panic state among people. In addition, this makes it possible to improve existing and develop new models of chaotic humans behaviors. Which are designed to develop effective solutions in crisis situations, aimed at full or partial prevention of the spread of mass panic, leading to the emergence of panic flight and the appearance of human casualties.

**Keywords:** mass panic, the mechanism of transmitting panic state, fuzzy model, belonging function

**Citation:** *Computer Research and Modeling*, 2021, vol. 13, no. 5, pp. 1079–1092 (Russian).

## Введение

Массовое скопление людей всегда представляет собой потенциальную опасность и угрозу для их жизни, так как под действием шокирующего стимула любая, даже высококультурная и хорошо организованная публика (под влиянием инстинктов, направленных на самосохранение) быстро превращается в хаотично движущуюся массу людей, или паническую толпу, которая характеризуется наибольшим количеством человеческих жертв. Паника — это процесс стихийный, не поддающийся какому-либо контролю и тем более управлению. Поэтому изучение феномена массовой паники среди людей, ввиду ее чрезвычайной социальной опасности, является весьма актуальной научной задачей.

Несмотря на актуальность научной проблемы, долгое время изучение поведения людей в панических ситуациях не представлялось возможным. Объясняется это тем, что для проведения научных исследований необходимо в экспериментальных целях создавать реальную ситуацию паники, которая в любом случае заканчивается человеческими жертвами. Поэтому до недавнего времени какая-либо научная теория о процессах возникновения и развития массовой паники строилась исключительно на гипотезах ученых (психологов и социологов), основанных на частных наблюдениях и описаниях какого-либо катастрофического события.

С развитием интеллектуальных информационных технологий наступает новый этап в изучении поведения массового скопления людей. Как отмечается в статье [Аптуков и др., 2013], первой работой по данному направлению является публикация [Helbing et al., 2000], где посредством математических моделей воспроизводится поведение хаотично движущихся людей. В последующих работах [Moussaida et al., 2011; Xu et al., 2012; Akopov, Beklaryan, 2012; Брейер и др., 2016] рассматриваются разнообразные варианты усовершенствования исходной модели хаотичного поведения людей.

Однако проанализировать работы, непосредственно описывающие посредством математических моделей механизм передачи панического состояния среди людей, не представляется возможным по причине их отсутствия в опубликованных научных трудах.

Основная причина отсутствия таких работ — это количественная неопределенность параметров, характеризующих психические процессы возникновения и распространения массовой паники среди людей. Это не позволяет моделировать и изучать эти процессы, что в свою очередь не дает возможность разрабатывать эффективные мероприятия, направленные на локализацию и предотвращение распространения массовой паники среди людей.

Таким образом, разработка новых подходов к решению поставленной научной задачи является актуальной.

## Теоретические основы исследования

Как уже было отмечено выше, несмотря на актуальность проблемы, долгое время интерес к ней проявлялся в основном со стороны специалистов — психологов и социологов [Социальная психология, 1975; Лебон, Тард, 1998; Ольшанский, 2002; Андреева, 2004; Назаретян, 2008; Еникеев, 2010; Аткинсон, 2012], которые выдвигали различные гипотезы возникновения и распространения массовой паники среди людей. В своих исследованиях они сумели выделить основные характеристики феномена, особенности его возникновения и развития. Наблюдения и описания многочисленных эпизодов массовой паники позволили выявить обобщенный сценарий механизма передачи панического состояния среди людей.

- Под действием шокирующего стимула вызывается испуг сначала у одного или нескольких человек. Первичная реакция на такой стимул — потрясение и восприятие ситуации как кризисной. Далее потрясение переходит в замешательство, а так как необходимость

быстрой интерпретации шокирующего стимула становится острой и требует немедленных действий, то ощущение остроты мешает логическому осмыслению кризисной ситуации и вызывает страх. Испуганные люди становятся источником, от которого страх передается остальным. Происходит взаимная индукция и нагнетание эмоционального напряжения через механизм циркулярной реакции [Социальная психология, 1975]. Циркулярная реакция — это процесс передачи эмоциональных состояний на психофизиологическом уровне, при котором у человека стирается индивидуальность, снижается роль личностного опыта, а также здравого смысла.

- Далее, если не приняты своевременные меры, масса окончательно деградирует, люди теряют самоконтроль, и начинается непосредственно процесс распространения массовой паники, наиболее часто выражающийся в виде панического бегства, который приводит к возникновению давки и только усугубляет опасность.

Согласно исследованиям [Аткинсон, 2012] феномен передачи панического состояния среди людей аналогичен проявлениям электромагнитной энергии. Сходство это проявляется не только в волновом характере и способе передачи, но и в фазе индукции. В физике индукцией называется такое проявление энергии, которое вызывает в другом объекте вибрации, совершаемые в первом объекте без прямого контакта между ними. Основными характеристиками волнового процесса являются скорость, частота и длина волны, которые между собой взаимосвязаны. Скорость волны зависима от среды и частоты волны.

Как отмечается в работе [Еникеев, 2010], процесс передачи эмоциональных состояний на психофизиологическом уровне прежде всего зависит от вида темперамента человека, в нем проявляются чувствительность индивида к внешним воздействиям и эмоциональность его поведения. Выделяют четыре основных вида темперамента:

- сангвинический (тип высшей нервной деятельности — сильный, уравновешенный, подвижный);
- холерический (тип высшей нервной деятельности — сильный, неуравновешенный (возбудимый), подвижный);
- флегматический (тип высшей нервной деятельности — сильный, уравновешенный, мало-подвижный);
- меланхолический (тип высшей нервной деятельности — слабый, неуравновешенный, мало-подвижный).

Руководствуясь вышеизложенным, при разработке математической модели механизма передачи панического состояния среди людей с различными видами темперамента было сделано предположение о том, что паника, из эпицентра шокирующего стимула, распространяется среди людей по волновому принципу, проходя с различной частотой, характеризуемой степенью их эмоционального состояния, через разные среды (разные виды темперамента), и определяется скоростью и интенсивностью процесса циркулярной реакции. Скорость циркулярной реакции характеризует процесс распространения эмоционального напряжения среди людей. Интенсивность циркулярной реакции (производная скорости циркулярной реакции) показывает, насколько быстро будет происходить нарастание эмоционального напряжения среди людей за счет взаимной индукции от эпицентра шокирующего стимула. Кроме того, в соответствии с законом электромагнитной индукции, применительно к вышеописанным условиям, интенсивность циркулярной реакции равна по величине и обратна по направлению скорости нарастания эмоционального напряжения среди людей. То есть, по аналогии с индукционным током и правилом Ленца, интенсивность циркулярной реакции всегда будет иметь такое направление, чтобы ослабить причины

ее возникновения (скорость нарастания эмоционального напряжения), и поэтому результаты ее расчета должны иметь отрицательное значение.

Правомерность принятых допущений может быть подтверждена (либо опровергнута) в последствии посредством оценки результатов моделирования и качества разрабатываемой математической модели.

В работах [Калачин, 2020; 2021] были получены количественные значения для входных параметров моделируемого психического процесса (механизма передачи панического состояния среди людей), характеризующих частоту волны распространения паники и среду ее распространения в виде восприимчивости человека к паническим ситуациям для каждого вида темперамента (таблица 1). Однако характер взаимосвязи между входными параметрами моделируемого процесса неизвестен ввиду отсутствия точной информации и его недостаточной изученности. Поэтому в качестве инструмента для моделируемого психического процесса выбрана теория нечетких множеств, которая специально ориентирована на построение математических моделей, учитывающих неточность исходных данных и неполноту информации об их взаимосвязи.

Таблица 1. Количественные значения для входных параметров моделируемого психического процесса (механизма передачи панического состояния среди людей)

Входной параметр моделируемого психического процесса	Вид темперамента			
	Сангвинический	Холерический	Флегматический	Меланхолический
Частота волны распространения паники среди людей, $c^{-1}$	0,032	0,096	0,004	0,012
Восприимчивость человека к паническим ситуациям	0,88	0,88	0,38	0,38

Понятие нечеткого множества появилось в научной литературе благодаря ученому из США L. A. Zadeh [Zadeh, 1965], внесшему существенный вклад в развитие данной теории.

Далее рассмотрим основные аспекты, связанные с нечеткими множествами [Калачин, 2021]:

- а) лингвистическая переменная — переменная с лингвистическими значениями, выражающими качественные оценки;
- б) лингвистическое значение (информационная гранула [Пегат, 2013]) — значение, выраженное в словесной (эмпирической) форме;
- в) лингвистическое терм-множество переменной — множество всех лингвистических значений (информационных гранул), используемых для определения лингвистической переменной;
- г) нечеткое множество — нечетким множеством  $A$ , определенным на некоторой числовой предметной области  $X$ , называется множество пар [Пегат, 2013]:

$$A = \{(\mu_A^*(x), x) \mid \forall x \in X,$$

где для каждого элемента  $x \in X$  степень его принадлежности  $\mu_A^*$  множеству  $A$  задается с помощью функции принадлежности  $\mu_A(x)$ , при этом  $\mu_A(x) \in [0; 1]$ .

Функция принадлежности отображает числовую область значений  $X$  данной переменной на отрезок  $[0; 1]$ . На практике используется большое количество различных видов функций принадлежности. Однако наиболее часто используемой в практических приложениях является треугольная функция принадлежности, задаваемая в виде

$$f(x; a, b, c) = \begin{cases} 0, & x \leq a, \\ \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x \leq b, \\ \frac{c-x}{c-b}, & b \leq x \leq c, \\ 0, & c \leq x, \end{cases} \quad (1)$$

где  $a, b, c$  — действительные числовые параметры ( $a, c$  — это соответственно левое и правое основание функции принадлежности, а  $b$  — ее мода), удовлетворяющие условию  $a \leq b \leq c$  [Бобырь, 2017].

## Разработка нечеткой модели

На рис. 1 представлена структура нечеткой модели, разработанная применительно к вышеописанным условиям, позволяющая получить количественные оценки скорости  $y_P$  и интенсивности  $y'_P$  циркулярной реакции механизма передачи панического состояния среди людей.

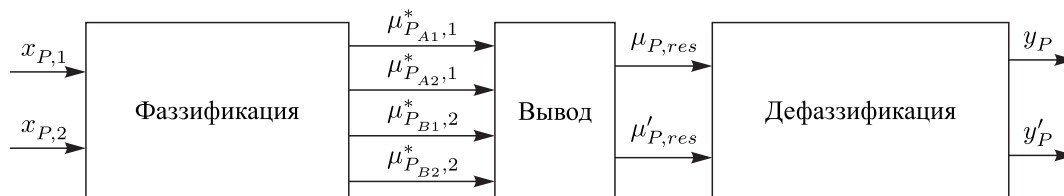


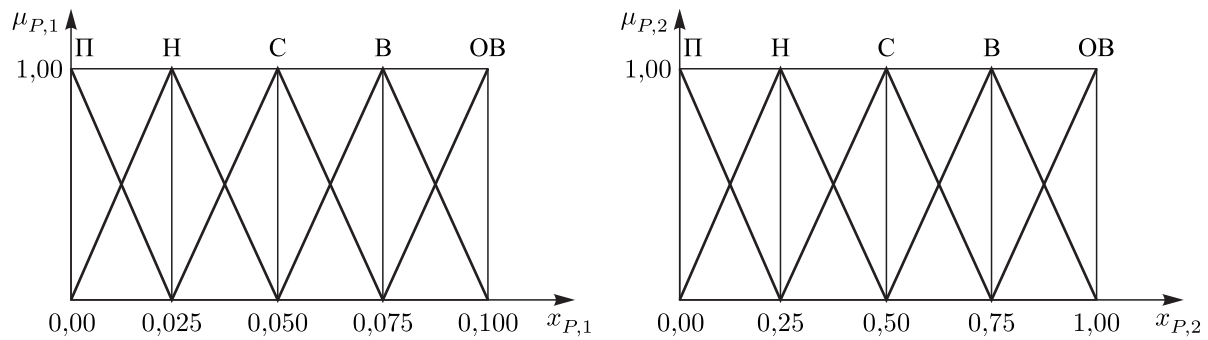
Рис. 1. Структура нечеткой модели

На входы нечеткой модели подаются входные сигналы  $x_{P,i}$  (где  $P = Sa, Ch, Ph, Me$  — индекс, обозначающий инициалы вида темперамента:  $Sa$  — сангвинический,  $Ch$  — холерический,  $Ph$  — флегматический,  $Me$  — меланхолический;  $i = 1, 2$  — номер входного параметра) отдельно для каждого вида темперамента:  $x_{P,1}$  — частота волны распространения паники среди людей,  $x_{P,2}$  — восприимчивость человека к паническим ситуациям.

Сделаем предположение, что входные параметры  $x_{P,1}, x_{P,2}$  моделируемого психического процесса изменяются в диапазонах ( $x_{P,1}: [0,00; 0,10]$ ;  $x_{P,2}: [0,00; 1,00]$ ) и описываются, соответственно, информационными гранулами (символ  $\approx$  обозначает терм «примерно»):

- «очень высокая» (ОВ):  $x_{P,1} \approx 0,100$  ( $x_{P,2} \approx 1,00$ );
- «высокая» (В):  $x_{P,1} \approx 0,075$  ( $x_{P,2} \approx 0,75$ );
- «средняя» (С):  $x_{P,1} \approx 0,050$  ( $x_{P,2} \approx 0,50$ );
- «низкая» (Н):  $x_{P,1} \approx 0,025$  ( $x_{P,2} \approx 0,25$ );
- «пониженная» (П):  $x_{P,1} \approx 0,00$  ( $x_{P,2} \approx 0,00$ ).



Рис. 2. Функции принадлежности  $\mu_{P,1}, \mu_{P,2}$  входных параметров  $x_{P,1}, x_{P,2}$ 

С учетом этого графическая интерпретация функций принадлежности  $\mu_{P,1}, \mu_{P,2}$  для каждого входного параметра  $x_{P,1}, x_{P,2}$  имеет вид, показанный на рис. 2.

В блоке «Фаззификация» вычисляются степени принадлежности  $\mu_{P_{A1},1}^*, \mu_{P_{A2},1}^*, \mu_{P_{B1},2}^*, \mu_{P_{B2},2}^*$  числовых значений входных параметров  $x_{P,1}, x_{P,2}$  к нечетким множествам  $A1, A2, B1, B2$  (установленным значениям вышеописанных информационных гранул) соответственно для каждого вида темперамента.

Далее на примере сангвинического вида темперамента рассмотрим работу блока «Фаззификация» разрабатываемой нечеткой модели.

1.  $x_{Sa,1} = 0,032$ , поэтому  $A1 = \text{«низкая» (Н)} \approx 0,025$ ;  $A2 = \text{«средняя» (С)} \approx 0,050$  (см. рис. 2).

В соответствии с выражением (1)  $\mu_{Sa_{A1},1}^* = \frac{A2 - x_{Sa,1}}{A2 - A1} = \frac{0,05 - 0,032}{0,05 - 0,025} = 0,72$ ;  $\mu_{Sa_{A2},1}^* = \frac{x_{Sa,1} - A1}{A2 - A1} = \frac{0,032 - 0,025}{0,05 - 0,025} = 0,28$ .

2.  $x_{Sa,2} = 0,88$ , поэтому  $B1 = \text{«высокая» (В)} \approx 0,75$ ;  $B2 = \text{«очень высокая» (ОВ)} \approx 1,00$  (см. рис. 2).

В соответствии с выражением (1)  $\mu_{Sa_{B1},2}^* = \frac{B2 - x_{Sa,2}}{B2 - B1} = \frac{1,00 - 0,88}{1,00 - 0,75} = 0,48$ ;  $\mu_{Sa_{B2},2}^* = \frac{x_{Sa,2} - B1}{B2 - B1} = \frac{0,88 - 0,75}{1,00 - 0,75} = 0,52$ .

Аналогичным образом определяются  $\mu_{P_{A1},1}^*, \mu_{P_{A2},1}^*, \mu_{P_{B1},2}^*, \mu_{P_{B2},2}^*$  для остальных видов темперамента (таблица 2).

Таблица 2. Результаты фаззификации

Степень принадлежности входного параметра	Вид темперамента			
	Сангвинический	Холерический	Флегматический	Меланхолический
$\mu_{P_{A1},1}^*$	0,72	0,16	0,84	0,52
$\mu_{P_{A2},1}^*$	0,28	0,84	0,16	0,48
$\mu_{P_{B1},2}^*$	0,48	0,48	0,48	0,48
$\mu_{P_{B2},2}^*$	0,52	0,52	0,52	0,52

Ввиду того что значения скорости  $u_p$  и интенсивности  $u'_p$  циркулярной реакции механизма передачи панического состояния среди людей ни в виде лингвистических переменных, ни в виде количественных оценок в открытых источниках не обнаружены, выдвинуть какое-либо предположение о характере их изменения достаточно затруднительно.

Блок «Вывод» на входе получает степени принадлежности  $\mu_{P_{A1},1}^*, \mu_{P_{A2},1}^*, \mu_{P_{B1},2}^*, \mu_{P_{B2},2}^*$  для каждого входного параметра  $x_{P,1}, x_{P,2}$  и на выходе определяет результирующую функцию принадлежности  $\mu_{P,res}$  выходного значения  $u_p$  модели для соответствующего вида темперамента.

Для выполнения вычислений блок вывода включает в себя следующие строго определенные элементы:

- база правил,
- механизм вывода.

База правил содержит логические правила, которые задают имеющие место в модели причинно-следственные отношения между нечеткими значениями ее входных и выходных величин [Пегат, 2013].

Далее рассмотрим логику рассуждений по формированию базы правил. Как указывалось выше, блок «Вывод» на входе получает по два значения степени принадлежности ( $\mu_{P_{A1},1}^*$ ,  $\mu_{P_{A2},1}^*$  и  $\mu_{P_{B1},2}^*$ ,  $\mu_{P_{B2},2}^*$ ) для каждого входного параметра  $x_{P,1}$ ,  $x_{P,2}$ . Поэтому база правил  $R_m$  (где  $m = 1, \dots, n$ ) будет сформирована из двух правил вывода, состоящих из двух простых подусловий, связанных логическим союзом *И* (конъюнктивное условие), что соответствует следующим выражениям:

$$R_1: \text{ЕСЛИ } (x_{P,1} = \mu_{P_{A1},1}) \text{ И } (x_{P,2} = \mu_{P_{A2},1}) \text{ ТО } (y_{P,1} = \mu_{P,I});$$

$$R_2: \text{ЕСЛИ } (x_{P,1} = \mu_{P_{B1},2}) \text{ И } (x_{P,2} = \mu_{P_{B2},2}) \text{ ТО } (y_{P,2} = \mu_{P,II}),$$

где *ЕСЛИ*, *И*, *ТО* — операторы агрегирования нечетких множеств [Pfeiffer, 1996];  $\mu_{P_{A1},1}$ ,  $\mu_{P_{A2},1}$ ,  $\mu_{P_{B1},2}$ ,  $\mu_{P_{B2},2}$  — функции принадлежности входных параметров  $x_{P,1}$ ,  $x_{P,2}$  для соответствующего вида темперамента (см. рис. 2);  $\mu_{P,I}$ ,  $\mu_{P,II}$  — активизированные (модифицированные [Пегат, 2013]) функции принадлежности выводов  $y_{P,1}$ ,  $y_{P,2}$  нечеткой модели для правил  $R_1$ ,  $R_2$  и соответствующего вида темперамента.

Решение возложенной на блок вывода задачи, связанной с определением результирующей функции принадлежности  $\mu_{P,res}$ , обеспечивается механизмом вывода. Механизм вывода включает в себя следующие шаги:

- определяются модифицированные функции принадлежности  $\mu_{P,I}$ ,  $\mu_{P,II}$  для правил вывода  $R_1$ ,  $R_2$  и соответствующего вида темперамента:

$$\mu_{P,I} = \text{MIN}(\mu_{P_{A1},1}, \mu_{P_{A2},1}); \quad (2)$$

$$\mu_{P,II} = \text{MIN}(\mu_{P_{B1},2}, \mu_{P_{B2},2}), \quad (3)$$

где *MIN* — оператор, обозначающий пересечение нечетких множеств на основе операции нахождения минимума;

- определяется результирующая функция  $\mu_{P,res}$ :

$$\mu_{P,res} = \text{MAX}(\mu_{P,I}, \mu_{P,II}), \quad (4)$$

где *MAX* — оператор, обозначающий объединение нечетких множеств на основе операции нахождения максимума.

Результирующая функция принадлежности  $\mu'_{P,res}$  второго выходного параметра  $y'_P$  (интенсивности циркулярной реакции) моделируемого психического процесса определяется по формуле [Гусев, Мордкович, 1988]

$$\mu'_{P,res} = f'(y_P) = \lim_{\Delta y_P \rightarrow 0} \frac{\Delta \mu_{P,res}}{\Delta y_P} = \lim_{\Delta y_P \rightarrow 0} \frac{f(y_P + \Delta y_P) - f(y_P)}{\Delta y_P}, \quad (5)$$



где  $f'(y_P)$  — производная функции принадлежности  $\mu_{P,res} = f(y_P)$ ;  $\Delta\mu_{P,res}$  — приращение функции принадлежности  $\Delta\mu_{P,res} = f(y_P + \Delta y_P) - f(y_P)$ ;  $\Delta y_P$  — приращение аргумента  $y_P$ .

В блоке «Дефаззификация» с помощью метода центра тяжести определяется единственное значение выходных параметров  $y_P$  и  $y'_P$  по формулам [Пегат, 2013]

$$y_P = \frac{\sum_{j=1}^n \mu_{P,res_j}^* \cdot y_{P_j}}{\sum_{j=1}^n \mu_{P,res_j}^*}, \quad (6)$$

$$y'_P = \frac{\sum_{j=1}^n \mu'_{P,res_j} \cdot y'_{P_j}}{\sum_{j=1}^n \mu'_{P,res_j}}, \quad (7)$$

где  $\mu_{P,res_j}^*$  — степени принадлежности выходного параметра  $y_{P_j}$ ;  $\mu'_{P,res_j}$  — степени принадлежности выходного параметра  $y'_{P_j}$ ;  $j = 1, \dots, n$  — номер заключения нечетко-логического вывода.

Далее на примере холерического вида темперамента рассмотрим работу механизмов вывода и дефаззификации разработанной нечеткой модели (где  $P = Ch$ , то есть индекс  $P$  в обозначениях заменяется на инициалы вида темперамента  $Ch$  — холерический).

1. В соответствии с выражениями (2), (3) определяются  $\mu_{Ch,I}$ ,  $\mu_{Ch,II}$ .

Исходные данные:

$$\begin{aligned} \mu_{P_{A1},1} &= \left\{ \frac{0,00}{0,00}, \frac{0,00}{0,025}, \frac{0,00}{0,050}, \frac{0,16}{0,075}, \frac{0,16}{0,096}, \frac{0,00}{0,10} \right\}; \\ \mu_{P_{A2},1} &= \left\{ \frac{0,00}{0,00}, \frac{0,00}{0,025}, \frac{0,00}{0,050}, \frac{0,00}{0,075}, \frac{0,84}{0,096}, \frac{0,84}{0,10} \right\}; \\ \mu_{P_{B1},2} &= \left\{ \frac{0,00}{0,00}, \frac{0,00}{0,25}, \frac{0,00}{0,50}, \frac{0,48}{0,75}, \frac{0,48}{0,88}, \frac{0,00}{1,00} \right\}; \\ \mu_{P_{B2},2} &= \left\{ \frac{0,00}{0,00}, \frac{0,00}{0,25}, \frac{0,00}{0,50}, \frac{0,00}{0,75}, \frac{0,52}{0,88}, \frac{0,52}{1,00} \right\}. \end{aligned}$$

Результат:

$$\begin{aligned} \mu_{Ch,I} &= \left\{ \frac{0,00}{0,00}, \frac{0,00}{0,025}, \frac{0,00}{0,050}, \frac{0,00}{0,075}, \frac{0,16}{0,096}, \frac{0,00}{0,10} \right\}; \\ \mu_{Ch,II} &= \left\{ \frac{0,00}{0,00}, \frac{0,00}{0,25}, \frac{0,00}{0,50}, \frac{0,00}{0,75}, \frac{0,48}{0,88}, \frac{0,00}{1,00} \right\}. \end{aligned}$$

2. В соответствии с выражением (4) определяется  $\mu_{Ch,res}$ .

Исходные данные:

$$\begin{aligned} \mu_{Ch,I} &= \left\{ \frac{0,00}{0,00}, \frac{0,00}{0,025}, \frac{0,00}{0,050}, \frac{0,00}{0,075}, \frac{0,16}{0,096}, \frac{0,00}{0,10} \right\}; \\ \mu_{Ch,II} &= \left\{ \frac{0,00}{0,00}, \frac{0,00}{0,25}, \frac{0,00}{0,50}, \frac{0,00}{0,75}, \frac{0,48}{0,88}, \frac{0,00}{1,00} \right\}. \end{aligned}$$

Преобразуем исходные данные  $\mu_{Ch,I}$ ,  $\mu_{Ch,II}$  к виду

$$\begin{aligned} \mu_{Ch,I} &= \left\{ \frac{0,00}{0,00}, \frac{0,00}{0,025}, \frac{0,00}{0,050}, \frac{0,00}{0,075}, \frac{0,16}{0,096}, \frac{0,00}{0,10}, \frac{0,00}{0,25}, \frac{0,00}{0,50}, \frac{0,00}{0,75}, \frac{0,00}{0,88}, \frac{0,00}{1,00} \right\}; \\ \mu_{Ch,II} &= \left\{ \frac{0,00}{0,00}, \frac{0,00}{0,025}, \frac{0,00}{0,050}, \frac{0,00}{0,075}, \frac{0,00}{0,096}, \frac{0,00}{0,10}, \frac{0,00}{0,25}, \frac{0,00}{0,50}, \frac{0,00}{0,75}, \frac{0,48}{0,88}, \frac{0,00}{1,00} \right\}. \end{aligned}$$

Решение:

$$\begin{aligned}
 0,00: 0,00 + 0,00 - 0,00 \times 0,00 &= 0,00; & 0,025: 0,00 + 0,00 - 0,00 \times 0,00 &= 0,00; \\
 0,050: 0,00 + 0,00 - 0,00 \times 0,00 &= 0,00; & 0,075: 0,00 + 0,00 - 0,00 \times 0,00 &= 0,00; \\
 0,096: 0,16 + 0,00 - 0,16 \times 0,00 &= 0,16; & 0,10: 0,00 + 0,00 - 0,00 \times 0,00 &= 0,00; \\
 0,25: 0,00 + 0,00 - 0,00 \times 0,00 &= 0,00; & 0,50: 0,00 + 0,00 - 0,00 \times 0,00 &= 0,00; \\
 0,75: 0,00 + 0,00 - 0,00 \times 0,00 &= 0,00; & 0,88: 0,00 + 0,48 - 0,00 \times 0,48 &= 0,48; \\
 1,00: 0,00 + 0,00 - 0,00 \times 0,00 &= 0,00.
 \end{aligned}$$

Результат:

$$\mu_{Ch,res} = \left\{ \frac{0,00}{0,00}, \frac{0,00}{0,025}, \frac{0,00}{0,050}, \frac{0,00}{0,075}, \frac{0,16}{0,096}, \frac{0,00}{0,10}, \frac{0,00}{0,25}, \frac{0,00}{0,50}, \frac{0,00}{0,75}, \frac{0,48}{0,88}, \frac{0,00}{1,00} \right\}.$$

3. В соответствии с выражением (5) определяется  $\mu'_{Ch,res}$ .

Исходные данные:

$$\mu_{Ch,res} = \left\{ \frac{0,00}{0,00}, \frac{0,00}{0,025}, \frac{0,00}{0,050}, \frac{0,00}{0,075}, \frac{0,16}{0,096}, \frac{0,00}{0,10}, \frac{0,00}{0,25}, \frac{0,00}{0,50}, \frac{0,00}{0,75}, \frac{0,48}{0,88}, \frac{0,00}{1,00} \right\}.$$

Решение:

$$\begin{aligned}
 0,025: \frac{0,00 - 0,00}{0,025} &= 0,00; & 0,050: \frac{0,00 - 0,00}{0,025} &= 0,00; & 0,075: \frac{0,00 - 0,00}{0,025} &= 0,00; \\
 0,096: \frac{0,16 - 0,00}{0,021} &= 7,62; & 0,10: \frac{0,00 - 0,16}{0,004} &= -40,00; & 0,25: \frac{0,00 - 0,00}{0,15} &= 0,00; \\
 0,50: \frac{0,00 - 0,00}{0,25} &= 0,00; & 0,75: \frac{0,00 - 0,00}{0,25} &= 0,00; & 0,88: \frac{0,48 - 0,00}{0,13} &= 3,69; \\
 1,00: \frac{0,00 - 0,48}{0,12} &= -4,00.
 \end{aligned}$$

Результат:

$$\mu'_{Ch,res} = \left\{ \frac{0,00}{0,025}, \frac{0,00}{0,050}, \frac{0,00}{0,075}, \frac{7,62}{0,096}, \frac{-40,00}{0,10}, \frac{0,00}{0,25}, \frac{0,00}{0,50}, \frac{0,00}{0,75}, \frac{3,69}{0,88}, \frac{-4,00}{1,00} \right\}.$$

4. В соответствии с выражениями (6), (7) определяются  $y_{Ch}$  и  $y'_{Ch}$ .

Исходные данные:

$$\begin{aligned}
 \mu_{Ch,res} &= \left\{ \frac{0,00}{0,00}, \frac{0,00}{0,025}, \frac{0,00}{0,050}, \frac{0,00}{0,075}, \frac{0,16}{0,096}, \frac{0,00}{0,10}, \frac{0,00}{0,25}, \frac{0,00}{0,50}, \frac{0,00}{0,75}, \frac{0,48}{0,88}, \frac{0,00}{1,00} \right\}; \\
 \mu'_{Ch,res} &= \left\{ \frac{0,00}{0,025}, \frac{0,00}{0,050}, \frac{0,00}{0,075}, \frac{7,62}{0,096}, \frac{-40,00}{0,10}, \frac{0,00}{0,25}, \frac{0,00}{0,50}, \frac{0,00}{0,75}, \frac{3,69}{0,88}, \frac{-4,00}{1,00} \right\}.
 \end{aligned}$$

Решение:

$$\begin{aligned}
 y_{Ch} &= \frac{0,16 \times 0,096 + 0,48 \times 0,88}{0,00 + 0,025 + 0,050 + 0,075 + 0,096 + 0,10 + 0,25 + 0,50 + 0,75 + 0,88 + 1,00} = \frac{0,44}{3,73} = 0,12; \\
 y'_{Ch} &= \frac{7,62 \times 0,096 - 40,00 \times 0,10 + 3,69 \times 0,88 - 4,00 \times 1,00}{0,025 + 0,050 + 0,075 + 0,096 + 0,10 + 0,25 + 0,50 + 0,75 + 0,88 + 1,00} = -\frac{4,02}{3,73} = -1,08.
 \end{aligned}$$

Результат:  $y_{Ch} = 0,12$ ;  $y'_{Ch} = -1,08$ .

Таблица 3. Результаты нечеткого моделирования

Вид темперамента	$u_p$ , чел./с	$u'_p$ , чел./с <sup>2</sup>
Сангвинический	0,12	-0,07
Холерический	0,12	-1,08
Флегматический	0,06	-0,20
Меланхолический	0,06	-0,33

Аналогичным образом определяются  $u_p$  и  $u'_p$  для остальных видов темперамента (таблица 3). Скорость  $u_p$  циркулярной реакции имеет размерность чел./с, а интенсивность  $u'_p$  циркулярной реакции, представляющая собой производную скорости циркулярной реакции, имеет размерность чел./с<sup>2</sup>.

Анализ таблицы 3 показывает, что результаты расчета интенсивности циркулярной реакции имеют отрицательные значения. Это означает, что она равна по величине и обратна по направлению скорости нарастания эмоционального напряжения среди людей. Что подтверждает правомерность выдвинутых ранее предположений при разработке нечеткой модели.

Создавать в экспериментальных целях, подвергая людей опасности, настоящую ситуацию страха и паники является неэтичным и уголовно наказуемым деянием. Поэтому оценку качества разработанной нечеткой модели проведем посредством вычисления коэффициента детерминации  $R^2$ , характеризующего долю вариации выходного значения, учтенной в разработанной модели и обусловленной влиянием на нее факторов, включенных в модель.

В таблице 4 представлены исходные данные для вычисления коэффициента детерминации  $R^2$ , составленные на основе таблиц 1 и 3.

Таблица 4. Исходные данные для вычисления коэффициента детерминации  $R^2$ 

Вид темперамента	Частота волны распространения паники среди людей, с <sup>-1</sup>	Восприимчивость человека к паническим ситуациям	Скорость циркулярной реакции паники, чел./с	Интенсивность циркулярной реакции паники, чел./с <sup>2</sup>
Сангвинический	0,032	0,88	0,12	-0,07
Холерический	0,096	0,88	0,12	-1,08
Флегматический	0,004	0,38	0,06	-0,20
Меланхолический	0,012	0,38	0,06	-0,33

С целью повышения эффективности выполняемых расчетов коэффициента детерминации  $R^2$  разработана компьютерная программа, основанная на возможностях библиотеки NumPy высокоуровневого языка программирования Python [Калачин, 2021]. Ниже представлены листинг и результаты расчета разработанной компьютерной программы применительно к вышеописанным условиям.

#Программа и результат вычисления коэффициента детерминации  $R^2$

```
import numpy as np
A=np.matrix('0.032 0.88 0.12 -0.07; 0.096 0.88 0.12 -1.08; 0.004 0.38
0.06 -0.20; 0.012 0.38 0.06 -0.33')
B = np.corrcoef(A)
YX=np.linalg.det(B)
B = np.delete(B, 0, axis=0)
B = np.delete(B, 0, axis=1)
XX=np.linalg.det(B)
```

```
R=1-YX/XX
print('R^2=', round(R, 2))
>>>
***Результат выполнения программы***
R^2= 1.00
```

Согласно результатам расчета  $R^2 = 1,00$ , поэтому разработанная нечеткая модель механизма передачи панического состояния среди людей относится к разряду моделей хорошего качества [Калачин, 2021].

Таким образом, анализ результатов моделирования и оценка качества разработанной нечеткой модели подтверждают правомерность выдвинутых предположений при ее разработке.

Кроме того, анализ материалов таблицы 4 показывает, что на скорость циркулярной реакции, характеризующей процесс распространения эмоционального напряжения среди людей, существенное влияние оказывает среда ее распространения, то есть вид темперамента человека, характеризуемый его восприимчивостью к паническим ситуациям.

Несмотря на то что значения скорости циркулярной реакции равны для сангвинического и холерического (0,12 чел./с), а также для флегматического и меланхолического (0,06 чел./с) видов темперамента, интенсивность циркулярной реакции паники, показывающая, насколько быстро будет происходить нарастание эмоционального напряжения среди людей, индивидуальна для каждого вида темперамента. Причем для холериков она максимальна ( $-1,08$  чел./с<sup>2</sup>), а для сангвиников минимальна ( $-0,07$  чел./с<sup>2</sup>). Промежуточные значения свойственны флегматикам ( $-0,20$  чел./с<sup>2</sup>) и меланхоликам ( $-0,33$  чел./с<sup>2</sup>).

Это означает, что наиболее подвержены процессу «заражения» паникой представители холерического, а наименее — сангвинического видов темперамента, несмотря на то что дальнейший процесс ее распространения проходит для них с одинаковой скоростью.

## Заключение

Массовое скопление людей всегда представляет собой потенциальную опасность и угрозу для их жизни. К тому же ежегодно в мире в давке, основной причиной которой является массовая паника, гибнет очень большое количество людей. Поэтому изучение феномена массовой паники, ввиду ее чрезвычайной социальной опасности, представляет собой важную научную задачу. Имеющаяся информация о процессах ее возникновения и распространения относится к разряду неточной. Поэтому в качестве инструмента для разработки математической модели механизма передачи панического состояния среди людей с различными видами темперамента выбрана теория нечетких множеств.

При разработке нечеткой модели было сделано предположение о том, что паника, из эпика центра шокирующего стимула, распространяется среди людей по волновому принципу, проходя с различной частотой через разные среды (виды темперамента человека), и определяется скоростью и интенсивностью циркулярной реакции механизма передачи панического состояния. Поэтому разработанная нечеткая модель, наряду с двумя входами, имеет два выхода — скорость и интенсивность циркулярной реакции. В блоке «Фаззификация» вычисляются степени принадлежности числовых значений входных параметров (частоты волны распространения паники и восприимчивости человека к паническим ситуациям) к нечетким множествам. Блок «Вывод» на входе получает степени принадлежности для каждого входного параметра и на выходе определяет результирующую функцию принадлежности скорости циркулярной реакции и ее производную, являющуюся функцией принадлежности для интенсивности циркулярной реакции. В блоке «Дефаззификация» с помощью метода центра тяжести определяется единственное количественное значение для каждого выходного параметра.

Оценка качества разработанной нечеткой модели, проведенная посредством вычисления коэффициента детерминации, показала, что разработанная математическая модель относится к разряду моделей хорошего качества. Это подтверждает правомерность выдвинутых предположений при ее разработке.

Проведенный анализ результатов моделирования позволил сделать ряд выводов:

- на скорость циркулярной реакции, характеризующей процесс распространения эмоционального напряжения среди людей, существенное влияние оказывает среда ее распространения, то есть вид темперамента человека, характеризующий его восприимчивостью к паническим ситуациям;
- наиболее подвержены процессу «заражения» паникой представители холерического, а наименее — сангвинического видов темперамента, несмотря на то что дальнейший процесс ее распространения проходит для них с одинаковой скоростью.

Полученный результат в виде количественных оценок циркулярной реакции позволяет улучшить качество понимания психических процессов, происходящих при передаче панического состояния среди людей. Кроме того, это дает возможность усовершенствовать существующие и разрабатывать новые модели хаотичного поведения людей, которые предназначены для выработки эффективных решений в кризисных ситуациях, направленных на полное либо частичное предотвращение распространения массовой паники, приводящей к возникновению панического бегства, давки и появлению человеческих жертв.

## Список литературы (References)

- Андреева Г. М. Социальная психология. — М.: Изд-во Моск. ун-та, 2004. — 380 с.  
*Andreyeva G. M. Sotsial'naya psikhologiya [Social psychology]. — Moscow: Publishing house of Moscow University, 2004. — 380 p. (in Russian).*
- Антуков А. М., Брацун Д. А., Люшин А. В. Моделирование поведения паникующей толпы в многоуровневом разветвленном помещении // Компьютерные исследования и моделирование. — 2013. — Т. 5, № 3. — С. 491–508.  
*Aptukov A. M., Bratsun D. A., Lyushnin A. V. Modelirovaniye povedeniya panikuyushchey tolpy v mnogourovnevnom razvetvlennom pomeshchenii [Modeling of Behavior of Panicked Crowd in Multi-Floor Branched Space] // Computer Research and Modeling. — 2013. — Vol. 5, no. 3. — P. 491–508 (in Russian).*
- Аткинсон У. Наука самосовершенствования и влияния на других / пер. с англ. — М.: Эксмо, 2012. — 180 с.  
*Atkinson W. The science of self-improvement and influencing others. JMW Group, Inc., 2004. 180 p. (Russ. ed.: Atkinson W. Nauka samosovershenstvovaniya i vliyaniya na drugikh. Translation from English. — Moscow: Eksmo Publ., 2012. — 180 p.)*
- Бобырь М. В. Обучение нейронечетких систем. — М.: Аргамак-Медиа, 2017. — 240 с.  
*Bobyry' M. V. Obucheniye neyronechetkikh system [Teaching neuro-fuzzy systems]. — Moscow: Argamak-Media Publ., 2017. — 240 p. (in Russian).*
- Бреер В. В., Новиков Д. А., Рогаткин А. Д. Управление толпой: математические модели порогового коллективного поведения. — М.: Ленанд, 2016. — 168 с.  
*Breer V. V., Novikov D. A., Rogatkin A. D. Upravleniye tolпой: matematicheskiye modeli porogovogo kolektivnogo povedeniya [Crowd management: mathematical models of threshold collective behavior]. — Moscow: Lenand Publ., 2016. — 168 p. (in Russian).*
- Гусев В. А., Мордкович А. Г. Математика: справ. материалы. — М.: Просвещение, 1988. — 416 с.  
*Gusev V. A., Mordkovich A. G. Matematika: sprav. materialy [Mathematics: ref. materials]. — Moscow: Education Publ., 1988. — 416 p. (in Russian).*

- Еникеев М. И.* Общая и социальная психология: учеб. для вузов. — М.: Норма, Инфра-М, 2010. — 624 с.  
*Enikeev M. I.* Obshchaya i sotsial'naya psikhologiya: ucheb. dlya vuzov [General and social psychology: textbook for universities]. — Moscow: Norma Publ., Infra-M Publ., 2010. — 624 p. (in Russian).
- Калачин С. В.* Прогнозирование распространения паники среди людей при эвакуации из здания во время пожара // Безопасность труда в промышленности. — 2020. — № 10. — С. 77–82.  
*Kalachin S. V.* Prognozirovaniye rasprostraneniya paniki sredi lyudey pri evakuatsii iz zdaniya vo vremya pozhara [Predicting the spread of panic among people when evacuating a building during a fire] // Bezopasnost' truda v promyshlennosti [Occupational Safety in Industry]. — 2020. — No. 10. — P. 77–82 (in Russian).
- Калачин С. В.* Нечеткое моделирование восприимчивости человека к паническим ситуациям // Компьютерные исследования и моделирование. — 2021. — Т. 13, № 1. — С. 203–218.  
*Kalachin S. V.* Nchetkoye modelirovaniye vospriimchivosti cheloveka k panicheskim situatsiyam [Fuzzy modeling of human susceptibility to panic situations] // Computer Research and Modeling. — 2021. — Vol. 13, no. 1. — P. 203–218 (in Russian).
- Лебон Г., Тард Г.* Психология толп. Мнение и толпа. — М.: Институт психологии РАН, КСП+, 1998. — 416 с.  
*Lebon G., Tarde G.* Psikhologiya tolp. Mneniye i tolpa [Psychology of crowds. Opinion and crowd]. — Moscow: Publishing house of Institute of psychology of the Russian Academy of Sciences, KSP+ Publ., 1998. — 416 p. (in Russian).
- Назаретян А. П.* Психология стихийного массового поведения. Лекции. — М.: ПЕР СЭ, 2008. — 112 с.  
*Nazaretyan A. P.* Psikhologiya stikhiynogo massovogo povedeniya. Lektsii [Psychology of spontaneous mass behavior. Lectures]. — Moscow: PER SE Publ., 2008. — 112 p. (in Russian).
- Ольшанский Д. В.* Психология масс. — СПб.: Питер, 2002. — 368 с.  
*Olshansky D. V.* Psikhologiya mass [Psychology of the masses]. — St. Petersburg: Peter Publ., 2002. — 368 p. (in Russian).
- Пегат А.* Нечеткое моделирование и управление / пер. с англ. 2-е изд. — М.: Бином, 2013. — 798 с.  
*Piegat A.* Fuzzy modeling and control. Heidelberg: Physica-Verlag, 2001. 728 p. (Russ. ed.: Pegat A. Nchetkoye modelirovanie i upravlenie. 2nd ed. Translation from English. — Moscow: Binom Publ., 2013. — 798 p.).
- Социальная психология. Краткий очерк / под общ. ред. Г. П. Предвечного и Ю. А. Шерковина.* — М.: Политиздат, 1975. — 319 с.  
*Sotsial'naya psikhologiya. Kratkiy ocherk / pod obshchey redaktsiyey G. P. Predvechnogo i Yu. A. Shcherkovina* [Social Psychology. Brief sketch. Under the general editorship of G. P. Predvechny and Yu. A. Shcherkovin]. — Moscow: Politizdat Publ., 1975. — 319 p. (in Russian).
- Akopov A. S., Beklaryan L. A.* Simulation of Human Crowd Behavior in Extreme Situations // International Journal of Pure and Applied Mathematics. — 2012. — Vol. 79, no. 1. — P. 121–138.
- Helbing D., Farkas I., Vicsek T.* Simulating Dynamical Features of Escape Panic // Nature. — 2000. — Vol. 407. — P. 487–490.
- Moussaida M., Helbing D., Theraulaz G.* How Simple Rules Determine Pedestrian Behavior and Crowd Disasters // PNAS. — 2011. — Vol. 108. — P. 6884–6892.
- Pfeiffer B. M.* Workshop «Fuzzy Control» // Automatisierungstechnik. — 1996. — Vol. 44, no. 3. — P. 141–142.
- Xu Y., Huang H. J., Yong G.* Modified Static Floor Field and Exit Choice for Pedestrian Evacuation // Chin. Phys. Lett. — 2012. — Vol. 29. — P. 080502.
- Zadeh L. A.* Fuzzy Sets // Information and Control. — 1965. — Vol. 8, no. 1. — P. 338–353.