

В.В. Курейчик, Е.М. ГЕРАСИМЕНКО
**ИНТЕГРИРОВАННЫЙ АЛГОРИТМ
МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОГО ГРУППОВОГО ПРИНЯТИЯ
РЕШЕНИЙ ДЛЯ ЗАДАЧ ЭВАКУАЦИИ**

Курейчик В.В., Герасименко Е.М. Интегрированный алгоритм многокритериального группового принятия решений для задач эвакуации.

Аннотация. В данной статье представлен интегрированный алгоритм многокритериального группового принятия решений на основе интуиционистского нечеткого гибридного оператора усреднения для выбора оптимальной стратегии эвакуации. Данный алгоритм является многоуровневым, где на первом уровне осуществляется построение модели задачи в виде эвакуационной транспортной сети. На втором уровне производится ранжирование помещений для эвакуации для нахождения их оптимального порядка на основе различных критериев, таких как вместимость помещения, легкость эвакуации, уровень безопасности помещения как убежища, время организации эвакуации из этого места и удаленность от источника опасности. Ранжирование помещений для эвакуации осуществляется на основе многокритериального группового принятия решений и интуиционистского нечеткого гибридного оператора усреднения для моделирования сомнений и неуверенности экспертов для оценки критериев эвакуации, эвакуационных альтернатив и важности экспертов. Алгоритм оперирует лингвистическими оценками экспертов, позволяя на их основе вычислять веса экспертов и критериев для эффективного принятия решения. Агрегирование оценок осуществляется на основе модифицированного алгоритма, который позволяет оперировать весами критериев, представленными в виде нечетких интуиционистских значений, в отличие от традиционных четких чисел, на основе разработанных модифицированных операторов возведения нечетких чисел в нечеткую степень для учета сомнений и неуверенности группы экспертов. На третьем уровне осуществляется макрокопическая потоковая динамическая эвакуация с учетом возможности размещения пострадавших в помещениях для эвакуации, не являющихся убежищами. Достоинством предложенного алгоритма является возможность моделирования транспортировки эвакуируемых в динамических условиях из опасных зон с учетом их размещения в промежуточных пунктах для максимизации числа спасенных жизней, учитывая неопределённость окружающей среды, нечёткий характер факторов, влияющих на принятие эвакуационных решений, неуверенность и сомнения группы экспертов при оценке эвакуационных стратегий. Для подтверждения эффективности разработанного алгоритма было проведено моделирование эвакуации и создана программная среда, реализованная на языке JavaScript. Проведено сравнение разработанного алгоритма принятия решения на основе оператора IFNA, оперирующего нечеткими весами критериев, с существующими алгоритмами и сделан вывод о достоверности предлагаемого алгоритма. Проведена оценка зависимости времени работы алгоритма от размера входных, подтверждающая возможность использования предложенного алгоритма для больших зданий и транспортных сетей.

Ключевые слова: нечеткое интуиционистское принятие решений, нечеткая макрокопическая эвакуация, нечёткие операторы агрегирования.

1. Введение. С древних времен чрезвычайные ситуации (ЧС) приводили к катастрофическим последствиям и уносили сотни жизней.

Более того, ЧС могут возникать неожиданно, тем самым увеличивая потери и ущерб. Такие внезапные аварии часто связаны с отсутствием планов реагирования на ЧС. По сфере возникновения ЧС подразделяются на природные, экологические и техногенные [1] (рисунок 1).



Рис. 1. Укрупненная классификация ЧС по сфере возникновения

Для реагирования и устранения последствий в результате возникновения этих ЧС требуются различные стратегии, методы и подходы в зависимости от сферы их возникновения [2 – 4]. В работе [2] рассматривается реагирование (массовая эвакуация) на природные ЧС. В работах [3 – 4] представлены подходы к эвакуации населения в случае экологических и техногенных ЧС. Рисунок 1 представляет укрупненную классификацию ЧС по сфере возникновения ЧС.

В основе методов реагирования на ЧС лежат различные методы моделирования потоков. В этих методах моделью эвакуационной сети является графовые и гиперграфовые представления транспортных сетей [5]. Форд и Фалкерсон [5] предложили метод определения максимального потока в динамической сети, который позволяет перемещать как можно больше пострадавших в убежища. Задача скорейшего прибытия, предложенная Гейлом [6], требует транспортировки максимального количества пострадавших, прибывающих в пункты назначения в каждый период времени.

Лексикографическая стратегия эвакуации [7] предполагает транспортировку потока в предписанном порядке, так что источники и/или стоки ранжируются. Идея «развернутой во времени», или «разнесенной во времени» сети Форда и Фалкерсона была расширена Чалметом и др. [8] для эвакуации из зданий. Ускоренная транспортировка эвакуируемых связана с проблемой потока наискорейшего прибытия [9]. В работе [9] указанная задача решена для эвакуации из больших зданий с помощью вероятностных сетей в динамических условиях, чтобы минимизировать общее время транспортировки людей [10]. В работе [11] потоковая задача решена как задача эвакуации, учитывающая различные приоритетные уровни для параметров сети. Задача потока минимальной стоимости была преобразована в задачу маршрутизации эвакуации Данном и Ньютоном [12], которые предложили алгоритмы для поиска кратчайших путей в сетях эвакуации, чтобы минимизировать общее расстояние перемещения. Миллер-Хукс и Паттерсон [13] расширили идею изменяющихся во времени параметров сетей, чтобы отправить максимальное количество пострадавших в соответствии с наискорейшей стратегией эвакуации в динамической сети с ограниченными пропускными способностями. На основании проведенного анализа литературных источников можно сделать вывод, что требуется расширение концепции лексикографической эвакуации, которая позволит определять приоритетность промежуточных решений и перемещать эвакуируемых в найденном порядке для максимизации числа спасаемых". Данный тип потоковой оптимизации актуален в реальных задачах эвакуации, так как он позволяет переместить большее число людей в безопасные зоны в связи с возможностью промежуточных узлов размещать дополнительный поток, что приводит к возможности перемещения людей из промежуточных вершин, не являющихся стоками.

Заметим, что характер исследуемой эвакуационной сети в проанализированных источниках часто неточен и не определен. Точные значения пропускной способности дуг сети и стоимости транспортировки неизвестны и могут быть только приблизительно оценены. Для решения этой проблемы предлагается использовать аппарат нечеткой логики и ее расширений [14 – 16]. В частности, были поставлены и решены различные потоковые задачи в нечетких условиях: нахождение максимального потока, потока минимальной стоимости, обобщенного потока, многопродуктового потока, потока наискорейшего прибытия как в статических, так и в динамических сетях [17]. Принятие решений (ПР) при эвакуации часто затруднено

рискованными и непрогнозируемыми аспектами эвакуации: некоторые детали эвакуации и данные, связанные со всем процессом, могут отсутствовать или иметь неопределенный характер. В этой связи были разработаны различные модели эвакуации с учетом неопределенности, а также изменяющейся во времени природы эвакуационных сетей [18 – 20]. Предложенные модели определять методологическую основу данной работы.

Также существуют подходы к эвакуации людей с использованием мультиагентного моделирования и машинного обучения [21 – 22]. В работе [21] предложена программная реализация развитой мультиагентной модели эвакуации людей различных возрастных групп из помещений сложной формы. Для каждой возрастной группы было рассчитано и усреднено время полной эвакуации из помещения. Однако данная работа не учитывает нечеткий характер параметров сети, неточность и неполноту данных, а также не позволяет учесть различные критерии, влияющие на качество принимаемых решений. Кроме того, моделирование эвакуации осуществляется из помещений, что не позволяет применить данную модель к задачам массовой эвакуации при возникновении стихийных бедствий. В работе [22] предлагается объединение имитационных моделей эвакуации с методами машинного обучения для решения задач оценки эффективности управления эвакуации людей при пожарах в общественных зданиях. В работе представлена укрупненная структурная схема методики прогнозирования эффективности управления эвакуации людей с использованием методов машинного обучения. Однако в данной статье не представлено моделирование эвакуации, эксперименты, позволяющие сравнить эффективность разработанной модели с существующими. Кроме того, алгоритм, представленный структурной схемой, ориентирован на эвакуацию из помещений, не предназначен для решения задач массовой эвакуации людей на транспортных сетях, не включает блок принятия решения в нечетких условиях и не позволяет рассмотреть различные критерии эвакуации.

Зачастую принятие эвакуационных решений сопряжено со сложной стратегией реагирования, необходимостью учета различных факторов из разных областей, что требует экспертных знаний от разных лиц, принимающих решения (ЛПР) из разных областей [23 – 24]. В этой связи групповое принятие решений имеет наибольшее значение при эвакуационном реагировании. Кроме того, реагирование требует быстрых и эффективных решений о порядке, в котором будут эвакуированы люди из опасных зоны. Непрогнозируемые ЧС

происходят внезапно и влекут за собой трудности в определении наиболее безопасной стратегии эвакуации в убежища для транспортировки максимального количества эвакуируемых. В литературе по макроскопической эвакуации предлагается рассматривать критерий отдаленности от источника опасности как единственный критерий, влияющий на ранжирование эвакуационных стратегий [25]. Так как на приоритет того или иного убежища влияют и другие факторы, такие как вместимость помещения, которая задает верхний предел количества людей, находящихся в этом убежище, уровень безопасности помещения, близость к источнику опасности, сложность эвакуации и время на организацию эвакуации из этого места, то в работе предлагается учитывать эти критерии.

Лицам, принимающим решения об эвакуации, сложно дать точную оценку каждому критерию или указать численное значение при оценке опасных зон. Таким образом, процесс ПР требует включения нечетких рассуждений. Этот инструмент позволяет экспертам учитывать сомнения и уровень неопределенности при выборе конкретной оценки. В этом отношении теория нечетких множеств является полезным инструментом для оценки атрибутов в задачах многокритериального группового ПР (МКГПР). Нечеткие множества [14] изначально были предложены для представления неуверенности исследователя в виде функции принадлежности, имеющей уровни принадлежности относительно исходного множества. Развитие теории нечетких множеств привело к появлению различных обобщений нечетких множеств, призванных эффективнее обрабатывать возросший недостаток знаний и данных, сомнения экспертов, колебания при выборе функции принадлежности. Среди обобщений нечетких множеств выделяют нечеткие множества второго типа, нечеткие мультимножества, интуиционистские нечеткие множества, интуиционистские мягкие нечеткие множества, лингвистические аргументы, колеблющиеся нечеткие множества [26]. Нечеткое множество второго типа представляет принадлежность элемента множеству в виде нечёткого множества. Нечеткие мультимножества включают дублирующие элементы. Нечеткое колеблющееся множество (HFS) оперирует несколькими значениями степеней принадлежности [26]. Интуиционистское нечеткое множество состоит из функции принадлежности, функции непринадлежности и функции сомнения. МКГПР на основе интуиционистских нечетких множеств позволяет преобразовывать оценки лиц, принимающих решения, в нечеткие интуиционистские числа для эффективного моделирования. Именно наличие функции

сомнения обусловила выбор интуиционистских множеств для решения рассматриваемой в статье задачи.

В задачах ПР проблема определения весов атрибутов имеет важное значение. Подходы [27 – 28] оперируют весами атрибутов, заданными заранее, в то время как алгоритмы [29 – 30] предполагают, что веса атрибутов равны. Однако во время эвакуационного реагирования эти подходы не охватывают все аспекты входной информации, касающейся эвакуации: эксперты могут столкнуться с отсутствием знаний или недостаточной экспертизой по некоторым атрибутам. Более того, каждый эксперт имеет общий уровень надежности, который также необходимо учитывать. В связи с этим в этой статье веса экспертов отражают конкретные знания экспертов и не являются равными. В задачах реального ПР веса критериев не всегда точно известны. Если эксперты сомневаются и не имеют достаточной информации, они могут указать веса критериев в нечетком виде. Однако существующие подходы к нечёткому ПР не позволяют учесть нечёткие веса критериев. В этой связи предлагается оперировать нечёткими весами критериев в виде интуиционистских нечетких чисел.

С учетом рассмотренных подходов, их улучшений и модификаций предложен интегрированный алгоритм МГПР для выбора оптимальной стратегии при эвакуации. Данный алгоритм является многоуровневым, где на первом уровне осуществляется построение модели задачи в виде эвакуационной транспортной сети. На втором уровне производится ранжирование убежищ для нахождения их оптимального порядка на основе множества критериев. Определение приоритетности убежищ реализуется с помощью интуиционистского нечеткого гибридного оператора усреднения для учета неуверенности экспертов при оценке рассматриваемых критериев эвакуации. Предложенный гибридный оператор позволяет учесть веса критериев в виде нечетких интуиционистских значений на основе разработанных модифицированных операторов возведения нечетких чисел в нечеткую степень. На третьем уровне осуществляется макроскопическая потоковая динамическая эвакуация, позволяющая переместить максимальное количество людей из опасных зон.

Разработанный алгоритм опирается на теорию нечётких множеств, принятия решений в нечётких условиях и потоковую макроскопическую эвакуацию для эвакуации максимального числа людей за счет использования возможностей промежуточных вершин передавать дополнительный поток во все стоки в условиях неполноты

и неточности информации. Также разработанный алгоритм позволяет улучшить качество принимаемых решений в ситуациях, когда эксперты колеблются и сомневаются при оценке множества критериев эвакуации. К таким критериям были отнесены: вместимость помещения, которая задает верхний предел количества людей, находящихся в этом убежище, уровень безопасности помещения, близость к источнику опасности, сложность эвакуации и время на организацию эвакуации из этого места. Результаты алгоритма могут быть использованы как при эвакуации зданий, так и в задачах массовой эвакуации населения при масштабных ЧС.

2. Нечеткая логика, ее расширения и операторы агрегирования. Рассмотрим математический аппарат теории нечетких множеств, лежащий в основе разработанного метода принятия решений при эвакуации в нечеткой среде. Данный аппарат представляет собой обобщения нечётких множеств, а именно, интуиционистские нечёткие множества, позволяющие моделировать сомнения экспертов и их неуверенность при выборе конкретной степени принадлежности элемента нечёткому множеству более эффективно по сравнению с традиционными нечёткими множествами.

Нечеткая логика является эффективным методом объединения нескольких критериев с учетом опыта многих экспертов. Теория нечетких множеств, разработанная Л. Заде в 1965 году [31], стала мощным инструментом в различных областях современного общества. Среди них – система управления искусственным кардиостимулятором, химические реакторы и устройства, система контроля кровяного давления, система оповещения о сердечных заболеваниях, энергосистема, система управление дорожным движением, биомедицина [32]. Нечеткое множество расширяет характеристическую функцию, принимающую значение 0 или 1, до функции принадлежности, которая может принимать любое значение из закрытого интервала $[0,1]$. Рассмотрим концепцию нечеткого множества.

Определение 1. Пусть X – непустое множество. Нечеткое множество на множестве X – это множество F , такое что:

$$F = \{(x, \mu_F(x)); x \in X\}, \quad (1)$$

где $\mu_F: X \rightarrow [0,1]$ называется функцией принадлежности F . $\mu_A(x)$ показывает степень принадлежности элемента x множеству F и принимает значение из интервала $[0,1]$.

Однако функция принадлежности является только однозначной функцией, которая не может использоваться для выражения поддержки и возражения одновременно во многих практических ситуациях.

В задачах ПР, моделирования, управления системами эксперты могут не обладать точным или достаточным уровнем знаний о проблемной области из-за сложности социально-экономической среды. В таких случаях обычно присутствует некоторая неопределенность в предпочтениях экспертов относительно рассматриваемых объектов, тем самым демонстрируются характеристики утверждения, отрицания и колебания. Например, при голосовании, помимо «поддержки» и «возражения», обычно есть «воздержание», что указывает на колебание и неопределенность избирателя относительно объекта. Поскольку нечеткое множество не может быть использовано для полного выражения всей информации в таких проблемах, его применимость часто ограничена во многих практических ситуациях. Для таких ситуаций могут использоваться обобщения нечетких множеств, в частности, интуиционистские нечёткие множества. Это актуально и для задач ПР при эвакуационном моделировании, когда эксперт или группа экспертов не могут предоставить оценку эвакуационной альтернативы или критерия в виде конкретной степени принадлежности, а используют помимо степени принадлежности элемента нечеткому множеству также степень непринадлежности и степень сомнения. Рассмотрим аппарат теории интуиционистских нечётких множеств, позволяющий эффективно принимать решения при эвакуационном моделировании и реагировании в нечетких условиях и условиях неполноты информации, более подробно.

Атанассов в 1986 году [33] обобщил теорию нечетких множеств с помощью концепции интуиционистского нечеткого множества (IFS), которая включала степень сомнения (колебания) или функцию неопределенности, а также функцию принадлежности и функцию непринадлежности элемента множеству IFS. Интуиционистский индекс не обязательно равен нулю, как в нечетких множествах. Использование IFS обеспечивает всестороннее и целостное описание нечетких параметров, что обеспечивает получение эффективных результатов при исходной неопределенности.

Последние несколько десятилетий исследователи уделяли большое внимание изучению теории IFS и достигли значимых результатов [34]. Атанассов [33] предложил несколько основных операций над IFS, включая «пересечение», «объединение»,

«дополнение» и «возведение в степень». Обзор основных операторов агрегирования, лежащих в основе МГПР, представлен в работе [35]. Однако, поскольку изучение теории IFS расширяется как в глубину, так и в ширину, эффективные агрегирование и обработка интуиционистской нечеткой информации становятся необходимыми и все более важными.

Рассмотрим основные концепции, лежащие в основе теории IFS.

Определение 2. Пусть X – непустое множество. IFS на множестве X – это множество $\tilde{A}$ такое, что:

$$\tilde{A} = \{(x, \mu_A(x), \nu_A(x)); x \in X\}, \quad (2)$$

где $\mu_A(x): X \rightarrow [0,1]$ и $\nu_A(x): X \rightarrow [0,1]$ удовлетворяют условиям $0 \leq \mu_A(x) \leq 1$ для каждого $x \in X$.

$\pi_A(x)$ в $\tilde{A}$ называется степенью нерешительности, или пределом колебания, или функцией неопределенности, которая измеряет уровень нерешительности:

$$\pi_A(x) = 1 - \mu_A(x) - \nu_A(x). \quad (3)$$

Интуиционистским нечетким числом (IFN) [36] называется число $\alpha = (\mu_\alpha, \nu_\alpha)$, где $\mu_\alpha \in [0,1]$, $\nu_\alpha \in [0,1]$, $\mu_\alpha + \nu_\alpha \leq 1$.

Для сравнения IFN используется функция оценки $s(\alpha)$:

$$s(\alpha) = \mu_\alpha - \nu_\alpha, s(\alpha) \in [-1,1]. \quad (4)$$

Если IFN равны, их можно сравнить с помощью функции точности h [36]:

$$h(\alpha) = \mu_\alpha + \nu_\alpha, \quad (5)$$

где $h(\alpha)$ – степень точности $h(\alpha) = \mu_\alpha$. Чем больше $h(\alpha)$, тем выше степень точности IFN.

Определение 3. Пусть α_1 и α_2 два IFN; $s(\alpha_1)$ и $s(\alpha_2)$ – функции оценки этих значений; $h(\alpha_1)$ и $h(\alpha_2)$ – функции точности α , тогда:

- 1) Если $s(\alpha_1) < s(\alpha_2)$, то $\alpha_1 < \alpha_2$;
- 2) Если $s(\alpha_1) = s(\alpha_2)$, то
 - 2.1) если $h(\alpha_1) < h(\alpha_2)$, то $\alpha_1 > \alpha_2$;
 - 2.2) если $h(\alpha_1) > h(\alpha_2)$, то $\alpha_1 > \alpha_2$;
 - 2.3) если $h(\alpha_1) = h(\alpha_2)$, то $\alpha_1 = \alpha_2$ [36].

Пусть $\tilde{A} = (\mu_{\tilde{A}}, \nu_{\tilde{A}})$ и $\tilde{B} = (\mu_{\tilde{B}}, \nu_{\tilde{B}})$ – два IFN на множестве X ; тогда базовые операции с IFN определяются следующим образом:

$$\tilde{A} \oplus \tilde{B} = (\mu_{\tilde{A}}(x) + \mu_{\tilde{B}}(x) - \mu_{\tilde{A}}(x)\mu_{\tilde{B}}(x), \nu_{\tilde{A}}(x) \times \nu_{\tilde{B}}(x), x \in X). \quad (6)$$

$$k\tilde{A} = (1 - (1 - \mu_{\tilde{A}}(x))^k, \nu_{\tilde{A}}(x)^k, x \in X, k > 0. \quad (7)$$

$$\alpha^\lambda = (\mu_\alpha^\lambda, 1 - (1 - \nu_\alpha)^\lambda), \lambda > 0. \quad (8)$$

Процесс принятия решения в задачах эвакуации для выбора наилучших эвакуационных альтернатив требует агрегации всех входных данных в одно значение с помощью операторов агрегирования. До настоящего времени было предложено много операторов для агрегирования информации в различных средах принятия решений [37].

Наиболее распространенными операторами для агрегирования аргументов являются оператор взвешенного усреднения (WA), взвешенный геометрический оператор (WG), оператор упорядоченного взвешенного усреднения (OWA) и упорядоченный взвешенный геометрический оператор (OWG) [26, 36].

Первоначально данные операторы использовались для агрегации аргументов, принимающих значения из множества действительных чисел. Позже они были расширены для адаптации к неопределенным и нечетким лингвистическим средам [38 – 39].

Рассмотрим существующие операторы агрегирования:

Определение 4. Пусть $\alpha_j = (\mu_{\alpha_j}, \nu_{\alpha_j})$, $j=1, 2, \dots, n$ представляет собой коллекцию IFNs, тогда:

$$IFWA_\omega(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n) = \omega_1 \alpha_1 \oplus \omega_2 \alpha_2 \oplus \dots \oplus \omega_n \alpha_n, \quad (9)$$

где $\omega = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n)^T$ – весовой вектор, связанный с оператором α_j , $j=1, 2, \dots, n$, $\omega_j \in [0, 1]$ $j=1, 2, \dots, n$ и $\sum_{j=1}^n \omega_j = 1$.

Определение 5. Агрегированное значение, полученное с помощью оператора IFWA представляет собой

$$IFWA_\omega(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n) = (1 - \prod_{j=1}^n (1 - \mu_{\alpha_j})^{\omega_j}, \prod_{j=1}^n (\nu_{\alpha_j})^{\omega_j}). \quad (10)$$

Определение 6. Пусть $\alpha_j = (\mu_{\alpha_j}, \nu_{\alpha_j})$, $j=1,2,\dots,n$ представляет собой коллекцию IFNs, тогда

$$IFWG_{\omega}(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n) = \alpha_1^{\omega_1} \otimes \alpha_2^{\omega_2} \otimes \dots \otimes \alpha_n^{\omega_n}. \quad (11)$$

IFWG называется интуиционистским нечётким взвешенным геометрическим оператором (IFWG), где $\omega = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n)^T$ – вектор весов α_j , $j=(1,2,\dots,n)$, $\omega_j \in [0,1]$ $j=(1,2,\dots,n)$ и $\sum_{j=1}^n \omega_j = 1$.

Определение 7. Агрегированное значение, полученное с помощью оператора IFWG, представляет собой

$$IFWG_{\omega}(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n) = \left(\prod_{j=1}^n \mu_{\alpha_j}^{\omega_j}, 1 - \prod_{j=1}^n (1 - \nu_{\alpha_j})^{\omega_j} \right), \quad (12)$$

где $\omega = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n)^T$ – вектор весов α_j , $j=(1,2,\dots,n)$, $\omega_j \in [0,1]$ $j=(1,2,\dots,n)$ и $\sum_{j=1}^n \omega_j = 1$.

Оба оператора IFWA и IFWG сначала взвешивают все аргументы, а затем агрегируют эти взвешенные аргументы. Однако оператор IFWG гораздо более чувствителен к исходным аргументам.

Определение 8. Интуиционистский нечеткий упорядоченный оператор взвешенного усреднения (IFOWA) – это такое отображение, что $= (w_1, w_2, \dots, w_n)^T$, $w_j \in [0,1]$ $j=(1,2,\dots,n)$ and $\sum_{j=1}^n w_j = 1$.

$$IFOWA_w(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n) = w_1 \alpha_{\sigma(1)} \oplus w_2 \alpha_{\sigma(2)} \oplus \dots \oplus w_n \alpha_{\sigma(n)}, \quad (13)$$

где $(\sigma(1), \sigma(2), \dots, \sigma(n))$ является перестановкой $(1,2,\dots,n)$, такой что $\alpha_{\sigma(j-1)} \geq \alpha_{\sigma(j)}$ для j .

Определение 9. Агрегированное значение на основе оператора IFOWA – это интуиционистские нечёткие значения (IFV) в форме

$$IFOWA_w(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n) = \left(1 - \prod_{j=1}^n (1 - \mu_{\alpha_{\sigma(j)}})^{w_j}, \prod_{j=1}^n \nu_{\alpha_{\sigma(j)}}^{w_j} \right). \quad (14)$$

$w = (w_1, w_2, \dots, w_n)^T$ – вектор весов, связанный с оператором IFOWA, $w_j \in [0,1]$ $j=(1,2,\dots,n)$ и $\sum_{j=1}^n w_j = 1$.

Определение 10. Интуиционистский нечеткий упорядоченный взвешенный геометрический оператор (IFOWA) – это такое

отображение $w = (w_1, w_2, \dots, w_n)^T$, что $w_j \in [0,1]$ $j=(1,2,\dots,n)$ и $\sum_{j=1}^n w_j = 1$.

$$IFOWG_w(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n) = \alpha_{\sigma(1)}^{w_1} \otimes \alpha_{\sigma(2)}^{w_2} \otimes \dots \otimes \alpha_{\sigma(n)}^{w_n}, \quad (15)$$

где $(\sigma(1), \sigma(2), \dots, \sigma(n))$ – перестановка $(1,2,\dots,n)$, такая что $\alpha_{\sigma(j-1)} \geq \alpha_{\sigma(j)}$ для любых j .

Определение 11. Агрегированное значение с использованием оператора IFOWG – это IFN в форме

$$IFOWG_w(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n) = \left(\prod_{j=1}^n \mu_{\alpha_{\sigma(j)}}^{w_j}, 1 - \prod_{j=1}^n (1 - \nu_{\alpha_{\sigma(j)}})^{w_j} \right). \quad (16)$$

$w = (w_1, w_2, \dots, w_n)^T$ – это весовой вектор, связанный с оператором IFOWG, $w_j \in [0,1]$ $j=(1,2,\dots,n)$ и $\sum_{j=1}^n w_j = 1$.

Операторы IFOWA и IFOWG сначала переставляют заданные аргументы в порядке убывания, а затем взвешивают упорядоченные позиции этих аргументов. Упорядоченные взвешенные операторы агрегируют упорядоченные аргументы и веса их упорядоченных позиций, поэтому аргумент не связан с определенным весом. Вместо этого определенный вес связан с определенной упорядоченной позицией аргументов.

Вышеупомянутые операторы IFWA и IFWG назначают веса заданным IFN, тогда как операторы IFOWA и IFOWG назначают веса упорядоченным позициям указанных чисел. Однако каждый из операторов рассматривает один аспект. Чтобы объединить эти два аспекта, были предложены интуиционистские нечёткие операторы гибридного усреднения (IFHA) [40], которые взвешивают предопределенные IFN и их упорядоченные позиции.

Определение 12. Оператор IFHA представляет собой такое отображение, что

$$IFHA_{\omega,w}(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n) = w_1 \hat{\alpha}_{\sigma(1)} \oplus w_2 \hat{\alpha}_{\sigma(2)} \oplus \dots \oplus w_n \hat{\alpha}_{\sigma(n)}, \quad (17)$$

где $w = (w_1, w_2, \dots, w_n)^T$ – вектор весов, связанный с оператором IFHA, $w_j \in [0,1]$, $j=(1,2,\dots,n)$ и $\sum_{j=1}^n w_j = 1$. $\hat{\alpha}_j = n\omega_j\alpha_j$, $j=1,2,\dots,n$, $\hat{\alpha}_{\sigma(1)}, \hat{\alpha}_{\sigma(2)}, \dots, \hat{\alpha}_{\sigma(n)}$ – перестановка взвешенных IFNs, таких что $(\hat{\alpha}_1, \hat{\alpha}_2, \dots, \hat{\alpha}_n)$, $\hat{\alpha}_{\sigma(j)} \geq \hat{\alpha}_{\sigma(j+1)}$, $(j=1,2,\dots,n-1)$; $\omega = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n)^T$ –

вектор весов α_j , $j=(1,2,...,n)$, $\omega_j \in [0,1]$ $j=(1,2,...,n)$ и $\sum_{j=1}^n \omega_j = 1$. Коэффициент балансировки равен n .

Определение 13. Пусть $\hat{\alpha}_{\sigma(j)} = (\mu_{\hat{\alpha}_{\sigma(j)}}, \nu_{\hat{\alpha}_{\sigma(j)}})$, $(j=1,2,...,n)$.

Агрегированное значение с использованием оператора IFHA – это IFN в форме:

$$IFHA_{\omega,w}(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n) = (1 - \prod_{j=1}^n (1 - \mu_{\hat{\alpha}_{\sigma(j)}})^{\omega_j} \prod_{j=1}^n \nu_{\hat{\alpha}_{\sigma(j)}}^{\omega_j}). \quad (18)$$

Определение 14. Интуиционистский нечеткий гибридный геометрический оператор (IFHG) – это такое отображение, что

$$IFHG_{\omega,w}(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n) = \hat{\alpha}_{\sigma(1)}^{w_1} \otimes \hat{\alpha}_{\sigma(2)}^{w_2} \otimes \dots \otimes \hat{\alpha}_{\sigma(n)}^{w_n}, \quad (19)$$

где $\hat{\alpha}_j = \alpha_j^{n\omega_j}$, $j=(1,2,...,n)$, $(\hat{\alpha}_{\sigma(1)}, \hat{\alpha}_{\sigma(2)}, \dots, \hat{\alpha}_{\sigma(n)})$ – перестановка взвешенных IFNs, таких что $(\hat{\alpha}_1, \hat{\alpha}_2, \dots, \hat{\alpha}_n)$, $\hat{\alpha}_{\sigma(1)} \geq \hat{\alpha}_{\sigma(j+1)}$, $(j=1,2,...,n-1)$;

Определение 15. Пусть $\hat{\alpha}_{\sigma(j)} = (\mu_{\hat{\alpha}_{\sigma(j)}}, \nu_{\hat{\alpha}_{\sigma(j)}})$, $(j=1,2,...,n)$.

Агрегированное значение, полученное с помощью оператора IFHG – это IFN в виде

$$IFHG_{\omega,w}(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n) = \left(\prod_{j=1}^n \mu_{\hat{\alpha}_{\sigma(j)}}^{\omega_j}, 1 - \prod_{j=1}^n (1 - \nu_{\hat{\alpha}_{\sigma(j)}})^{\omega_j} \right). \quad (20)$$

Гибридные операторы IFHA и IFHG требуют выполнения следующих шагов:

1. Взвесить IFNs $\alpha_j, j=(1,2,...,n)$ в соответствии со значениями связанных весов $\omega_j, j=(1,2,...,n)$ и найти $\omega_j \alpha_j$ или $\alpha_j^{\omega_j} j=(1,2,...,n)$. Затем умножить полученные значения на балансировочный коэффициент n , чтобы найти взвешенные IFNs $n\omega_j \alpha_j$ или $\alpha_j^{n\omega_j} j=(1,2,...,n)$.

2. Переупорядочить взвешенные IFNs $\hat{\alpha} = n\omega_j \alpha_j$ или $\hat{\alpha} = \alpha_j^{n\omega_j}, j=(1,2,...,n)$ в порядке убывания, $(\hat{\alpha}_{\sigma(1)}, \hat{\alpha}_{\sigma(2)}, \dots, \hat{\alpha}_{\sigma(n)})$ или $(\hat{\alpha}_{\sigma(1)}, \hat{\alpha}_{\sigma(2)}, \dots, \hat{\alpha}_{\sigma(n)})$, где $\hat{\alpha}_{\sigma(j)}$ – это j -ое наибольшее значение $n\omega_i \alpha_i, i=(1,2,...,n)$, и $\hat{\alpha}_{\sigma(j)}$ – это j -ое наибольшее значение $\alpha_j^{n\omega_j} j=(1,2,...,n)$.

3. Взвесить полученные упорядоченные веса IFNs $\hat{\alpha}_{\sigma(j)}$ или $\hat{\alpha}_{\sigma(j)}^w$ $j=(1,2,...,n)$ с использованием весов IFHA или IFHG w_j $j=(1,2,...,n)$. Наконец, агрегировать все взвешенные IFNs $w_j\hat{\alpha}_{\sigma(j)}$ или $\hat{\alpha}_{\sigma(j)}^w$ $j=(1,2,...,n)$ в коллективное значение.

Рассмотрев и проанализировав существующие операторы агрегирования, заметим, что в задачах реального принятия решений веса критериев не всегда представляются в четком виде. Если эксперты сомневаются при выборе весовых коэффициентов, то веса критериев следует задавать в виде интуиционистских нечетких чисел. Традиционные операторы агрегирования не позволяют управлять нечеткими весами критериев. В связи с этим в работе предлагается методика, позволяющая оперировать нечеткими весами критериев и приводящая к эффективному ПР в случае сомнений и колебаний экспертов, их неуверенности при выборе степеней принадлежности.

3. Модифицированные операторы агрегирования с нечеткими весами критериев. Введем модифицированные операторы агрегирования, позволяющие управлять нечеткими весами критериев, лежащие в основе интуиционистского нечеткого гибридного оператора усреднения. Данный оператор будет использован для ранжирования эвакуационных альтернатив, представляющий собой помещения для эвакуации с целью максимизации числа спасенных людей.

Пусть $\alpha = (\mu_r, \nu_r)$, $\alpha_1 = (\mu_{r_1}, \nu_{r_1})$ и $\alpha_2 = (\mu_{r_2}, \nu_{r_2})$ – три IFVs, $k > 0$. Тогда справедливы следующие законы [36]:

- (1) $\alpha_1 \oplus \alpha_2 = (\mu_{r_1} + \mu_{r_2} - \mu_{r_1}\mu_{r_2}, \nu_{r_1}\nu_{r_2})$;
- (2) $\alpha_1 \otimes \alpha_2 = (\mu_{r_1}\mu_{r_2}, \nu_{r_1} + \nu_{r_2} - \nu_{r_1}\nu_{r_2})$;
- (3) $k\alpha = (1 - (1 - \mu_r)^k, \nu_r^k)$;
- (4) $\alpha^k = (\mu_r^k, 1 - (1 - \nu_r)^k)$.

Пусть $\alpha = (\mu_r, \nu_r)$ и $\tau = (\lambda, \theta)$ – два IFVs. Учитывая операционный закон (3) и равенство $IFWA_\omega(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n) = \omega_1\alpha_1 \oplus \omega_2\alpha_2 \oplus \dots \oplus \omega_n\alpha_n$, получаем

$$\tau\alpha = (1 - (1 - \mu_r)^\lambda, \nu_r^{1-\theta}). \quad (21)$$

Учитывая операционный закон (4) и равенство $IFWG_\omega(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n) = \alpha_1^{\omega_1} \otimes \alpha_2^{\omega_2} \otimes \dots \otimes \alpha_n^{\omega_n}$, получаем

$$\alpha^\tau = (\mu_r^{1-\theta}, 1 - (1 - \nu_r)^\lambda). \quad (22)$$

Таким образом, модифицированные операторы агрегирования с интуиционистскими нечеткими весами критериев представляются в виде:

$$IFWA_{\tau}(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n) = \tau_1 \alpha_1 \oplus \tau_2 \alpha_2 \oplus \dots \oplus \tau_n \alpha_n = \\ \left(1 - \prod_{j=1}^n (1 - \mu_{\alpha_j})^{\lambda_j}, \prod_{j=1}^n (v_{\alpha_j})^{1-\theta_j} \right). \quad (23)$$

$$IFWG_{\tau}(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n) = \alpha_1^{\tau_1} \otimes \alpha_2^{\tau_2} \otimes \dots \otimes \alpha_n^{\tau_n} = \\ \left(\prod_{j=1}^n \mu_{\alpha_j}^{1-\theta_j}, 1 - \prod_{j=1}^n (1 - v_{\alpha_j})^{\lambda_j} \right). \quad (24)$$

$$IFOWA_w(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n) = \tau_1 \alpha_{\sigma(1)} \oplus \tau_2 \alpha_{\sigma(2)} \oplus \dots \oplus \tau_n \alpha_{\sigma(n)} \\ = \left(1 - \prod_{j=1}^n (1 - \mu_{\alpha_{\sigma(j)}})^{\lambda_j}, \prod_{j=1}^n v_{\alpha_{\sigma(j)}}^{1-\theta_j} \right). \quad (25)$$

$$IFOWG_w(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n) = \alpha_{\sigma(1)}^{\tau_1} \otimes \alpha_{\sigma(2)}^{\tau_2} \otimes \dots \otimes \alpha_{\sigma(n)}^{\tau_n} \\ = \left(\prod_{j=1}^n \mu_{\alpha_{\sigma(j)}}^{1-\theta_j}, 1 - \prod_{j=1}^n (1 - v_{\alpha_{\sigma(j)}})^{\lambda_j} \right). \quad (26)$$

С учетом вышеизложенного модифицированные гибридные операторы представляются следующим образом: IFHA и IFHG.

Согласно операционному закону (3) и равенству $IFHA_{\omega, w}(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n) = w_1 \hat{\alpha}_{\sigma(1)} \oplus w_2 \hat{\alpha}_{\sigma(2)} \oplus \dots \oplus w_n \hat{\alpha}_{\sigma(n)}$, получаем

$$IFHA_{\tau, w} = w_1 \hat{\alpha}_{\sigma(1)} \oplus w_2 \hat{\alpha}_{\sigma(2)} \oplus \dots \oplus w_n \hat{\alpha}_{\sigma(n)} = \\ \left(1 - \prod_{j=1}^n (1 - \mu_{\hat{\alpha}_{\sigma(j)}})^{w_j} \prod_{j=1}^n v_{\hat{\alpha}_{\sigma(j)}}^{w_j} \right), \text{ где } \hat{\alpha}_j = n \tau_j \alpha_j = \\ \left(1 - \prod_{j=1}^n (1 - \mu_{\alpha_j})^{n \lambda_j}, \prod_{j=1}^n (v_{\alpha_j})^{n(1-\theta_j)} \right). \quad (27)$$

Согласно операционному закону (4) и равенству $IFHG_{\omega, w}(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n) = \hat{\alpha}_{\sigma(1)}^{w_1} \otimes \hat{\alpha}_{\sigma(2)}^{w_2} \otimes \dots \otimes \hat{\alpha}_{\sigma(n)}^{w_n}$, получаем

$$IFHG_{\tau, w} = \hat{\alpha}_{\sigma(1)}^{w_1} \otimes \hat{\alpha}_{\sigma(2)}^{w_2} \otimes \dots \otimes \hat{\alpha}_{\sigma(n)}^{w_n} = \\ \left(\prod_{j=1}^n \mu_{\hat{\alpha}_{\sigma(j)}}^{w_j}, 1 - \prod_{j=1}^n (1 - v_{\hat{\alpha}_{\sigma(j)}})^{w_j} \right), \text{ where } \hat{\alpha}_j = \alpha_j^{n \omega_j} = \\ \left(\prod_{j=1}^n \mu_{\alpha_j}^{n(1-\theta_j)}, 1 - \prod_{j=1}^n (1 - v_{\alpha_j})^{n \lambda_j} \right). \quad (28)$$

Построенные модифицированные нечеткие операторы позволяют работать с интуиционистскими нечеткими весами критериев и лежат в основе интуиционистского нечеткого гибридного оператора усреднения, которые эффективно применяется для многокритериального группового принятия решений по выбору оптимальной стратегии эвакуации. Под стратегией эвакуации понимается порядок расположения помещений для эвакуации в эвакуационной сети, которая представлена транспортной сетью.

4. Постановка задачи динамической макроскопической эвакуации. Представим основные определения, лежащие в основе макроскопической эвакуации людей при эвакуации. Под макроскопической эвакуацией понимается эвакуации людей как потока без учета индивидуальных характеристик отдельного человека. При макроскопической эвакуации моделью эвакуационной сети является графовые и гиперграфовые представления транспортных сетей [5, 7, 17 – 19]. Эвакуационная сеть определяется как транспортная сеть, соответствующая территории (или зданию), подлежащим эвакуации, где пересечения дорог (или помещения в здании) представляют собой узлы сети (вершины), а связи между ними (дороги на эвакуационной территории или коридоры) обозначаются рёбрами (дугами). В такой сети есть источники – области, подвергшиеся опасности, из которых осуществляется транспортировка, и стоки – убежища, представляющие собой безопасные области или помещения, куда перемещают людей. Все остальные узлы таких сетей называют промежуточными (пересечения дорог или помещения). Изначально эвакуируемые находятся в вершинах-источниках, а впоследствии осуществляется транспортировка в безопасные зоны – вершины-стоки. Вершины и рёбра эвакуационной сети ограничены пропускными способностями, отражающими максимальную величину эвакуационного потока, который может проходить по этому ребру или размещаться в узле. Группа эвакуируемых, проходящая через сеть с течением времени, моделируется как поток. План эвакуации зависит от количества источников, стоков, параметров, заданных на дугах и узлах, таких как постоянные, зависящие от времени или зависящие от потока пропускные способности или параметры времени прохождения, а также дополнительных ограничений. Алгоритм является универсальным и позволяет моделировать изменения в пропускных способностях в зависимости от различных факторов. Например, если в здании установлены газоанализаторы, показывающие уровень задымления, пропускная способность будет снижаться. Если

рассматривается транспортная сеть, то пропускные способности могут изменяться в зависимости от времени отправления потока эвакуируемых с учетом часов пик и пробок. Кроме того, уменьшение пропускных способностей может быть связано с обрушением деревьев на дороге, обвалом зданий другими препятствиями, возникающими на конкретном эвакуационном пути.

Приведем постановку задачи эвакуации с учетом предложенной нечеткой логики.

Определение 16. Нечеткая динамическая сеть $\tilde{G} = (X, \tilde{A})$ представляет собой сеть, включающую два множества: множество узлов $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ и множество дуг $\tilde{A} = \{ \langle \mu_A < x_i, x_j \rangle / \langle x_i, x_j \rangle \rangle, \langle x_i, x_j \rangle \in X^2 \}$ с определенной функцией принадлежности $\mu_A(x_i, x_j)$ [17].

Дана нечеткая эвакуационная динамическая сеть в виде ориентированного графа $\tilde{G} = (X, \tilde{A}, \tilde{u}(a), \tilde{u}(x), \tau, S, I, D, T)$, где X – множество узлов, $|X| = n$; $\tilde{A}$ – множество нечетких дуг, $|\tilde{A}| = m$; $\tilde{u}(a)$ обозначает нечеткую пропускную способность дуги $\tilde{a} \in \tilde{A}$. Нечеткая пропускная способность $\tilde{u}(a)$ для всех $\tilde{a} = (x_i, x_j) \in A$ указывает максимальный объем потока, который может войти в дугу a из ее хвоста x_i за период времени. Следовательно, если поток стартует из x_i в момент времени θ , чтобы двигаться в x_j , он достигает x_j в момент времени $\theta + \tau(a)$. $\tilde{u}(x)$ обозначает пропускную способность узла x , которая ограничивает объем потока, разрешенный для хранения в x ; $\tau(a)$ – время прохождения дуги $\tilde{a} \in \tilde{A}$, необходимое потоку для прохождения от хвоста до головы узла; S – множество источников; I – множество промежуточных узлов (все вершины сети кроме источников и стоков); D – множество стоков, T – заданный параметр, отражающий возможный период времени, в течение которого должна быть завершена эвакуация. T делится на временные шаги $T = \{0, 1, \dots, T\}$. Для $\tilde{a} \in \tilde{A}$, $\tilde{u}(a) \geq 0$ и $\forall x \in X$, $\tilde{u}(x) \geq 0$.

Для дуги $\tilde{a} = (x_i, x_j) \in A$ узел $x_i \in X$ известен как хвостовой узел $tail(a) = x_i$. $x_j \in X$ рассматривается как головной узел $head(a) = x_j$. Множество дуг, исходящих из узла x_i , равно $L(x_i) = \{(x_i, x_j) \in \tilde{A}, x_i \in X\}$, а множество входящих дуг в узел x_i равно $E(x_i) = \{(x_i, x_j) \in \tilde{A}, x_i \in X\}$.

Определение 17. Пусть $\tilde{G} = (X, \tilde{A}, \tilde{u}(a), \tilde{u}(x), \tau, S, I, D, T)$ – исходная динамическая сеть. «Расширенная во времени» копия исходной динамической сети – это статическая сеть $\tilde{G}^* = (X^*, \tilde{A}^*)$, в которой $X^* = \{x_i(\theta) : x_i \in X, \theta = 0, 1, \dots, T\}$. Если поток может быть

сохранен в узлах, предполагаем, что существуют промежуточные дуги удержания $\tilde{A}^H = \{(x_i(\theta), x_i(\theta + 1)), x_i \in X, \theta = 0, 1, \dots, T\}$. Таким образом, множество дуг $\tilde{A}^*$ статической развернутой во времени сети $A^* = \tilde{A}^H \cup \tilde{A}^M$, где $\tilde{A}^M$ является множеством дуг движения $\tilde{A}^M = \{(x_i(\theta), x_i(\theta + \tau(x_i, x_j))), (x_i, x_j) \in X, \theta = 0, 1, \dots, T\}$.

Приведем модифицированную постановку задачи с учетом промежуточного хранения. Пусть $\tilde{G} = (X, \tilde{A}, \tilde{u}(a), \tilde{u}(x), \tau, S, I, D, T)$ – динамическая эвакуационная сеть [41 – 42] учитывающая возможность промежуточных вершин сохранять и перемещать эвакуационный поток в убежища (промежуточное хранение), $\tilde{v}$ – динамический поток $S \rightarrow D$, такой что $A \times T \rightarrow \mathbb{R}^+$, и $\tilde{v}(x_i, \theta), I \times T \rightarrow \mathbb{Z}^+$ – объем потока, который хранится в промежуточных узлах в течение времени $\theta \in T$. Таким образом, динамическая модель потока с промежуточным хранением задается в уравнениях (29)-(32):

$$val(\tilde{v}, T) = \sum_{a \in L(S)} \sum_{\vartheta=0}^T \tilde{v}(a, \vartheta) = \sum_{a \in E(D)} \sum_{\vartheta=\tau(a)}^T \tilde{v}(a, \vartheta - \tau(a)) + \sum_{x_i \in I, u(x_i) > 0} \tilde{v}(x_i, T) \rightarrow \max, \quad (29)$$

$$\begin{aligned} val(\tilde{v}, \theta) &= \sum_{a \in E(x_i)} \sum_{\vartheta=\tau(a)}^T \tilde{v}(a, \vartheta - \tau(a)) \\ &- \sum_{a \in L(x_i)} \sum_{\vartheta=0}^T \tilde{v}(a, \vartheta) \geq 0, \forall x_i \in I, \theta \in T. \end{aligned} \quad (30)$$

$$0 \leq \tilde{v}(a, \theta) \leq \tilde{u}(a, \theta), \forall a \in \tilde{A}, \theta \in T, \quad (31)$$

$$0 \leq \tilde{v}(x_i, \theta) \leq \tilde{u}(x_i), \forall x_i \in I, \theta \in T. \quad (32)$$

где $val(\tilde{v})$ максимизирует целевую функцию (29) относительно ограничений (30-32). Уравнение (30) иллюстрирует, что общий объем эвакуационного потока из источников не обязательно достигает стоков, но может быть размещен в промежуточных узлах без нарушения ограничений пропускной способности узлов для дальнейшего перемещения в безопасные зоны. Уравнения (31-32) показывают верхние пределы эвакуационного потока вдоль дуги и в промежуточных узлах.

В работе для максимизации числа спасенных жизней предлагается транспортировать эвакуационный поток сначала в убежища-стоки, после чего осуществлять транспортировку людей из промежуточных вершин-помещений с учетом ограниченных пропускных способностей. Разработанный подход реализует перемещение максимального числа эвакуируемых из опасных зон как сумму числа эвакуируемых в безопасные зоны и избыточного эвакуационного потока, который не достигает пунктов назначения. Избыточный поток сохраняется в промежуточных узлах в течение заданного времени, а затем перемещается в безопасные зоны. При этом порядок перемещения потока из промежуточных узлов в безопасные зоны определяется с помощью многокритериального группового принятия решений на основе интуиционистского нечеткого гибридного оператора усреднения.

5. Интегрированный нечеткий алгоритм принятия решений при эвакуации. Процесс принятия многокритериальных решений на основе оператора агрегации IFNA в работе представляется следующим образом. Задан набор, состоящий из n эвакуационных альтернатив $A = \{A_1, A_2, \dots, A_n\}$ (узлы, из которых необходимо эвакуировать людей) и m атрибутов $X = \{X_1, X_2, \dots, X_m\}$ (критерии, влияющие на эвакуацию: вместимость помещения, легкость эвакуации, уровень безопасности помещения, время организации эвакуации из этого места и отдаленность от источника опасности.). Пусть $\omega = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_m)^T$ – весовой вектор атрибутов, $\omega_j \in [0,1]$ $j=(1,2,\dots,n)$ и $\sum_{j=1}^n \omega_j = 1$. Группа экспертов дает оценки альтернативам с помощью интуиционистских значений. Каждое значение IFS A_i задается уравнением (2) и указывает на то, что эксперты сомневаются и имеют некоторый уровень колебаний. В уравнении (2), $\mu_{A_i}(x_j)$ – функция принадлежности, которая указывает на уровень уверенности эксперта относительно критериев x_j ; $\nu_{A_i}(x_j)$ – функция непринадлежности, которая показывает, в какой степени альтернатива A_i не соответствует критериям x_j . Существует индекс неопределенности, который измеряет уровень колебаний по уравнению (3). Далее обрабатывается интуиционистская нечеткая матрица принятия решений, элементы которой $r'_{ij} = (r_m, r_n)$ указывают, что альтернатива A_i удовлетворяет критериям x_i (r_m); и наоборот, r_n показывает, что альтернатива не удовлетворяет критериям x_i .

Для реализации концепций интуиционистских нечётких множеств, принятия решений и нечетких интуиционистских операторов агрегирования и макроскопической эвакуации в

транспортной сети разработан интегрированный алгоритм, состоящий из трех уровней, структурная схема которого представлена на рисунке 2.

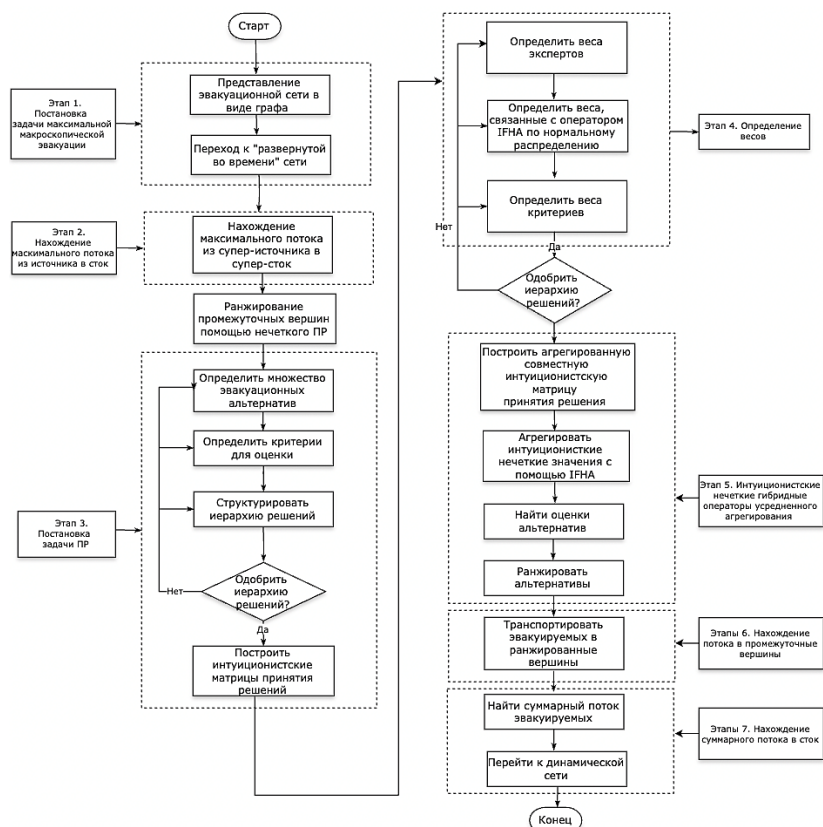


Рис. 2. Структурная схема интегрированного алгоритма принятия нечетких эвакуационных решений

Представленный алгоритм включает в себя следующие этапы. На первом этапе эвакуационная сеть представляется в виде динамического графа, и осуществляется переход к «развернутой во времени» сети. На втором этапе ищется максимальный поток из источника в стоки. Для транспортировки потока, оставшегося в промежуточных вершинах, реализуется перемещение людей из вершин-не стоков. Перемещение осуществляется из вершин, проранжированных по различным критериям согласно нечеткому

групповому принятию решений (этап 3). Для реализации этих целей вычисляются веса экспертов и критериев, а также веса, связанные с используемым оператором агрегирования IFНА (этап 4). На пятом этапе строятся агрегированные матрицы и применяются модифицированные операторы IFНА для оценки альтернатив. После нахождения списка промежуточных вершин на шестом этапе осуществляется транспортировка потока в сток из промежуточных вершин. Итоговый эвакуационный поток вычисляется на седьмом этапе.

Рассмотрим работу предложенного интегрированного алгоритма, включающего в себя нечеткое групповое принятие решений на основе модифицированного оператора IFНА, позволяющего работать с нечеткими интуиционистскими весами критериев, и нечеткую динамическую макроскопическую эвакуацию для транспортировки максимального числа людей в безопасные зоны более подробно.

Ввод исходных данных: Дана нечеткая динамическая сеть $\tilde{G} = (X, \tilde{A}, \tilde{u}_{ij}, \tilde{u}(x_i), \tau, S, I, D, T)$, $D = \{d_1, d_2, \dots, d_r\}$, $I = \{x_1, x, \dots, x_t\}$, $T = \{0, 1..T\}$, где $\tilde{u}_{ij} = \tilde{u}(a)$ с одним источником и несколькими стоками.

1. Производится переход к «расширенной во времени» статической сети $\tilde{G}^e = (X, \tilde{E}, \tilde{u}^e(\theta), \tau^e(\theta), S, I, D, T)$, $D = \{d_1, d_2, \dots, d_r\}$, $I = \{x_1, x, \dots, x_t\}$, $T = \{0, 1..T\}$, где $X^e = x_i(\theta) | x_i \in X; \theta = 0, 1, 2..T$. «Развернутое во времени» множество дуг $\tilde{E}^e$ определяется как $\tilde{E}^e = x_i(\theta), x_j(\vartheta) | (x_i, x_j) \in \tilde{E}; \theta = \vartheta + \tau_{ij}(\theta) \leq T; \theta = 0, 1, 2..T$. Добавляется супер-источник и супер-сток для соединения с несколькими источниками и одним стоком в каждый период времени. Введенные дуги имеют бесконечные дуговые способности.

2. Находится оптимальный порядок транспортировки пострадавших в безопасные места и промежуточные узлы [42 – 44]:

2.1. Определяется оптимальный порядок транспортировки пострадавших в безопасные места во время эвакуации. Здесь источники, стоки или промежуточные узлы для эвакуации задаются конечным набором альтернатив $A = \{A_1, A_2, \dots, A_n\}$, а экспертам $D_k, (k = 1, 2, \dots, s)$, принимающим решения, назначаются веса важности ω_k , где $\omega_k \geq 0, m(k = 1, 2, \dots, s), \sum_{k=1}^s \omega_k = 1$. Эксперты D_k оценивают альтернативы согласно критериям, представляя оценки в виде IFNs.

2.2. Осуществляется нормализация критериев. А также значения типа «затрат» преобразуются в значения типа «выгод» и

строится новая интуиционистская нечеткая матрица решений $R' = (r'_{ij})_{n \times m}$:

$$r_{ij} = (\mu_{ij}, \nu_{ij}) = \begin{cases} r'_{ij}, \text{ для атрибутов типа "выгоды",} \\ -\bar{r}'_{ij}, \text{ для атрибутов типа "затраты",} \end{cases} \quad (33)$$

где $\bar{r}'_{ij}$ – дополнение r'_{ij} , такое что $\bar{r}'_{ij} = (r_n, r_m)$.

2.3. Вычисляются веса экспертов на основе лингвистических термов. Пусть $\tilde{A}_e = \{\mu_{\tilde{A}_e}, \nu_{\tilde{A}_e}, \pi_{\tilde{A}_e}\}$ – интуиционистская нечеткая оценка e -ого эксперта. тогда вес эксперта ω_e определяется по формуле:

$$\omega_e = \frac{[\mu_e + \pi_e(\mu_e/(\mu_e + \nu_e))]}{\sum_{e=1}^k [\mu_e + \pi_e(\mu_e/(\mu_e + \nu_e))]} \quad (34)$$

где $\omega_e \in [0,1]$ и μ_e – оценка степени принадлежности e -ого эксперта, ν_e – оценка степени непринадлежности e -ого эксперта, π_e – оценка урвнения сомнения e -ого эксперта.

2.4. Реализуется механизм, основанный на нормальном распределении f [26, 36] для вычисления взвешенного вектора, используемого в операторе IFNA, $w = (w_1, w_2, \dots, w_n)^T$, $w_j \in [0,1]$, $j=(1,2,\dots,n)$ и $\sum_{j=1}^n w_j = 1$.

Из литературных источников и в мировой практике ученые из различных стран [26, 45 – 46] используют метод на основе нормального распределения для вычисления весов. Данный метод является широко используемым для вычисления весов в принятии решений, так как его реализация позволяет устранить предвзятость или предпочтения экспертов, влияющие на конечные результаты за счет высоких или низких значений этих аргументов, что приводит к некорректным оценкам.

Заметим, что многокритериальное групповое принятие решений согласно [36, 47 – 48] требует опыта и знаний экспертов. Для этого формируется набор из n значений предпочтений. При этом предвзятость или предпочтения экспертов влияют на конечные результаты за счет высоких или низких значений этих аргументов, что приводит к некорректным оценкам. Чтобы предотвратить эту проблему, эксперты назначают низкие веса субъективным аргументам. Таким образом, чем ближе значение предпочтения к медианным значениям, тем больше вес, и, наоборот, чем дальше значение

предпочтения от медианного значения, тем меньше вес. Данный механизм реализуется следующим образом.

Пусть $w = (w_1, w_2, \dots, w_n)^T$ – вектор весов оператора OWA, тогда справедливо следующее равенство:

$$w_i = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_n}} e^{-[(i-\mu_n)^2/2\sigma_n^2]}, i = 1, 2, \dots, n, \quad (35)$$

где μ_n – среднее значение совокупности из n чисел и $\sigma_n > 0$ – стандартное отклонение совокупности. μ_n и σ_n находятся по формулам:

$$\mu_n = \frac{1}{n} \frac{n(1+n)}{2} = \frac{1+n}{2}. \quad (36)$$

$$\sigma_n = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (i - \mu_n)^2} \quad (37)$$

Учитывая, что $w_j \in [0, 1]$ и $\sum_{j=1}^n w_j = 1$, справедливо равенство:

$$w_i = \frac{\frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_n}} e^{-[(i-\mu_n)^2/2\sigma_n^2]}}{\sum_{j=1}^n \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_n}} e^{-[(j-\mu_n)^2/2\sigma_n^2]}} = \frac{e^{-[(i-\mu_n)^2/2\sigma_n^2]}}{\sum_{j=1}^n e^{-[(j-\mu_n)^2/2\sigma_n^2]}}, i = 1, 2, \dots, n. \quad (38)$$

2.5. Определяются веса критериев на основе нечеткого интуиционистского оператора взвешенного усреднения (IFWA). Если $w_j^k = \{\mu_j^k, \nu_j^k, \pi_j^k\}$ – интуиционистская нечеткая оценка j -го критерия k -м лицом, принимающим решение, то W представляет собой общий уровень важности всех экспертов. Вес критерия в виде лингвистических термов определяется на основе следующего выражения:

$$\begin{aligned} w_j &= IFWA(w_j^1, w_j^2, \dots, w_j^e) = \bigoplus_{e=1}^k \omega_e w_j \\ &= \left(1 - \prod_{e=1}^k (1 - \mu_{ij}^e)^{\omega_e}, \prod_{e=1}^k (\nu_{ij}^e)^{\omega_e} \right). \end{aligned} \quad (39)$$

2.6. Строится агрегированная коллективная нечеткая интуиционистская матрица решений (AIFDM) из индивидуальных исходных интуиционистских нечетких матриц решений (IFDM), значения которых представлены в виде лингвистических термов. Агрегированная коллективная матрица состоит из общей оценки альтернатив. Пусть $R^{(e)} = (r_{ij}^{(e)})_{m \times n}$ – IFDM каждого эксперта и $\omega = \{\omega_1, \omega_2, \omega_3, \dots, \omega_k\}$ – это вес эксперта, тогда:

$$r_{ij} = IFWA(r_{ij}^1, r_{ij}^2, \dots, r_{ij}^e) = \bigoplus_{e=1}^k \omega_e r_{ij} = \left(1 - \prod_{e=1}^k (1 - \mu_{ij}^e)^{\omega_e}, \prod_{e=1}^k (\nu_{ij}^e)^{\omega_e} \right). \quad (40)$$

2.7. Реализуется модифицированный оператор $IFHA$, учитывающий интуиционистские нечеткие веса критериев для нахождения нечетких оценок альтернатив:

$$r_{ij} = IFHA_{\tau, w}(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n) = \left(1 - \prod_{j=1}^n (1 - \mu_{\hat{\alpha}_{\sigma(j)}})^{w_j} \prod_{j=1}^n \nu_{\hat{\alpha}_{\sigma(j)}}^{w_j} \right), \text{ where } \hat{\alpha}_j = n\tau_j\alpha_j = \left(1 - \prod_{j=1}^n (1 - \mu_{\alpha_j})^{n\lambda_j}, \prod_{j=1}^n (\nu_{\alpha_j})^{n(1-\theta_j)} \right), \tau_j = (\lambda_j, \theta_j). \quad (41)$$

2.8. Вычисляются оценки $s(r_i)$ агрегированных интуиционистских значений согласно уравнениям (3)-(4).

2.9. Производится ранжирование этих оценок $s(r_i)$ для нахождения оптимального порядка убежищ для эвакуации. Если оценки $s(r_i)$ равны $s(r_j)$, то реализуется уравнение (5).

3. Производится приоритетное упорядочивание: $\forall x_k \in I$, определение их порядка и вычисление ранга на основе шагов 2.1–2.9.

Выход первого этапа алгоритма: ранжированные вершины графа.

4. Осуществляется переход к модифицированной динамической сети $\tilde{G}_m = (X_m, \tilde{A}_m, \tilde{u}_{ij}, \tilde{u}_m(x_i), \tau_{ij}, S_m, d_{1,m}, D_s, T)$, $\forall x_i \in I, \tilde{u}(x_i) > 0$ с тем же приоритетом, что соответствующие им промежуточные вершины, $\tilde{u}_m(x_i) = \tilde{u}(x_i)$, $\tau(x_i) = 0$. Добавление супер-стока D^* , связывающего все искусственные стоки с ним.

5. Осуществляется переход к развернутой во времени статической сети $\tilde{G}_m^* = (X_m^*, \tilde{A}_m^*, \tilde{u}_{ij}^*, \tau_{ij}, S_m^*, I^*, d_{1,m}^*, D_s^*, T)$ на основе создания расширенной во времени копии каждой вершины.

6. Вычисляется максимальный поток в развернутой во времени сети $\tilde{G}_m^*$ без промежуточного хранения:

для $\forall (x_1^*(\theta), x_2^*(\theta + \tau_{x_1^* x_2^*})) \in \tilde{A}_m^*$ **выполнить:**

$$\tilde{v}(x_1^*(\theta), x_2^*(\theta + \tau_{x_1^* x_2^*})) \leftarrow 0.$$

$$\tilde{v}(x_2^*(\theta + \tau_{x_1^* x_2^*}), x_1^*(\theta)) \leftarrow 0.$$

Пока существует путь от s до супер-стока без циклов в остаточной сети $\tilde{G}_{mr}^*$, **выполнить:**

$$\delta \leftarrow \min \{ \tilde{u}_r^* (x_1^*(\theta), x_2^*(\theta + \tau_{x_1^* x_2^*})) : (x_1^*(\theta), x_2^*(\theta + \tau_{x_1^* x_2^*})) \in p \}.$$

Для каждого ребра $(x_1^*(\theta), x_2^*(\theta + \tau_{x_1^* x_2^*}))$ в p выполнить

$$\tilde{v}(x_1^*(\theta), x_2^*(\theta + \tau_{x_1^* x_2^*})) \leftarrow \tilde{v}(x_1^*(\theta), x_2^*(\theta + \tau_{x_1^* x_2^*})) + \delta$$

$$\tilde{v}(x_2^*(\theta + \tau_{x_1^* x_2^*}), x_1^*(\theta)) \leftarrow -\tilde{v}(x_1^*(\theta), x_2^*(\theta + \tau_{x_1^* x_2^*})).$$

7. Производится переход к сети $\tilde{G}_m$ от $\tilde{G}_m^*$ путем удаления супер-стока и фиктивных вершин.

8. Находится максимальный поток от источника до промежуточных узлов в соответствии с порядком приоритетов, найденным на шаге 3 и шагах 2.1–2.9.

9. Производится декомпозиция потока на пути.

10. Осуществляется переход к динамической сети.

11. *Выход:* динамическая сеть с максимальным потоком.

Таким образом, разработанный алгоритм оперирует тремя видами весов: весами атрибутов (критериев), весами экспертов и весами, связанными с оператором IFNA.

Заметим, что в итоге реализации предложенного алгоритма получаем динамическую сеть с максимальным эвакуационным потоком.

6. Моделирование и обсуждение результатов принятия решений при эвакуации. Для подтверждения эффективности разработанного алгоритма создана программная среда, реализованная на языке JavaScript. На рисунке 3 приведена архитектура программного модуля и входных/выходных данных. Входные данные в виде файлов передаются на вход программного модуля через аргументы командной строки. Выходные файлы сохраняются в директории исполняемого файла программного модуля.

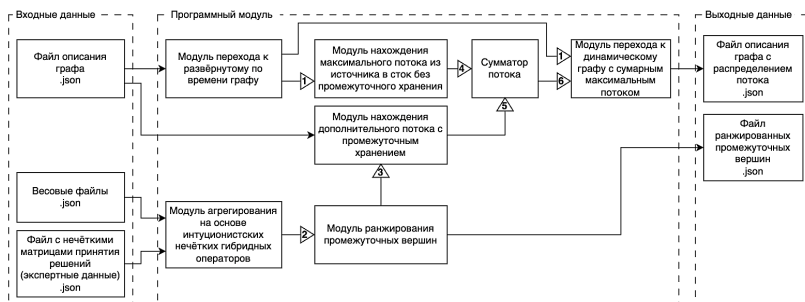


Рис. 3. Архитектура программного модуля

Потоки данных между модулями на рисунке 3 обозначены цифрами. В частности, 1 – «развернутый во времени» граф; 2 – агрегированная коллективная интуиционистская нечеткая матрица принятия решений и оценки альтернатив в виде IFNs; 3 – множество ранжированных вершин-убежищ; 4 – величина максимального потока без промежуточного хранения; 5 – дополнительный поток; 6 – суммарный поток.

Проведено моделирование эвакуации из здания для максимизации числа спасенных жизней. На рисунке 4 представлен пример здания для эвакуации.

Для выполнения принятия решений необходимо использовать не сами здания, а их структурные модели. Данные модели легко интерпретируются в виде графов и в их матричных и списковых эквивалентах. На рисунке 5 построена графовая модель здания с опасной зоной-источником (s) и тремя убежищами (x_6, x_7, x_8).

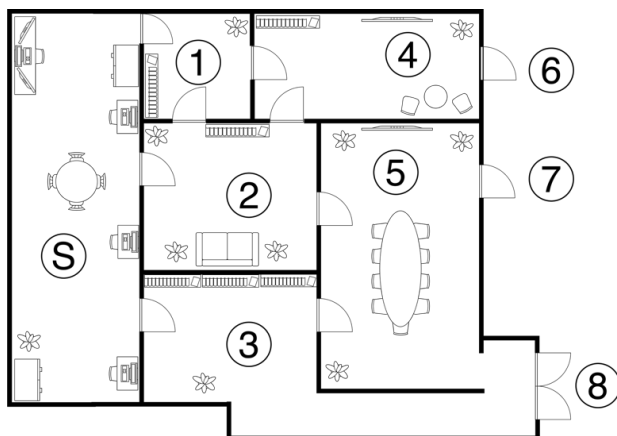


Рис. 4. Пример здания

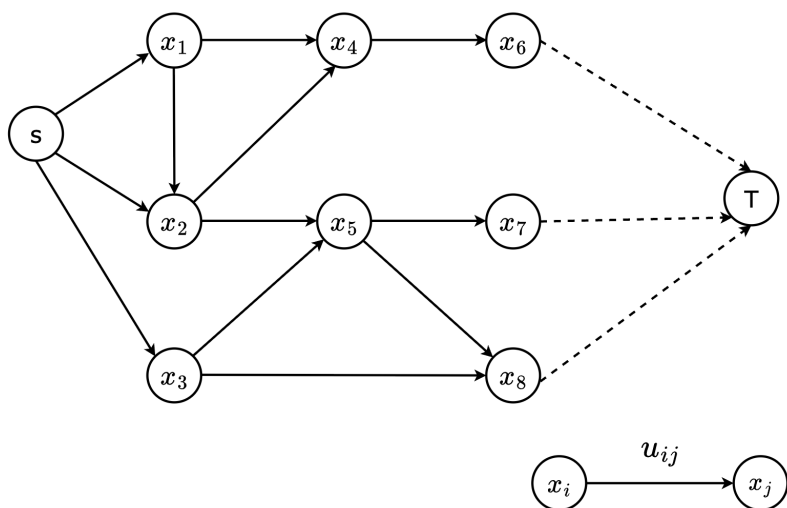


Рис. 5. Графовая модель здания

Заметим, что пропускные способности дуг сети – коридоров – могут изменяться во времени из-за перекрытия коридоров огнём или дымом. Помещения x_1 , x_2 , x_3 , x_4 имеют ограниченные пропускные способности, которые также могут изменяться во времени. В этих помещениях размещают людей с целью их дальнейшего перемещения в безопасные места, что позволяет увеличить число спасённых жизней. Время прохождения эвакуационного потока по дугам сети является

динамической величиной. Пропускные способности дуги сети задаются в нечётком виде (в виде центра нечеткого числа), так как они оцениваются лишь приблизительно в связи с возникновением ЧС. Далее находятся левые и правые коэффициенты размаха (коэффициенты нечеткости, индексы нечеткости) по линейным комбинациям соседних значений, что не приводит к сильному размытию границ числа. Таблицы 1-3 иллюстрируют нечеткие пропускные способности дуг, вершин сети и параметры времени прохождения потока.

Таблица 1. Нечеткие пропускные способности дуг сети

	Динамические пропускные способности дуг и промежуточных вершин				
	$\theta = 0$	$\theta = 1$	$\theta = 2$	$\theta = 3$	$\theta = 4$
(x_i, x_j)	u_{ij}				
(s, x_1)	$\overline{20}$	$\overline{23}$	$\overline{25}$	$\overline{20}$	$\overline{23}$
(s, x_2)	$\overline{105}$	$\overline{120}$	$\overline{100}$	$\overline{90}$	$\overline{100}$
(s, x_3)	$\overline{90}$	$\overline{86}$	$\overline{86}$	$\overline{90}$	$\overline{92}$
(x_1, x_2)	$\overline{15}$	$\overline{15}$	$\overline{13}$	$\overline{15}$	$\overline{15}$
(x_1, x_4)	$\overline{10}$	$\overline{10}$	$\overline{12}$	$\overline{12}$	$\overline{12}$
(x_2, x_4)	$\overline{80}$	$\overline{85}$	$\overline{80}$	$\overline{80}$	$\overline{90}$
(x_2, x_5)	$\overline{60}$	$\overline{65}$	$\overline{65}$	$\overline{58}$	$\overline{58}$
(x_3, x_5)	$\overline{42}$	$\overline{42}$	$\overline{48}$	$\overline{48}$	$\overline{45}$
(x_3, x_8)	$\overline{66}$	$\overline{70}$	$\overline{70}$	$\overline{66}$	$\overline{66}$
(x_4, x_6)	$\overline{40}$	$\overline{30}$	$\overline{35}$	$\overline{40}$	$\overline{35}$
(x_5, x_7)	$\overline{55}$	$\overline{50}$	$\overline{45}$	$\overline{55}$	$\overline{55}$
(x_5, x_8)	$\overline{44}$	$\overline{40}$	$\overline{44}$	$\overline{40}$	$\overline{42}$

Таблица 2 отражает ненулевые пропускные способности промежуточных вершин.

Таблица 2. Нечеткие пропускные способности промежуточных вершин сети

	Динамические пропускные способности дуг и промежуточных вершин				
	$\theta = 0$	$\theta = 1$	$\theta = 2$	$\theta = 3$	$\theta = 4$
x_i	u_i				
x_1	$\overline{10}$	$\overline{15}$	$\overline{15}$	$\overline{10}$	$\overline{10}$
x_2	$\overline{20}$	$\overline{20}$	$\overline{23}$	$\overline{23}$	$\overline{20}$
x_3	$\overline{25}$	$\overline{25}$	$\overline{23}$	$\overline{23}$	$\overline{25}$
x_4	$\overline{18}$	$\overline{18}$	$\overline{18}$	$\overline{16}$	$\overline{16}$

Таблица 3. Параметры времени прохождения потока по дугам для сети

	Динамические пропускные параметры времени				
	$\theta = 0$	$\theta = 1$	$\theta = 2$	$\theta = 3$	$\theta = 4$
(x_i, x_j)	τ_{ij}				
(s, x_1)	1	1	2	2	2
(s, x_2)	1	1	1	2	2
(s, x_3)	2	2	1	1	1
(x_1, x_2)	2	1	1	1	1
(x_1, x_4)	3	1	1	1	2
(x_2, x_4)	2	1	1	1	2
(x_2, x_5)	2	2	2	1	2
(x_3, x_5)	2	1	1	1	3
(x_3, x_8)	2	3	2	2	2
(x_4, x_6)	1	1	1	1	2
(x_5, x_7)	2	2	1	1	1
(x_5, x_8)	2	1	1	1	2

После построения сети осуществляется поиск максимального эвакуационного потока из источника в стоки без промежуточного размещения пострадавших в вершинах-не стоках согласно шагам Алгоритма 4-7, что отражено в таблице 4.

Таблица 4. Общий поток без промежуточного хранения

Динамический путь	Статические пути	Статический поток	Время отправления	Время прибытия	Динамический поток	Сток
1) $s \rightarrow x_2 \rightarrow x_4 \rightarrow x_6$	1) $s_0 \rightarrow x_{2,1} \rightarrow x_{4,2} \rightarrow x_{6,3}$	$\overline{35}$	0	3	$\overline{75}$	x_6
	2) $s_1 \rightarrow x_{2,2} \rightarrow x_{4,3} \rightarrow x_{6,4}$	$\overline{40}$	1	4		
2) $s \rightarrow x_2 \rightarrow x_5 \rightarrow x_8$	1) $s_0 \rightarrow x_{2,1} \rightarrow x_{5,3} \rightarrow x_{8,4}$	$\overline{40}$	0	4	$\overline{40}$	x_8
3) $s \rightarrow x_2 \rightarrow x_5 \rightarrow x_7$	1) $s_0 \rightarrow x_{2,1} \rightarrow x_{5,3} \rightarrow x_{7,4}$	$\overline{25}$	0	4	$\overline{25}$	x_7
4) $s \rightarrow x_3 \rightarrow x_5 \rightarrow x_7$	1) $s_0 \rightarrow x_{3,2} \rightarrow x_{5,3} \rightarrow x_{7,4}$	$\overline{30}$	0	4	$\overline{30}$	x_7
5) $s \rightarrow x_3 \rightarrow x_8$	1) $s_0 \rightarrow x_{3,2} \rightarrow x_{8,4}$	$\overline{60}$	0	4	$\overline{60}$	x_8
Общий поток без промежуточного хранения					$\overline{230}$	

Результаты работы этих шагов Алгоритма представлены на рисунке 6.

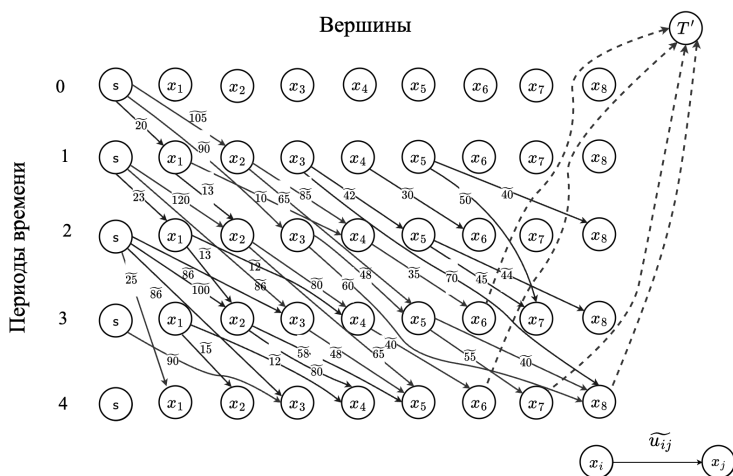


Рис. 6. Динамическая сеть с общим потоком в стоки без промежуточного хранения

Производится ранжирование промежуточных вершин для передачи дополнительного потока эвакуируемых из этих вершин в стоки согласно шагам 2.1-2.9 Алгоритма.

Заметим, что четыре из пяти промежуточных вершин x_1, x_2, x_3, x_4 имеют ненулевые пропускные способности. Таким образом, s – вершина-источник; x_6, x_7, x_8 – стоки; x_1, x_2, x_3, x_4, x_5 – промежуточные вершины, из которых x_1, x_2, x_3, x_4 имеют возможность хранить поток и перевозить его дальше в сток. Группа экспертов представляет свои оценки для определения порядка альтернатив эффективной эвакуации. При этом рассматриваются следующие критерии: вместимость помещения, дающая верхний предел количества пострадавших, которые могут находиться в этом укрытии (x_1), легкость эвакуации (x_2), уровень безопасности помещения как убежища (x_3), время организации эвакуации из этого места (x_4) и отдаленность от источнику опасности (x_5). Все критерии относятся к типу выгоды.

В таблицах 5–7 показаны лингвистические термы (наборы лингвистических переменных) для оценки экспертов, атрибутов и

альтернатив в виде интуиционистских нечетких чисел. Таблица 8 иллюстрирует веса важности критериев в виде лингвистических термов.

Таблица 5. Лингвистические термы для оценки экспертов

Лингвистический терм	Интуиционистское нечеткое число
Очень низко (ОН)	(0.10, 0.80)
Низко (Н)	(0.20, 0.70)
Средне-низко (СН)	(0.35, 0.50)
Средне (С)	(0.40, 0.55)
Средне-важно (СВ)	(0.6, 0.35)
Важно (В)	(0.70, 0.20)
Очень важно (ОВ)	(0.90, 0.05)

Таблица 6. Лингвистические термы для оценки критериев

Лингвистический терм	Интуиционистское нечеткое число
Очень слабо (ОС)	(0.15, 0.80)
Слабо (С)	(0.30, 0.65)
Ниже среднего (НС)	(0.45, 0.50)
Средне (Ср)	(0.55, 0.40)
Средне-важно (СВ)	(0.65, 0.30)
Важно (В)	(0.75, 0.15)
Очень важно (ОВ)	(0.85, 0.10)

Таблица 7. Лингвистические термы для оценки альтернатив

Лингвистический термин	Интуиционистское нечеткое число
Очень низко (ОН)	(0.10, 0.85)
Низко (Н)	(0.15, 0.75)
Средне-низко (СН)	(0.25, 0.60)
Средне (С)	(0.50, 0.50)
Средне-хорошо (СХ)	(0.7, 0.25)
Хорошо (Х)	(0.80, 0.10)
Очень хорошо (ОХ)	(0.9, 0.05)

Таблица 8. Веса важности критериев

	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5
D_1	ОС	С	НС	В	В
D_2	С	СВ	Ср	СВ	ОВ
D_3	Ср	В	СВ	С	Ср
D_4	НС	ОВ	В	Ср	НС

Веса лиц, принимающих решения, основаны на лингвистических терминах в таблице 5, и вычисляются с помощью уравнения (34). В результате получены следующие веса важности (таблица 9):

Таблица 9. Важность и вес оценок лиц, принимающих решения (ЛПР)

	ЛПР1	ЛПР2	ЛПР3	ЛПР4
Лингвистический термин	Важный	Средне-важный	Очень важный	Средний
ω	0.28	0.227	0.34	0.152

Затем вычисляется вектор весов методом нормального распределения, чтобы исключить влияние чрезмерно низких и высоких весов по уравнениям (35)–(38).

$$\mu_n = 3, \sigma_n = \sqrt{2}.$$

$$w = (0.1117, 0.2365, 0.3036, 0.2365, 0.1117)^T.$$

На основе данных из таблицы 9 и уравнения (39) определены веса важности критериев в виде IFNs (таблица 10).

Таблица 10. Вес критерия

x_1	(0.387, 0.561, 0.052)
x_2	(0.667, 0.249, 0.084)
x_3	(0.600, 0.333, 0.067)
x_4	(0.581, 0.336, 0.083)
x_5	(0.693, 0.229, 0.077)

Заметим, что эвакуационные альтернативы оценивались лицами, принимающими решения, с учетом лингвистических термов из таблицы 7 по каждому критерию. Далее формируются нечёткие интуиционистские матрицы четырех экспертов (таблицы 11–14).

Таблица 11. Интуиционистская нечеткая матрица принятия решений первого эксперта

	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5
A_1	C	CX	OX	H	CH
A_2	X	CH	OX	H	CX
A_3	CX	OX	C	CH	OH
A_4	X	CX	CH	H	OH

Таблица 12. Интуиционистская нечеткая матрица принятия решений второго эксперта

Альтернатива	Критерий				
	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5
A_1	CH	CH	X	CH	H
A_2	OX	H	X	CH	C
A_3	C	X	CX	OH	CH
A_4	C	X	CX	CH	CH

Таблица 13. Интуиционистская нечеткая матрица принятия решений третьего эксперта

Альтернатива	Критерий				
	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5
A_1	CH	H	OX	H	CH
A_2	X	CH	OX	OH	X
A_3	CX	OX	C	H	CX
A_4	CX	OX	CH	CX	C

Таблица 14. Интуиционистская нечеткая матрица принятий решений четвертого эксперта

Альтернатива	Критерий				
	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5
A_1	C	C	CH	OX	H
A_2	CH	H	X	H	CX
A_3	X	C	CX	H	X
A_4	X	CH	C	OX	CH

Далее на основе данных из таблиц 11-14 и уравнения (40) строится агрегированная коллективная интуиционистская нечеткая матрица принятия решений (AIFDM), которая приведена в таблице 15.

С учетом модифицированного оператора *IFHA* (уравнение 41) и данных из таблицы 15 получены оценки альтернатив в виде IFNs, что показано в таблице 16.

Таблица 15. Агрегированная коллективная интуиционистская нечеткая матрица принятия решений (AIFDM)

	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5
A_1	(0.370, 0.555, 0.075)	(0.431, 0.493, 0.077)	(0.841, 0.085, 0.074)	(0.403, 0.473, 0.124)	(0.214, 0.653, 0.133)
A_2	(0.791, 0.112, 0.097)	(0.214, 0.653, 0.133)	(0.870, 0.065, 0.065)	(0.158, 0.744, 0.098)	(0.707, 0.214, 0.079)
A_3	(0.683, 0.255, 0.062)	(0.851, 0.083, 0.066)	(0.588, 0.384, 0.028)	(0.169, 0.725, 0.107)	(0.527, 0.374, 0.099)
A_4	(0.717, 0.197, 0.086)	(0.784, 0.134, 0.082)	(0.427, 0.478, 0.094)	(0.581, 0.325, 0.094)	(0.313, 0.622, 0.0655)

Таблица 16. IFNA

A_1	(0.687, 0.180, 0.133)
A_2	(0.890, 0.035, 0.855)
A_3	(0.871, 0.067, 0.804)
A_4	(0.863, 0.057, 0.806)

Затем осуществляется вычисление оценок $s(r_i)$ агрегированных интуиционистских значений с учетом уравнения (4):

$$s(r_1) = 0.507, s(r_2) = 0.855, s(r_3) = 0.804, s(r_4) = 0.806.$$

Далее производится ранжированы альтернатив:

$$s(r_2) > s(r_4) > s(r_3) > s(r_1).$$

Это значит, что $x_2 > x_4 > x_3 > x_1$.

Осуществлена передача дополнительного потока из промежуточных вершин в порядке $x_2 > x_4 > x_3 > x_1$ в стоки для нахождения максимального потока эвакуируемых. Тогда максимальный динамический поток с промежуточным хранением представлен в таблице 17.

Таблица 17. Максимальный динамический поток с промежуточным хранением

Динамический путь	Статические пути	Статический поток	Время отправления	Время прибытия	Динамический поток	Сток
Общий поток без промежуточного хранения					$\overline{230}$	
1) $s \rightarrow x_2 \rightarrow x'_2$	1) $s_0 \rightarrow x_{2,1} \rightarrow x'_{2,1}$	$\overline{5}$	0	1		
	2) $s_1 \rightarrow x_{2,2} \rightarrow x'_{2,2}$	$\overline{23}$	1	2	$\overline{51}$	x_2
	3) $s_2 \rightarrow x_{2,3} \rightarrow x'_{2,3}$	$\overline{23}$	2	3		
2) $s \rightarrow x_1 \rightarrow x_4$	1) $s_0 \rightarrow x_{1,1} \rightarrow x_{4,2} \rightarrow x'_{4,1}$	$\overline{10}$	0	1		
	2) $s_1 \rightarrow x_{2,2} \rightarrow x_{4,3} \rightarrow x'_{4,3}$	$\overline{16}$	1	3	$\overline{42}$	x_4
	3) $s_2 \rightarrow x_{2,3} \rightarrow x_{4,4} \rightarrow x'_{4,4}$	$\overline{16}$	2	4		
	1) $s_1 \rightarrow x_{3,3} \rightarrow x'_{3,3}$	$\overline{23}$	1	3		
3) $s \rightarrow x_3$	2) $s_2 \rightarrow x_{3,4} \rightarrow x'_{3,4}$	$\overline{25}$	2	4	$\overline{48}$	x_3
	4) $s \rightarrow x_1$					
	1) $s_1 \rightarrow x_{1,2} \rightarrow x'_{1,2}$	$\overline{15}$	1	2	$\overline{25}$	x_1
	2) $s_2 \rightarrow x_{1,4} \rightarrow x'_{1,4}$	$\overline{10}$	2	4		
Поток с промежуточным хранением					$\overline{166}$	
Общий максимальный поток					$\overline{396}$	

Таким образом, исходя из таблицы 17, максимальный поток эвакуации без промежуточного размещения пострадавших составляет $\overline{230}$ единиц, в то время как с возможностью промежуточного размещения – $\overline{396}$ единиц. На рисунке 7 представлено это распределение потока эвакуации.

Далее находятся коэффициенты размаха нечеткого числа $\overline{396}$ согласно методу, описанному в работах [41 – 42], который основан на линейных комбинациях индексов нечеткости. Для расчета индексов нечеткости искомого числа необходимое значение определяется по соседним значениям индексов (рисунок 8).

Пусть нечеткий параметр «около a' » находится между двумя соседними значениями «около a_1 » и «около a_2 » ($a_1 \leq a' \leq$

a_2), функции принадлежности которого $\mu_{a_1}(a_1)$ и $\mu_{a_2}(a_2)$ имеют треугольную форму. Следовательно, коэффициенты размаха функции принадлежности $\mu_{a'}(a)$, соответствующие нечеткому параметру «около $\tilde{x}'$ », задаются линейной комбинацией левого и правого индексов нечеткости соседних значений:

$$l^L = \frac{(a_2 - a')}{(a_2 - a_1)} \times l_1^L + \left(1 - \frac{(a_2 - a')}{(a_2 - a_1)}\right) \times l_2^L, \quad (42)$$

$$l^R = \frac{(a_2 - a')}{(a_2 - a_1)} \times l_1^R + \left(1 - \frac{(a_2 - a')}{(a_2 - a_1)}\right) \times l_2^R. \quad (43)$$

где l^L – левый коэффициент размаха нечеткого треугольного числа с центром a_1 ; l^R – правый коэффициент размаха нечеткого треугольного числа с центром a_2 . В частном случае, когда центр искомого треугольного числа равен значению, существующему на числовой оси, размахи нечеткого числа совпадают с размахами существующего числа. Если центр нечеткого параметра расположен левее центра первого значения на числовой оси, его коэффициенты размаха совпадают с теми, которые расположены на оси. В противном случае, когда центр искомого числа находится справа от центра последнего числа, отмеченного на оси, их коэффициенты размаха совпадают.

Учитывая вышеизложенное, были найдены коэффициенты размаха нечеткого числа $\widetilde{396}$ по формулам (42-43) на основе базовых значений нечетких чисел, заданных экспертами (рисунок 9).

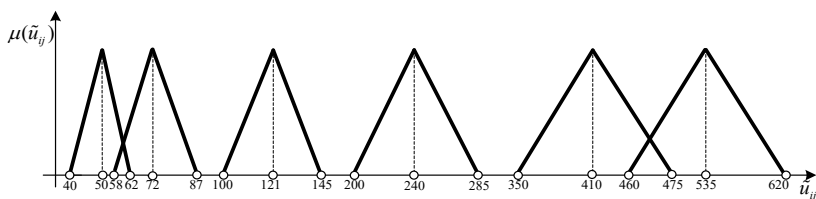


Рис. 9. Базовые значения функций принадлежности пропускных способностей дуг сети

Требуемое значение потока находится между двумя соседними базовыми значениями: $\widetilde{240}$ с левым коэффициентом нечеткости $l_1^L = 40$, правым коэффициентом нечеткости – $l_1^R = 45$ и $\widetilde{410}$ с левым

коэффициентом нечеткости $l_1^L = 60$, правым коэффициентом нечеткости – $l_1^R = 65$. На основании уравнения (7): $l_1^L = 54.68$, $l_1^R = 59.69$. Наконец, максимальный поток эвакуации в динамической нечеткой сети с частичным разворотом полосы движения может быть представлен единицами нечеткого треугольного числа (311, 365, 424).

Так как пропускные способности дуг оценены лишь приблизительно, в нечетких числах, то и значение потока будет выражаться нечетким треугольным числом. Мы можем интерпретировать его следующим образом: максимальное число эвакуируемых со степенью уверенности 1 оценивается в диапазоне от 311 до 424, со степенью уверенности 0,8 оно измеряется в диапазоне от 354 до 377, вероятнее всего оно будет равно 365, но в любом случае значение максимального потока не может быть меньше 311 и больше 424 (рисунок 10).

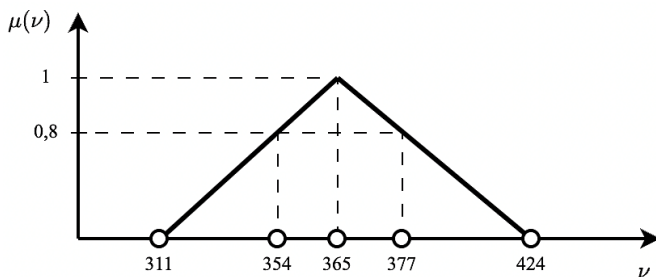


Рис. 10. Нечеткое число и альфа-срез

Относительно неточности Лотфи Заде говорил: «Я считаю, что излишнее стремление к точности стало оказывать действие, сводящее на нет теорию управления и теорию систем, так как оно приводит к тому, что исследования в этой области сосредотачиваются на тех и только тех проблемах, которые поддаются точному решению. В результате многие классы важных проблем, в которых данные, цели и ограничения являются слишком сложными или плохо определёнными для того, чтобы допустить точный математический анализ, оставались и остаются в стороне по той причине, что они не поддаются математической трактовке. Для того чтобы сказать что-либо существенное для проблем подобного рода, мы должны отказаться от наших требований точности и допустить результаты, которые являются несколько размытыми или неопределённым» [49].

Для проверки вычислительной сложности предложенного алгоритма был проведён вычислительный эксперимент (таблица 18).

Случайным образом были подготовлены тестовые графы на 10, 100, 1000, 5000 и 10000 вершин. Каждый граф содержал различное количество рёбер (от 80 до 200% рёбер в каждом). Графы генерируются случайным образом с обязательной проверкой на наличие путей от истока к стоку. Для каждого количества вершин сгенерировано по 1000 графов. Для каждого набора проведено по 1000 запусков. В таблице 5 приведена зависимость времени работы программного модуля от количества вершин. Приведены минимальное зарегистрированное время работы алгоритма, максимальное и усреднённое. При этом 10% самых низких и самых высоких значений в каждой группе были исключены из рассмотрения для устранения аномально быстрых и аномально долгих запусков. Все эксперименты проводились на ПК MacBook Air (M1, 2020), размер оперативной памяти 16 ГБ.

Таблица 18. Время работы программного модуля в зависимости от числа вершин.

Количество вершин, шт	Минимальное время, мс	Максимальное время, мс	Среднее время, мс
10	0,0122	0,029	0,0245
100	0,148	0,212	0,198
1000	0,821	1,045	0,921
5000	1,275	2,343	2,194
10000	3,448	10,595	8,430

Было проведено сравнение результатов предлагаемого алгоритма на основе модифицированного оператора IFHA с другими интуиционистскими операторами агрегирования, которые также были модифицированы с помощью уравнений (23)–(28) для интуиционистских нечетких чисел, что показано в таблице 19.

Таблица 19. IFHA и другие операторы

	$s(r_1)$	$s(r_2)$	$s(r_3)$	$s(r_4)$
IFHA	0.507	0.855	0.804	0.806
IFHG	−0.990	−0.989	−0.986	−0.983
IFWA	0.850	0.940	0.928	0.910
IFWG	−0.804	−0.769	−0.690	−0.657
IFOWA	−0.223	0.235	−0.108	0.137
IFOWG	0.054	0.270	0.364	0.355

Сравнение алгоритмов, основанных на различных операторах агрегирования, представлено на рисунке 11.

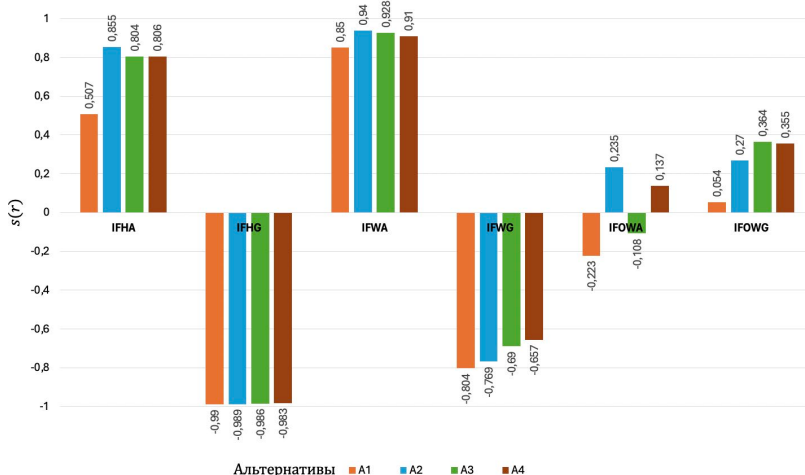


Рис. 11. Результаты алгоритмов IFNA и IFNG

На основе проведенного анализа построенных таблиц и графиков сделан вывод о достоверности предлагаемого метода принятия решения на основе оператора IFNA, оперирующего нечеткими весами критериев. Операторы IFWA и IFNA имеют одинаковый порядок альтернатив эвакуации: $A_2 > A_4 > A_3 > A_1$, что означает, что первой осуществляется эвакуация из вершины x_2 . Все рассмотренные операторы указали A_1 как худшую альтернативу. При этом все операторы усреднения выделили A_2 как лучшую и A_1 как худшую альтернативы с небольшим отличием между второй и третьей альтернативами, а геометрические операторы IFWG и IFNG показали одинаковые результаты и выделили A_4 как лучшую альтернативу и A_1 как худшую. При этом оператор IFOWG имеет отличие в первой и второй альтернативах, а IFWA выделил A_2 как лучшую альтернативу и A_1 как худшую.

К ограничениям алгоритма можно отнести его зависимость от точности экспертных оценок, связанную с сомнениями и неуверенностью экспертов при выборе функций принадлежности ввиду отсутствия статических данных или точной оценки параметров сети.

7. Заключение. В статье рассматривается задача эвакуации из здания на основе многокритериального принятия решений с учетом нечеткого интуиционистского гибридного оператора усреднения и стратегии макроскопической эвакуации. Для ее решения разработан интегрированный алгоритм эвакуации из здания, объединяющий нечеткое принятие решений на основе интуиционистского нечеткого гибридного оператора усреднения и нахождение лексикографического потока с учетом промежуточного размещения пострадавших в вершинах-не убежищах. Данный алгоритм является многоуровневым, где на первом уровне осуществляется построение модели задачи в виде эвакуационной транспортной сети. На втором уровне алгоритма производится ранжирование эвакуационных помещений для нахождения оптимального порядка транспортировки людей из них в убежища на основе различных критериев, таких как вместимость помещения, легкость эвакуации, уровень безопасности помещения как убежища, время организации эвакуации из этого места и удаленность от источника опасности. Ранжирование помещений осуществляется на основе многокритериального группового принятия решений и интуиционистского нечеткого гибридного оператора усреднения для моделирования сомнений и неуверенности. Алгоритм оперирует лингвистическими оценками экспертов, позволяя на их основе вычислять веса экспертов и критериев для эффективного принятия решения. Агрегирование оценок осуществляется на основе методики, которая позволяет оперировать весами критериев, представленными в виде нечетких интуиционистских значений в отличие от традиционных четких чисел для учета сомнений и неуверенности группы экспертов. На третьем уровне алгоритма осуществляется макроскопическая потоковая динамическая эвакуация для перемещения максимального количества потока из опасных зон с учетом возможности размещения пострадавших в промежуточных вершинах, не являющихся убежищами, в безопасные хранилища. Алгоритм позволяет учесть веса критериев и экспертов, представленные в нечетком лингвистическом виде. Для подтверждения эффективности разработанного алгоритма создана программная среда, реализованная на языке JavaScript. Проведено сравнение разработанного алгоритма принятия решения на основе оператора IFNA, оперирующего нечеткими весами критериев, с существующими алгоритмами и сделан вывод о достоверности предлагаемого алгоритма. Проведена оценка зависимости времени работы алгоритма от размера входных, подтверждающая возможность

использования предложенного алгоритма для больших зданий и транспортных сетей.

Результаты данного алгоритма могут применяться как при реальной эвакуации населения в случае масштабных ЧС, так и при составлении планов реагирования на эвакуацию. В перспективе планируется учитывать: панику и нерациональное поведение людей при эвакуации, наличие заблокированных путей (например, из-за обрушения зданий или деревьев на дорогах), параметры риска и опасности эвакуации, которые могут сделать «оптимальные» маршруты недоступными другие факторы.

Литература

1. Герасименко Е.М., Кравченко Д.Ю., Кравченко Ю.А., Кулиев Э.В. Поддержка принятия решений по предупреждению и ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций на основе нечеткого метода структурирования информации // Известия ЮФУ. Технические науки. 2023. № 2(232). С. 201–212.
2. Shi D., Li J., Wang Q., Chen J., Lovreglio R., Lo J.T.Y., Ma J. Modeling and simulation of crowd dynamics at evacuation bottlenecks during flood disasters // Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review. 2025. vol. 198.
3. Feng Z., Wang C., An J., Zhang X., Liu X., Ji X., Kang L., Quan W. Emergency fire escape path planning model based on improved DDPG algorithm // Journal of Building Engineering. 2024. vol. 95. DOI: 10.1016/j.jobe.2024.110090.
4. Kim J., Kim B.-J., Kim N. Perception-based analytical technique of evacuation behavior under radiological emergency: An illustration of the Kori area // Nuclear Engineering and Technology. 2021. № 53(3). pp. 825–832. DOI: 10.1016/j.net.2020.08.012.
5. Ford J., Fulkerson D.R. Maximal flow through a network // Canadian Journal of Mathematics. 1956. № 8(3). pp. 399–404.
6. Gale D. Transient flows in networks // Michigan Mathematical Journal. 1959. № 6(1). pp. 59–63.
7. Minieka E. Maximal, lexicographic, and dynamic network flows // Oper. Res. 1973. № 21(2). pp. 517–527. DOI: 10.1287/opre.21.2.517.
8. Chalmet L.G., Francis R.L., Saunders P.B. Network models for building evacuation // Fire Technology. 1982. № 18(1). pp. 90–113. DOI: 10.1007/BF02993491.
9. Opananon S. On finding paths and flows in multicriteria, stochastic and time-varying networks // Ph.D. dissertation. University of Maryland. 2004.
10. Cui J., An S., Zhao M. A Generalized Minimum Cost Flow Model for Multiple Emergency Flow Routing. Mathematical Problems in Engineering. 2014. DOI: 10.1155/2014/832053.
11. Hamacher H.W., Tufekci S. On the use of lexicographic min cost flows in evacuation modeling // Naval Research Logistics. 1987. vol. 34(4). pp. 487–503.
12. Dunn C.E., Newton D. Optimal routes in GIS and emergency planning applications // Area. 1992. vol. 24(3). pp. 259–267.
13. Miller-Hooks E., Patterson S.S. On solving quickest time problems in time-dependent, dynamic networks // Journal of Mathematical Modelling and Algorithms. 2004. № 3(1). pp. 39–71.
14. Zadeh L.A. The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning // Part I, Information Sciences. 1975. № 8(3). pp. 199–249.

15. Garg H., Dutta, D., Dutta P., Gohain B. An extended group decision-making algorithm with intuitionistic fuzzy set information distance measures and their applications // Computers & Industrial Engineering. 2024. 197. DOI: 10.1016/j.cie.2024.110537.
16. Seth T., Muhuri P.K. Hesitant and uncertain linguistics based executive decision making using risk and regret aversion: Methods, implementation and analysis // MethodsX. 2024. vol. 12.
17. Bozhenyuk A., Gerasimenko E., Kacprzyk J., Rozenberg I. Flows in networks under fuzzy conditions // Studies in Fuzziness and Soft Computing. 2017. vol. 346. 168 p.
18. Gerasimenko E., Kureichik V., Kuliev E. Maximum Dynamic Flow Model for Hesitant Fuzzy Evacuation with Intermediate Storage at Nodes // Intelligent and Fuzzy Techniques for Emerging Conditions and Digital Transformation (INFUS). Lecture Notes in Networks and Systems. 2022. vol. 307. pp. 694–704.
19. Gerasimenko E., Kureichik V. Minimum cost lexicographic evacuation flow finding in intuitionistic fuzzy networks // Journal of Intelligent and Fuzzy Systems. 2022. vol. 42(1). pp. 251–263.
20. Герасименко Е.М. Курейчик В.В. Родзин С.И. Кухаренко А.П. Применение нечеткой логики для принятия решений об эвакуации при наводнении // Известия ЮФУ. Технические науки. 2022. № 4(228). С. 15–29.
21. Гамаюнова В.О., Богомолов А.С., Кушников В.А., Иващенко В.А. Мультиагентное моделирование эвакуации из помещений с учетом столкновений агентов // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Математика. Механика. Информатика. 2025. Т. 25. № 1. С. 106–115.
22. Коткова Е.А., Матвеев А.В. Методика интеллектуального прогнозирования эффективности управления эвакуацией людей из общественных зданий // Научно-аналитический журнал "Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России". 2021. № 4. С. 107–120.
23. Ashraf S., Garg H., Kousar M. An industrial disaster emergency decision-making based on China's Tianjin city port explosion under complex probabilistic hesitant fuzzy soft environment. Engineering Applications of Artificial Intelligence. 2023. vol. 123. DOI: 10.1016/j.engappai.2023.106400.
24. Luo Z., Tian J., Zeng J., Pilla F. Flood risk evaluation of the coastal city by the EWM-TOPSIS and machine learning hybrid method. International Journal of Disaster Risk Reduction. 2024. vol. 106.
25. Dhamala M.C., Adhikari D., Khanal P. Pyakurel U. Generalized maximum flow over time with intermediate storage // Annals of Operations Research. 2024. vol. 335(1). pp. 111–134.
26. Xu Z. Hesitant Fuzzy Sets Theory // Studies in Fuzziness and Soft Computing. 2014. vol. 314.
27. D'Urso P., Chachi J., Kazemifard A., De Giovanni L. OWA-based multi-criteria decision making based on fuzzy methods // Ann. Oper. Res. 2024. DOI: 10.1007/s10479-024-05926-5.
28. Kazemifard A., Chachi J. MADM approach to analyse the performance of fuzzy regression models. Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing. 2022. vol. 13(8). pp. 4019–4031.
29. Chen S.M., Yang M.W., Lee L.W., Yang S.W. Fuzzy multiple attributes group decision making based on ranking interval type-2 fuzzy sets // Expert Systems with Applications. 2012. vol. 39(5). pp. 5295–5308.
30. Wang W.Z., Liu X.W., Qin Y. Multi-attribute group decision making models under interval type-2 fuzzy environment // Knowledge-Based Systems. 2012. vol. 30. pp. 121–128.

31. Zadeh L.A. Fuzzy sets // *Information and Control*. 1965. vol. 8. pp. 338–353.
32. Piegat A. Fuzzy Modelling and Control. Berlin Heidelberg. Springer-Verlag. 2001. 728 p.
33. Atanassov K.T. Intuitionistic fuzzy sets // *Fuzzy Sets and Systems*. 1986. vol. 20(1). pp. 87–96. DOI: 10.1016/S0165-0114(86)80034-3.
34. Ngan S.-C. An extension framework for creating operators and functions for intuitionistic fuzzy sets // *Information Sciences*. 2024. vol. 666.
35. Senapati T., Chen G., Mesiar R., Yager R.R. Intuitionistic fuzzy geometric aggregation operators in the framework of Aczel-Alsina triangular norms and their application to multiple attribute decision making // *Expert Systems with Applications*. 2023. vol. 212. DOI: 10.1016/j.eswa.2022.118832.
36. Xu Z.S. Intuitionistic fuzzy aggregation operators // *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*. 2007. vol. 15(6). pp. 1179–1187.
37. Ye J. Group decision-making strategy based on aggregation operators of linguistic confidence interval neutrosophic numbers in a linguistic neutrosophic multivalued scenario // *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. 2025. vol. 141. DOI: 10.1016/j.engappai.2024.109823.
38. Faizi S., Shah M.H., Sahabun W., Rashid T. A novel approach employing hesitant intuitionistic fuzzy linguistic Einstein aggregation operators within the EDAS approach for multicriteria group decision making // *Heliyon*. 2024. vol. 10(11).
39. Faizi S., Shah M., Rashid T. A modified VIKOR method for group decision-making based on aggregation operators for hesitant intuitionistic fuzzy linguistic term sets // *Soft Computing*. 2022. vol. 26(5). pp. 2375–2390.
40. Torra V. The weighted OWA operator // *International Journal of Intelligent Systems*. 1997. vol. 12(2). pp. 153–166.
41. Kacprzyk J., Bozhenyuk A., Gerasimenko E. Lexicographic maximum dynamic evacuation modeling with partial lane reversal based on hesitant fuzzy TOPSIS // *Applied Soft Computing*. 2023. vol. 144. DOI: 10.1016/j.asoc.2023.110435.
42. Gerasimenko E. Dynamic Flow Algorithm with Intermediate Storage for Emergency Evacuation Allowing Lane Reversal based on Incomplete Intuitionistic Fuzzy Preference Relation // *The open transportation journal*. 2024. vol. 18(1). DOI: 10.2174/0118744478281682240627062300.
43. Khanal D.P., Pyakurel U., Dhamala T.N., Dempe S., Schiermeyer I. Prioritized Maximum Multi-Commodity Flow in Evacuation Planning Dynamics of Disasters // *Natural Phenomena to Human Activity*. 2024. pp. 123–140.
44. Adhikari M.C., Pyakurel U. Lexicographic Maximum Flow Allowing Intermediate Storage // *The Nepali Mathematical Sciences Report*. 2022. vol. 39. no. 1. pp. 1–13.
45. Wang L., Gong Z., Zhang N. Consensus Modelling on Interval-Valued Fuzzy Preference Relations with Normal Distribution // *International Journal of Computational Intelligence Systems*. 2018. vol. 11(1). pp. 706–715.
46. Chen K.-S., Hsieh T.-H., Chang C.-P., Yao K.-C., Huang T.-H. Fuzzy Decision-Making and Resource Management Model of Performance Evaluation Indices // *Axioms*. 2024. vol. 13(3).
47. Baral S., Parida P., Sahoo D. Fuzzy TOPSIS technique for multi-criteria group decision-making: A study of crude oil price // *Results in Control and Optimization*. 2025. vol. 19. DOI: 10.1016/j.rico.2025.100565.
48. Герасименко Е.М., Кравченко Д.Ю., Курейчик В.В., Кулиев Э.В., Кравченко Ю.А., Родзин С.И. Модифицированный биоинспирированный метод поддержки принятия решений по предупреждению и ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций // *Информационные технологии*. 2023. Т. 29. № 8. С. 423–436. DOI: 10.17587/it.29.423-436.

49. Buckley J.J. The Fuzzy Mathematics of Finance // Fuzzy Sets and Systems. 1987. № 21(3). pp. 257–273.

Курейчик Владимир Викторович — д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой, кафедра САПР им. В.М. Курейчика, ИКТИБ, Южный Федеральный университет. Область научных интересов: биоинспирированные алгоритмы, эволюционные вычисления. Число научных публикаций — 500. vkur@sfedu.ru; улица Энгельса, 1, 347928, Таганрог, Россия; р.т.: +7(863)438-3451.

Герасименко Евгения Михайловна — канд. техн. наук, доцент кафедры, кафедра САПР им. В.М. Курейчика, ИКТИБ, Южный Федеральный университет. Область научных интересов: нечеткая логика, принятие решений в нечеткой среде, потоковые алгоритмы, эвакуационные задачи. Число научных публикаций — 110. egerasimenko@sfedu.ru; улица Энгельса, 1, 347928, Таганрог, Россия; р.т.: +7(863) 437-1651.

Поддержка исследований. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-71-10121-П, <https://rscf.ru/project/22-71-10121-П/> в Южном федеральном университете.

V. KUREICHIK, E. GERASIMENKO
**INTEGRATED ALGORITHM FOR MULTI-CRITERIA GROUP
DECISION-MAKING IN EVACUATION TASKS**

Kureichik V., Gerasimenko E. **Integrated Algorithm for Multi-Criteria Group Decision-Making in Evacuation Tasks.**

Abstract. This article presents an integrated algorithm for multicriteria group decision-making based on an intuitionistic fuzzy hybrid averaging operator for selecting the optimal evacuation strategy. The algorithm is multilevel, where the first level involves constructing a task model in the form of an evacuation transportation network. At the second level, the ranking of evacuation spaces is performed to determine their optimal order based on various criteria, such as room capacity, ease of evacuation, safety level of the room as a shelter, time required to organize evacuation from the location, and distance from the source of danger. The ranking of evacuation spaces is carried out using multicriteria group decision-making and an intuitionistic fuzzy hybrid averaging operator to model the doubts and uncertainties of experts in evaluating evacuation criteria, alternatives, and expert importance. The algorithm operates with linguistic expert assessments, allowing for the calculation of expert and criterion weights based on these assessments for effective decision-making. Aggregation of assessments is performed using a modified algorithm that allows for the operation of criterion weights represented as intuitionistic fuzzy values, unlike traditional crisp numbers, based on developed modified operators for raising fuzzy numbers to a fuzzy power to account for the doubts and uncertainties of the expert group. At the third level, macroscopic dynamic flow evacuation is carried out, considering the possibility of accommodating evacuees in spaces that are not shelters. The advantage of the proposed algorithm is its ability to model the transportation of evacuees under dynamic conditions from hazardous areas, taking into account their placement in intermediate points to maximize the number of lives saved, considering the uncertainty of the environment, the fuzzy nature of factors influencing evacuation decisions, and the uncertainties and doubts of the expert group in evaluating evacuation strategies. To confirm the effectiveness of the developed algorithm, evacuation modeling was conducted, and a software environment was created, implemented in JavaScript. A comparison of the developed decision-making algorithm based on the IFHA operator, operating with fuzzy weights of criteria, with existing algorithms was carried out, and a conclusion was made about the reliability of the proposed algorithm. An assessment of the dependence of the algorithm's runtime on the input size was conducted, confirming the possibility of using the proposed algorithm for large buildings and transportation networks.

Keywords: fuzzy intuitionistic decision making, fuzzy macroscopic evacuation, fuzzy aggregation operators.

References

1. Gerasimenko E.M., Kravchenko D.Ju., Kravchenko Ju.A., Kuliev Je.V. [Decision-making support for the prevention and elimination of consequences of emergency situations based on a fuzzy method of structuring information]. *Izvestiya SFU. Technical sciences – Izvestiya JuFU. Tehnicheskie nauki*. 2023. no. 2(232). pp. 201–212. (In Russ.).
2. Shi D., Li J., Wang Q., Chen J., Lovreglio R., Lo J.T.Y., Ma J. Modeling and simulation of crowd dynamics at evacuation bottlenecks during flood disasters. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*. 2025. vol. 198.

3. Feng Z., Wang C., An J., Zhang X., Liu X., Ji X., Kang L., Quan W. Emergency fire escape path planning model based on improved DDPG algorithm. *Journal of Building Engineering*. 2024. vol. 95. DOI: 10.1016/j.jobe.2024.110090.
4. Kim J., Kim B.-J., Kim N. Perception-based analytical technique of evacuation behavior under radiological emergency: An illustration of the Kori area. *Nuclear Engineering and Technology*. 2021. № 53(3). pp. 825–832. DOI: 10.1016/j.net.2020.08.012.
5. Ford J., Fulkerson D.R. Maximal flow through a network. *Canadian Journal of Mathematics*. 1956. № 8(3). pp. 399–404.
6. Gale D. Transient flows in networks. *Michigan Mathematical Journal*. 1959. № 6(1). pp. 59–63.
7. Minieka E. Maximal, lexicographic, and dynamic network flows. *Oper. Res.* 1973. № 21(2). pp. 517–527. DOI: 10.1287/opre.21.2.517.
8. Chalmet L.G., Francis R.L., Saunders P.B. Network models for building evacuation. *Fire Technology*. 1982. № 18(1). pp. 90–113. DOI: 10.1007/BF02993491.
9. Opananon S. On finding paths and flows in multicriteria, stochastic and time-varying networks. Ph.D. dissertation. University of Maryland. 2004.
10. Cui J., An S., Zhao M. A Generalized Minimum Cost Flow Model for Multiple Emergency Flow Routing. *Mathematical Problems in Engineering*. 2014. DOI: 10.1155/2014/832053.
11. Hamacher H.W., Tufekci S. On the use of lexicographic min cost flows in evacuation modeling. *Naval Research Logistics*. 1987. vol. 34(4). pp. 487–503.
12. Dunn C.E., Newton D. Optimal routes in GIS and emergency planning applications. *Area*. 1992. vol. 24(3). pp. 259–267.
13. Miller-Hooks E., Patterson S.S. On solving quickest time problems in time-dependent, dynamic networks. *Journal of Mathematical Modelling and Algorithms*. 2004. № 3(1). pp. 39–71.
14. Zadeh L.A. The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning. Part I. *Information Sciences*. 1975. № 8(3). pp. 199–249.
15. Garg H., Dutta, D., Dutta P., Gohain B. An extended group decision-making algorithm with intuitionistic fuzzy set information distance measures and their applications. *Computers & Industrial Engineering*. 2024. 197. DOI: 10.1016/j.cie.2024.110537.
16. Seth T., Muhuri P.K. Hesitant and uncertain linguistics based executive decision making using risk and regret aversion: Methods, implementation and analysis. *MethodsX*. 2024. vol. 12.
17. Bozhenyuk A., Gerasimenko E., Kacprzyk J., Rozenberg I. Flows in networks under fuzzy conditions. *Studies in Fuzziness and Soft Computing*. 2017. vol. 346. 168 p.
18. Gerasimenko E., Kureichik V., Kuliev E. Maximum Dynamic Flow Model for Hesitant Fuzzy Evacuation with Intermediate Storage at Nodes. *Intelligent and Fuzzy Techniques for Emerging Conditions and Digital Transformation (INFUS)*. *Lecture Notes in Networks and Systems*. 2022. vol. 307. pp. 694–704.
19. Gerasimenko E., Kureichik V. Minimum cost lexicographic evacuation flow finding in intuitionistic fuzzy networks. *Journal of Intelligent and Fuzzy Systems*. 2022. vol. 42(1). pp. 251–263.
20. Gerasimenko E.M. Kureichik V.V. Rodzin S.I. Kuharenko A.P. [Applying fuzzy logic to make decisions about flood evacuation]. *Izvestija JuFU. Tehnicheskie nauki – Izvestiya SFU. Technical sciences*. 2022. no. 4(228). pp. 15–29. (In Russ.).
21. Gamayunova V.O., Bogomolov A.S., Kushnikov V.A., Ivashchenko V.A. Multi-agent simulation of evacuation from premises, taking into account agent collisions. *Izvestija Saratovskogo universiteta. Novaja serija. Serija: Matematika. Mehanika. Informatika*

- Proceedings of the Saratov University. A new series. Series: Mathematics. Mechanics. Computer science. 2025. vol. 25. no. 1. pp. 106–115. (In Russ.).
22. Kotkova E.A., Matveev A.V. [The methodology of intelligent forecasting of the effectiveness of management of evacuation of people from public buildings]. *Nauchno-analiticheskij zhurnal «Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta Gosudarstvennoj protivopozharnoj sluzhby MChS Rossii»* – Scientific and analytical journal «Bulletin of the Saint Petersburg University of the State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia». 2021. no. 4. pp. 107–120. (In Russ.).
23. Ashraf S., Garg H., Kousar M. An industrial disaster emergency decision-making based on China's Tianjin city port explosion under complex probabilistic hesitant fuzzy soft environment. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. 2023. vol. 123. DOI: 10.1016/j.engappai.2023.106400.
24. Luo Z., Tian J., Zeng J., Pilla F. Flood risk evaluation of the coastal city by the EWM-TOPSIS and machine learning hybrid method. *International Journal of Disaster Risk Reduction*. 2024. vol. 106.
25. Dhamala M.C., Adhikari D., Khanal P. Pyakurel U. Generalized maximum flow over time with intermediate storage. *Annals of Operations Research*. 2024. vol. 335(1). pp. 111–134.
26. Xu Z. *Hesitant Fuzzy Sets Theory*. Studies in Fuzziness and Soft Computing. 2014. vol. 314.
27. D'Urso P., Chachi J., Kazemifard A., De Giovanni L. OWA-based multi-criteria decision making based on fuzzy methods. *Ann. Oper. Res.* 2024. DOI: 10.1007/s10479-024-05926-5.
28. Kazemifard A., Chachi J. MADM approach to analyse the performance of fuzzy regression models. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*. 2022. vol. 13(8). pp. 4019–4031.
29. Chen S.M., Yang M.W., Lee L.W., Yang S.W. Fuzzy multiple attributes group decision making based on ranking interval type-2 fuzzy sets. *Expert Systems with Applications*. 2012. vol. 39(5). pp. 5295–5308.
30. Wang W.Z., Liu X.W., Qin Y. Multi-attribute group decision making models under interval type-2 fuzzy environment. *Knowledge-Based Systems*. 2012. vol. 30. pp. 121–128.
31. Zadeh L.A. Fuzzy sets. *Information and Control*. 1965. vol. 8. pp. 338–353.
32. Piegat A. *Fuzzy Modelling and Control*. Berlin Heidelberg. Springer-Verlag. 2001. 728 p.
33. Atanassov K.T. Intuitionistic fuzzy sets. *Fuzzy Sets and Systems*. 1986. vol. 20(1). pp. 87–96. DOI: 10.1016/S0165-0114(86)80034-3.
34. Ngan S.-C. An extension framework for creating operators and functions for intuitionistic fuzzy sets. *Information Sciences*. 2024. vol. 666.
35. Senapati T., Chen G., Mesiar R., Yager R.R. Intuitionistic fuzzy geometric aggregation operators in the framework of Aczel-Alsina triangular norms and their application to multiple attribute decision making. *Expert Systems with Applications*. 2023. vol. 212. DOI: 10.1016/j.eswa.2022.118832.
36. Xu Z.S. Intuitionistic fuzzy aggregation operators. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*. 2007. vol. 15(6). pp. 1179–1187.
37. Ye J. Group decision-making strategy based on aggregation operators of linguistic confidence interval neutrosophic numbers in a linguistic neutrosophic multivalued scenario. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. 2025. vol. 141. DOI: 10.1016/j.engappai.2024.109823.
38. Faizi S., Shah M.H., Safabun W., Rashid T. A novel approach employing hesitant intuitionistic fuzzy linguistic Einstein aggregation operators within the EDAS approach for multicriteria group decision making. *Heliyon*. 2024. vol. 10(11).

39. Faizi S., Shah M., Rashid T. A modified VIKOR method for group decision-making based on aggregation operators for hesitant intuitionistic fuzzy linguistic term sets. *Soft Computing*. 2022. vol. 26(5). pp. 2375–2390.
40. Torra V. The weighted OWA operator. *International Journal of Intelligent Systems*. 1997. vol. 12(2). pp. 153–166.
41. Kacprzyk J., Bozhenyuk A., Gerasimenko E. Lexicographic maximum dynamic evacuation modeling with partial lane reversal based on hesitant fuzzy TOPSIS. *Applied Soft Computing*. 2023. vol. 144. DOI: 10.1016/j.asoc.2023.110435.
42. Gerasimenko E. Dynamic Flow Algorithm with Intermediate Storage for Emergency Evacuation Allowing Lane Reversal based on Incomplete Intuitionistic Fuzzy Preference Relation. *The open transportation journal*. 2024. vol. 18(1). DOI: 10.2174/0118744478281682240627062300.
43. Khanal D.P., Pyakurel U., Dhamala T.N., Dempe S., Schiermeyer I. Prioritized Maximum Multi-Commodity Flow in Evacuation Planning Dynamics of Disasters. *Natural Phenomena to Human Activity*. 2024. pp. 123–140.
44. Adhikari M.C., Pyakurel U. Lexicographic Maximum Flow Allowing Intermediate Storage. *The Nepali Mathematical Sciences Report*. 2022. vol. 39. no. 1. pp. 1–13.
45. Wang L., Gong Z., Zhang N. Consensus Modelling on Interval-Valued Fuzzy Preference Relations with Normal Distribution. *International Journal of Computational Intelligence Systems*. 2018. vol. 11(1). pp. 706–715.
46. Chen K.-S., Hsieh T.-H., Chang C.-P., Yao K.-C., Huang T.-H. Fuzzy Decision-Making and Resource Management Model of Performance Evaluation Indices. *Axioms*. 2024. vol. 13(3).
47. Baral S., Parida P., Sahoo D. Fuzzy TOPSIS technique for multi-criteria group decision-making: A study of crude oil price. *Results in Control and Optimization*. 2025. vol. 19. DOI: 10.1016/j.rico.2025.100565.
48. Gerasimenko E.M., Kravchenko D.Ju., Kureychik V.V., Kuliev Je.V., Kravchenko Ju.A. Ju.A., Rodzin S.I. [A modified bioinspired decision support method for the prevention and elimination of consequences of emergency situations]. *Informacionnye tehnologii – Information technology*. 2023. vol. 29. no. 8. pp. 423–436. DOI: 10.17587/it.29.423-436. (In Russ.).
49. Buckley J.J. *The Fuzzy Mathematics of Finance*. Fuzzy Sets and Systems. 1987. № 21(3). pp. 257–273.

Kureichik Vladimir — Ph.D., Dr.Sci., Professor, Head of the department, V.M. Kureychik CAD department, ICTIS, Southern Federal University. Research interests: bioinspired algorithms, evolutionary computation. The number of publications — 500. vkur@sfedu.ru; 1, Engels St., 347928, Taganrog, Russia; office phone: +7(863)438-3451.

Gerasimenko Evgeniya — Ph.D., Associate professor of the department, V.M. Kureychik CAD department, ICTIS, Southern Federal University. Research interests: fuzzy logic, decision-making in a fuzzy environment, flow algorithms, evacuation tasks. The number of publications — 110. egerasimenko@sfedu.ru; 1, Engels St., 347928, Taganrog, Russia; office phone: +7(863) 437-1651.

Acknowledgements. The research was funded by the Russian Science Foundation Project No. 22-71-10121-II, <https://rscf.ru/en/project/22-71-10121-II/> implemented by the Southern Federal University.