

Министерство науки и высшего образования
Российской Федерации
ФГБОУ ВО «Удмуртский государственный университет»

Безопасность в техносфере

18



Ижевск 2025

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
ФГБОУ ВО «Удмуртский государственный университет»

БЕЗОПАСНОСТЬ В ТЕХНОСФЕРЕ

*Труды XVIII Международной научно-практической конференции
(25 ноября 2025 г.)*

Выпуск 18



Ижевск
2025

УДК 004.94

ББК 68.9я43

Б40

Научный редактор:

д-р техн. наук, профессор В. М. Колодкин

Б40 Безопасность в техносфере : труды XVIII Междунар. науч. -
практ. конф (25 ноября 2025 г.) / науч. ред В. М. Колодкин. – Вып.
18. – Ижевск : Удмуртский университет, 2025. – 194 с.

ISBN 978-5-4312-1327-4

DOI:10.35634/978-5-4312-1327-4-2025-18-1-194

Сборник соответствует материалам, представленным на XVIII Международной конференции «Безопасность в техносфере». Главная тема Конференции — Современные информационные технологии при проектировании робототехнических комплексов, ориентированных на обеспечение безопасности. Труды отражают состояние научных исследований

Выделены два раздела:

- Современные информационные технологии в обеспечении безопасности;
- Приложение информационных технологий к решению практических задач.

В статьях раскрываются принципы организации цифровых систем, вопросы создания математического, алгоритмического и программного обеспечения. Содержание статей дает системное представление о современных проблемах безопасности в техносфере и влиянии информационных технологий на обеспечении безопасности.

УДК 004.94

ББК 68.9я43

ISBN 978-5-4312-1327-4

DOI: 10.35634/978-5-4312-1327-4-2025-18-1-194

© Авторы статей, 2025

© ФГБОУ ВО «Удмуртский

государственный университет», 2025

СОДЕРЖАНИЕ

I Современные информационные технологии в обеспечении безопасности	5
<i>Милад Джудакизаде, А.П. Бельтюков</i>	
Дедуктивный синтез программ для задач оптической навигации и достижимости	6
<i>Ю.М. Сметанин, Adan Garriga, В.М. Сметанина</i>	
Экспертная процедура измерения субъективной вероятности на основе компьютерной логико-семантической модели случайного эксперимента	17
<i>В.М. Колодкин, А.В. Вахитиева</i>	
Математическая модель контроля микроклимата климатической камеры	31
<i>Р.Ш. Хабибуллин</i>	
Программный комплекс для моделирования обучения с подкреплением в задачах управления реагированием на пожары на объектах ТЭК	38
<i>Ф.И. Маврикиди, С.А. Хорьков</i>	
Системное понимание неопределённости и риска	48
<i>С.А. Хорьков, И.Н. Серезжечкин, А.В. Рассамарин</i>	
Интеллектуальная система для мониторинга и управления на базе самодвижущейся платформы	58
<i>А.А. Ажеев</i>	
Использование сверточной нейронной сети для локализации трещин на бетонных поверхностях	69
<i>М.А. Сенилов, М.О. Попов</i>	
Логико-лингвистическая модель для оценки уровня техносферной безопасности. Постановка задачи и представление знаний	77
<i>А.А. Ажеев, М.С. Матвеев</i>	
Прикладное применение нейросетей и систем машинного обучения в задачах техносферной безопасности	101

<i>А.В. Вахитиева, В.К. Вахитиев, В.М. Колодкин</i>	
Перспективы повышения техносферной безопасности промышленных инсектариев на основе автоматизированных систем управления	110
II Приложение информационных технологий к решению практических задач	117
<i>А.М. Сивков</i>	
Оценка погрешности определения количества человек в больших и малых зонах здания	118
<i>А.Д. Шакиров</i>	
Работа кориолисового расходомера	125
<i>М.М. Юсупов</i>	
Детекция отклонений при 3д печати с помощью нейросети	132
<i>Boukhelkhal Mouloud</i>	
Predictive Maintenance System for an Asynchronous Motor Using Temperature-Based AI/ML Diagnostics in MATLAB	141
<i>П.Г. Огородников</i>	
Опыт применения технологий умного дома в МКД старой застройки	151
<i>Т.С. Житникова, А.П. Бызов, Е.Ю. Колесников</i>	
Совершенствование подхода к оценке потенциального риска аварий с выбросом сжиженного углеводородного газа	167
<i>Г.Ш. Хасанова, А.Б. Сивенков</i>	
Нормативно-технические проблемы обеспечения пожарной безопасности быстровозводимых каркасных зданий (юрт)	176
<i>О.Ф. Гизетдинов, И.М. Янников</i>	
К вопросу о снижении времени реагирования на вызовы в пожарно-спасательных гарнизонах	189

Раздел I

Современные информационные технологии в обеспечении безопасности

УДК 681.5.013

ДЕДУКТИВНЫЙ СИНТЕЗ ПРОГРАММ ДЛЯ ЗАДАЧ ОПТИЧЕСКОЙ НАВИГАЦИИ И ДОСТИЖИМОСТИ

Милад Джудакизаде, А.П. Бельтюков

Удмуртский Государственный Университет, г. Ижевск, Россия

e-mail: joudakizadeh@mail.ru, belt.udsu@mail.ru

В статье рассматривается применение дедуктивного синтеза программ для решения задач проверки достижимости и локализации в системах оптической навигации. Основное внимание уделяется формальной спецификации, признакам, инвариантам и декомпозиции задач в свете изоморфизма Карри-Ховарда. Представлены два примера: задача PathCheck для проверки пути между объектами и задача GoalReach для достижения одной из целей в списке. Описаны их решения, основанные на формальных методах, и проанализированы преимущества и ограничения подхода. Обсуждаются перспективы применения в робототехнике, включая интеграцию с современными библиотеками компьютерного зрения.

Ключевые слова: дедуктивный синтез, оптическая навигация, достижимость, изоморфизм Карри-Ховарда, признаки изображения, инварианты, робототехника

Введение

Дедуктивный синтез программ — это метод построения программ на основе их формальных спецификаций, обеспечивающий гарантированную корректность результата [1][2]. Этот подход особенно важен для задач, требующих высокой надежности, таких как оптическая навигация в робототехнике и беспилотных системах, а также проверка достижимости в графах [3][4]. Оптическая навигация включает определение положения камеры на основе последовательности кадров, что требует обработки признаков изображения, таких как ключевые точки, и соблюдения инвариантов, таких как геометрические ограничения [5]. В данной статье мы исследуем, как признаки, инварианты и декомпозиция используются в дедуктивном синтезе для решения задач навигации и достижимости. Мы опираемся на изоморфизм Карри-Ховарда, связывающий программы с логическими доказательствами [6]. Рассматриваются две задачи: PathCheck (проверка пути между

двумя объектами) и GoalReach (достижение одной из целей в списке). Эти задачи демонстрируют, как формальные методы обеспечивают корректность и модульность решений. Цель статьи: показать, как дедуктивный синтез программ, основанный на изоморфизме Карри-Ховарда, решает задачи проверки путей и локализации, используя признаки и инварианты изображения.

1. Признаки, инварианты и характеристики изображения

Признаки изображения играют центральную роль в задачах оптической навигации, обеспечивая основу для анализа кадров.

1.1 Признаки

Признаки — это отличительные элементы изображения, такие как углы, края или ключевые точки (например, SIFT, ORB), используемые для установления соответствий между кадрами [3]. В задачах PathCheck и GoalReach признаки неявно содержатся в типе I или X (объекты или кадры) и используются для проверки отношений, таких как $R(i,j)$ («объект i следует за j »). Например, в задаче PathCheck функция $ac:(i,j:I \Rightarrow A(i,j) | N(i,j))$ проверяет локальную достижимость, анализируя совпадения ключевых точек между кадрами, что соответствует алгоритмам визуальной одометрии [5].

1.2 Инварианты

Инварианты — это свойства, сохраняющиеся при преобразованиях системы. В оптической навигации инварианты включают геометрические ограничения (например, эпиполярную геометрию) или устойчивость дескрипторов признаков к изменениям освещения. В задаче PathCheck инвариант транзитивности пути кодируется функцией $tr:(i,j,k:I, A(i,j), A(j,k) \Rightarrow A(i,k))$. В задаче GoalReach отношение $S(x,y)$ («не дальше») сохраняет порядок объектов, обеспечивая согласованность итеративного поиска.

1.3 Другие характеристики

К характеристикам изображения относятся текстуры, гистограммы цветов или оптический поток. В PathCheck отношение недостижимости

$N(i,j)$ может указывать на несоответствие таких характеристик, например, отсутствие совпадений ключевых точек. В GoalReach отношение $S(x,y)$ использует характеристики для определения доступности целей, что важно для планирования маршрутов [7]. Роль в синтезе: Признаки и инварианты формируют онтологию задачи, задавая типы (I, X, A, B) и отношения (R, S, N). Дедуктивный синтез преобразует эти элементы в программу, которая удовлетворяет спецификации, обеспечивая корректность [8].

2. Декомпозиция и изоморфизм Карри-Ховарда

Декомпозиция задач позволяет упростить сложные вычисления, разделяя их на независимые подзадачи.

2.1 Декомпозиция задач

Декомпозиция в дедуктивном синтезе заключается в разбиении сложной задачи на подзадачи, решаемые независимо. В задачах PathCheck и GoalReach декомпозиция включает:

- Разделение на шаги: В PathCheck проверка пути $i \rightarrow j$ разбивается на прямую проверку ($ac(i,j)$) и косвенную через промежуточный объект k ($ac(i,k), ac(k,j)$).
- Итеративная обработка: В GoalReach оператор цикла fo разбивает задачу поиска цели на шаги, где каждый шаг проверяет достижимость объекта ($ab(i)$) или переходит к следующему ($sp(i)$).
- Обработка исключений: Обе задачи учитывают случаи недостижимости ($N(i,j), B(x)$), обеспечивая устойчивость к ошибкам.

2.2 Изоморфизм Карри-Ховарда

Изоморфизм Карри-Ховарда рассматривает типы как логические утверждения, а программы — как доказательства [6]. В наших задачах:

- Типы как утверждения: Типы $A(i,j)$ (достижимость) и $S(x,y)$ (порядок) представляют логические утверждения о структуре графа или последовательности кадров.

- **Функции как доказательства:** Функции, такие как `ac` или `tr` в `PathCheck`, доказывают импликации (например, $A(i,j), A(j,k) \Rightarrow A(i,k)$). В `GoalReach` функция `ab` доказывает достижимость или недостижимость объекта.
- **Цикл как индукция:** Оператор `fo` в `GoalReach` соответствует индуктивному доказательству, где каждый шаг цикла доказывает свойство для текущего объекта, а весь цикл — для конечной цели.

Пример: В `GoalReach` предикат $C(x) = (y:X, S(x,y), A(y) | (y:X, S(x,y) \Rightarrow B(y)))$ определяет цель цикла. Синтезированная программа доказывает, что для объекта `n` либо найдена достижимая цель, либо все цели недостижимы.

Преимущества: Изоморфизм обеспечивает формальную корректность и модульность, позволяя синтезировать сложные программы из простых компонентов [9].

3. Формальная постановка и решение задач

Задача `PathCheck` иллюстрирует проверку путей в графе с использованием формальных методов.

3.1 Задача `PathCheck`

Онтология:

- **Типы:** `I:Type` — объекты (местоположения или кадры), `A(i,j):Type` — достижимость, `N(i,j):Type` — недостижимость.
- **Отношения:** `R:Pred(I,I)` — прямой переход, `N:Pred(I,I)` — отсутствие пути.
- **Функции:**
 - `ac:(i,j:I => A(i,j) | N(i,j))` — проверка локальной достижимости.
 - `tr:(i,j,k:I, A(i,j), A(j,k) => A(i,k))` — транзитивность пути.
 - **Цель:** Для входных объектов `i,j,k` определить:
 - `A(i,j)` — путь `i->j` существует.

- $N(i,j), N(i,k)$ — j и k недостижимы из i (неудача первого рода).
- $N(i,j), N(k,j)$ — j недостижим из i и k (неудача второго рода).

Решение:

PathCheck =

```
{
I:Type, R:Pred(I,I), N:Pred(I,I),
ac:(i,j:I=>A(i,j)|N(i,j)), tr:(i,j,k:I,A(i,j),A(j,k)=>A(i,k)),
i,j,k:I, oaij:(A(i,j)), oni:(N(i,j),N(i,k)), onj:(N(i,j),N(k,j)),
ac(i,j)
{ aij:A(i,j); oaij(aij) }
nij:N(i,j);
ac(i,k)
{ aik:A(i,k); ac(k,j) { akj:A(k,j); tr(i,k,j,aik,akj)=aij:A(i,j); oaij(aij) }
nkj:N(k,j); onj(nij,nkj) }
nik:N(i,k); oni(nij,nik)
}
```

Объяснение: Программа сначала проверяет прямой путь $i \rightarrow j$ с помощью $ac(i,j)$. Если путь отсутствует, она пытается построить косвенный путь через k , используя $ac(i,k)$ и $ac(k,j)$. Функция tr объединяет пути $i \rightarrow k$ и $k \rightarrow j$ в $i \rightarrow j$. Решение возвращает успех или один из двух видов неудачи, в зависимости от недостижимости j или k .

Применение: В оптической навигации PathCheck может проверять, связаны ли два кадра через последовательность переходов, основанных на совпадении ключевых точек [10].

3.2 Задача GoalReach

Онтология:

- Типы: $X:Type$ — объекты, $A(x):Type$ — достижимость, $B(x):Type$ — недостижимость, $S(x,y):Type$ — порядок («не дальше»), $R(x,y):Type$ — прямой переход, $Q(x,y):Type$ — равенство по достижимости.
- Функции:
- $rf:(x:X=>S(x,x))$ — рефлексивность отношения S .

- $ab:(x:X \Rightarrow A(x)|B(x))$ — проверка достижимости объекта.
- $sp:(x:X \Rightarrow (y:X, S(x,y) \Rightarrow B(y))|y:X, R(x,y))$ — выбор следующего объекта.
- $cn:(x,y,z:X, R(x,y), S(y,z) \Rightarrow S(x,z))$ — транзитивность S .
- $nc:(x,y,z:X, R(x,y), S(x,z) \Rightarrow Q(x,z)|S(y,z))$ — перенос в обратную сторону.
- $eq:(x,y:X, Q(x,y), B(y) \Rightarrow B(x))$ — перенос недостижимости.
- $fo:(C:\text{Pred}(X), n:X, (i:X, (j:X, R(i,j) \Rightarrow C(j)) \Rightarrow C(i)) \Rightarrow C(n))$ — цикл.
- Цель: Для начального объекта $n:X$ найти $y:X, S(n,y), A(y)$ (достижимая цель) или подтвердить $(y:X, S(n,y) \Rightarrow B(y))$ (все цели недостижимы).

Решение:

GoalReach =

```
{
  rf:(x:X  $\Rightarrow$  S(x,x)), ab:(x:X  $\Rightarrow$  A(x)|B(x)),
  sp:(x:X  $\Rightarrow$  (y:X, S(x,y)  $\Rightarrow$  B(y))|y:X, R(x,y)),
  cn:(x,y,z:X, R(x,y), S(y,z)  $\Rightarrow$  S(x,z)),
  nc:(x,y,z:X, R(x,y), S(x,z)  $\Rightarrow$  Q(x,z)|S(y,z)),
  eq:(x,y:X, Q(x,y), B(y)  $\Rightarrow$  B(x)),
  fo:(C:Pred(X), n:X, (i:X, (j:X, R(i,j)  $\Rightarrow$  C(j))  $\Rightarrow$  C(i))  $\Rightarrow$  C(n)),
  n:X, ret1:(y:X, S(n,y), A(y)), ret2:((y:X, S(n,y)  $\Rightarrow$  B(y))),
  for
    ([x:X  $\rightarrow$  y:X, S(x,y), A(y)| (y:X, S(x,y)  $\Rightarrow$  B(y))], n,
  do:
    { i:X, m:(j:X, R(i,j)  $\Rightarrow$  y:X, S(j,y), A(y)| (y:X, S(j,y)  $\Rightarrow$  B(y))),
      con1:(y:X, S(i,y), A(y)), con2:((y:X, S(i,y)  $\Rightarrow$  B(y))),
      ab(i) { ai:A(i); rf(i)=sii:S(i,i); con1(i,sii,ai) }
      bi:B(i); sp(i) { f:(y:X, S(i,y)  $\Rightarrow$  B(y)); con2(f) }
      j:X, rij:R(i,j); m(j,rij) { y:X, sjy:S(j,y), ay:A(y);
        cn(i,j,y,rij,sjy)=siy:S(i,y); con1(y,siy,ay) }
      f:(y:X, S(j,y)  $\Rightarrow$  B(y)); con2({y:X, siy:S(i,y), oby:(B(y));
        nc(i,j,y,rij,siy) { qiy:Q(i,y); eq(i,y,qiy,bi)by:B(y);
          oby(by) } sjy:S(j,y); f(y,sjy)=by:B(y); oby(by) }
```

```

    }
  )
  { y:X,sny:S(n,y),ay:A(y); ret1(y,sny,ay) } f:(y:X,S(n,y)=>B(y)); ret2(f)
}

```

Объяснение: Программа использует цикл `fo` для обхода графа, начиная с объекта `n`. На каждом шаге проверяется достижимость текущего объекта (`ab(i)`). Если объект достижим, возвращается успех. Если нет, программа переходит к следующему объекту (`sp(i)`), обновляя отношения `S` и `Q` с помощью `sp`, `ps` и `eq`. Цикл завершается либо нахождением цели, либо подтверждением недостижимости всех целей.

Применение: В оптической навигации `GoalReach` может моделировать поиск ориентира в последовательности кадров, где `R(x,y)` указывает на последовательность кадров, а `S(x,y)` — на порядок целей [7].

4. Результаты и обсуждение

Сравнение решений `PathCheck` и `GoalReach` выявляет их сильные и слабые стороны.

4.1 Анализ решений

- `PathCheck`: Решение эффективно для небольших графов, где требуется проверить прямой или косвенный путь через один промежуточный объект. Оно демонстрирует простую декомпозицию: прямой путь или путь через `k`. В оптической навигации это соответствует проверке связи между двумя кадрами через промежуточный кадр.
- `GoalReach`: Решение более универсально, так как обрабатывает произвольное количество целей. Цикл `fo` реализует поиск в глубину, а отношения `S` и `Q` обеспечивают корректное обновление информации о достижимости. Это делает задачу применимой к сложным сценариям, таким как планирование маршрутов в динамических средах [Zou & Tap, 2012].

4.2 Связь с оптической навигацией

Обе задачи применимы к оптической навигации, где объекты (I , X) представляют кадры, а отношения R и S — последовательность или порядок кадров. Признаки (ключевые точки) используются для проверки достижимости ($A(i,j)$, $ab(i)$), а инварианты (например, эпиполярные ограничения) обеспечивают согласованность решений [10]. Например, GoalReach может моделировать поиск ориентира в последовательности кадров, а PathCheck — проверку согласованности двух кадров.

4.3 Преимущества и ограничения

Преимущества:

- Формальная корректность, гарантированная дедуктивным синтезом [8].
- Модульность: функции ac , tr , ab , sp могут быть переиспользованы в других задачах.
- Обработка ошибок: учет недостижимости (N , B) делает решения устойчивыми.

Ограничения:

- Высокая вычислительная сложность для больших графов, особенно в GoalReach из-за итеративного обхода.
- Необходимость точной спецификации признаков и отношений, что может быть затруднительно при шумных данных [LaValle, 2006].

4.4 Перспективы

Подход может быть интегрирован с современными библиотеками компьютерного зрения, такими как OpenCV [Bradski & Kaehler, 2008], для обработки реальных видеоданных. В робототехнике решения могут применяться для управления беспилотными летательными аппаратами в средах без GPS [Bachrach et al., 2011; Zuo et al., 2022]. Будущие исследования могут быть направлены на оптимизацию синтеза для больших графов и адаптацию к динамическим условиям [Yang et al., 2025].

Заключение

Дедуктивный синтез программ, основанный на изоморфизме Карри-Ховарда, предоставляет мощный инструмент для решения задач проверки достижимости и оптической навигации. Признаки, инварианты и характеристики изображения формируют основу онтологии, а декомпозиция задач позволяет разбивать сложные проблемы на подзадачи. Задачи PathCheck и GoalReach демонстрируют, как формальные методы обеспечивают корректность и модульность решений. В будущем подход может быть расширен для применения в реальных системах автономной навигации, включая интеграцию с современными инструментами компьютерного зрения и робототехники.

Список источников

1. Manna Z., Waldinger R. J. Toward automatic program synthesis //Communications of the ACM. – 1971. – Т. 14. – №. 3. – С. 151-165.
2. Manna Z., Waldinger R. J. Toward automatic program synthesis //Communications of the ACM. – 1971. – Т. 14. – №. 3. – С. 151-165.
3. Scaramuzza D., Fraundorfer F. Visual odometry [tutorial] //IEEE robotics & automation magazine. – 2011. – Т. 18. – №. 4. – С. 80-92.
4. LaValle S. M. Planning algorithms. – Cambridge university press, 2006.c.
5. Davison A. J. et al. MonoSLAM: Real-time single camera SLAM //IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence. – 2007. – Т. 29. – №. 6. – С. 1052-1067.
6. Howard W. A. et al. The formulae-as-types notion of construction //To HB Curry: essays on combinatory logic, lambda calculus and formalism. – 1980. – Т. 44. – С. 479-490.
7. Angeli A. et al. Fast and incremental method for loop-closure detection using bags of visual words //IEEE transactions on robotics. – 2008. – Т. 24. – №. 5. – С. 1027-1037.
8. Green C. Application of theorem proving to problem solving //Readings in artificial intelligence. – Morgan Kaufmann, 1981. – С. 202-222.

9. Joudakizadeh M., Bel'tyukov A. P. Two-level realization of logical formulas for deductive program synthesis // Вестник Удмуртского университета. Математика. Механика. Компьютерные науки. – 2024. – Т. 34. – №. 4. – С. 469-485.
10. Triggs B. et al. Bundle adjustment—a modern synthesis // International workshop on vision algorithms. – Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 1999. – С. 298-372.
11. Bachrach A. et al. RANGE—Robust autonomous navigation in GPS-denied environments // Journal of Field Robotics. – 2011. – Т. 28. – №. 5. – С. 644-666.
12. Bradski G., Kaehler A. Learning OpenCV: Computer vision with the OpenCV library. – "O'Reilly Media, Inc. 2008.
13. Zuo Z. et al. Unmanned aerial vehicles: Control methods and future challenges // IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica. – 2022. – Т. 9. – №. 4. – С. 601-614.
14. Yang D. et al. Unified Monitor and Controller Synthesis for Securing Complex Unmanned Aircraft Systems // Drones. – 2025. – Т. 9. – №. 5. – С. 353.

DEDUCTIVE PROGRAM SYNTHESIS FOR OPTICAL NAVIGATION AND REACHABILITY PROBLEMS

Milad Joudakizadeh, A.P. Beltiukov

Udmurt State University, Izhevsk, Russia

e-mail: *joudakizadeh@mail.ru, belt.udsu@mail.ru*

This article examines the application of deductive program synthesis to solve reachability verification and localization problems in optical navigation systems. The primary focus is on formal specification, features, invariants, and task decomposition in the context of the Curry-Howard isomorphism. Two examples are presented: the "PathCheck" task for verifying a path between objects and the "GoalReach" task for reaching one of the goals in a list. Their solutions, based on formal methods, are described, and the advantages and limitations of the approach are analyzed. Prospects for application in robotics, including integration with modern computer vision libraries, are discussed.

Keywords: deductive synthesis, optical navigation, reachability, Curry-Howard isomorphism, image features, invariants, robotics

УДК 681.5

**ЭКСПЕРТНАЯ ПРОЦЕДУРА ИЗМЕРЕНИЯ
СУБЪЕКТИВНОЙ ВЕРОЯТНОСТИ НА ОСНОВЕ
КОМПЬЮТЕРНОЙ ЛОГИКО-СЕМАНТИЧЕСКОЙ
МОДЕЛИ СЛУЧАЙНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА**

Ю.М. Сметанин

Удмуртский государственный университет, г. Ижевск, Россия

e-mail: *gms1234gms@rambler.ru*

Adan Garriga

Multimedia Technologies research group in Eurecat, г. Барселона,
Испания

e-mail: *adan.garriga@enti.cat*

В.М. Сметанина

Московский государственный технический университет им. Н. Э.
Баумана, Россия

e-mail: *2003vikasmet@gmail.com*

В работе рассматривается экспертная процедура измерения субъективной вероятности. Ее можно применять для измерения возможности наступления случайного события, для которого определить объективную меру возможности его наступления невозможно в данных обстоятельствах случайного испытания.

Измеренная экспертным путем в абсолютной шкале вероятность в данной работе названа субъективной вероятностью. Решена задача организации экспертной процедуры измерения субъективных вероятностей для образующих случайный эксперимент случайных событий (с.с.) $X_{i,i} = 1, n$. Показано, что для независимых в совокупности с.с. X_i , эта задача относительно просто решается методом парных сравнений с переносом их результатов в абсолютную шкалу. В качестве дискретной шкалы парных сравнений применена шкала Т. Саати, которую он использовал в методе анализа иерархий (МАИ).

Для зависимых в совокупности с.с. сложность задачи измерений резко усложняется и требует применения специального алгоритма для вычисления согласованных оценок [1].

Экспертная процедура оценки согласованных субъективных вероятностей позволяет оценить риски различных вариантов действий для достижения поставленной цели. Приведены простые примеры.

Ключевые слова: субъективная вероятность, дискретное вероятностное пространство, зависимость в совокупности система случайных событий, дискретные диаграммы Венна, парные сравнения

Введение

Задача расчета вероятностей случайных событий, образованных по формулам, построенным из данного набора случайных событий (с.с.), имеет прикладное значение в теории надежности и теории принятия решений.

Рассматривается дискретное вероятностное пространство, образуемое некоторой системой случайных событий $X_i, i = 1, n$, которая, вообще говоря, может быть зависима в совокупности. Также, в общем случае элементарные с.с. этого пространства имеют разные вероятности. Их сумма является событием достоверным. Задача расчета вероятности случайных событий составленных из образующих с.с. $X_i, i = 1, n$, посредством операций сложения, умножения и отрицания, решена в работе [1].

Цифровая трансформация предметной области деятельности (ПОД) имеет междисциплинарный характер и требует унификации понятийного и терминологического аппарата.

В работе проведен анализ смыслового содержания таких значимых понятий как риск, вероятность, возможность в математике, логике и безопасности в техносфере и обоснования необходимости их унификации.

При взгляде со стороны, управление есть многошаговый процесс принятия решений, в течение которого объект управления (ОУ) под воздействием управляющих воздействий переходит из одного начального режима (состояния) функционирования в целевой режим — функционирования (целевое состояние). Рулят по целям. Объект управления и система управления (СУ) выделяются на фоне окружающей среды (ОС) границами, которые можно описывать, моделируя входные и выходные взаимодействиями между собой ОУ, СУ и ОС. Управление бывает стохастическим (управляющие воздействия носят недетерминированный характер). Также существуют ненаблюдаемые СУ воздействия на ОУ, из-за которых в сложных системах, например социальных, может случиться срыв управления.

Управление возможно, только тогда, когда в СУ возможно получить ответ на вопрос «что будет, если мы в данной управленческой ситуации применим данное управленческое воздействие?». Если ответа нет, то нет и управления.

Уточнение и унификация понятий, связанных со случайными воздействиями, проведем на примере организации процедуры экспертного оценивания субъективной вероятности.

Вероятность — термин, используемый в математике, понимается как **объективная** числовая мера P , выраженная в абсолютной шкале со значениями в интервале $[0, 1]$, сопоставляемая случайному событию (с.с) A , которое может произойти либо не произойти как следствие некоторого испытания (эксперимента). Существуют три комплекса условий, при которых эту объективную меру можно вычислять. Первый комплекс обуславливает применимость формулы классического вычисления вероятности, второй комплекс применяется для статического вычисления вероятности и третий для геометрического. Также для вычислений применяют теоремы сложения и умножения вероятностей. Вычисленная числовая мера называется мерой возможности наступления с. с. или его вероятностью — $P(A)$. Слова вероятно, вероятное по отношению к случайному событию A понимаются в том смысле, что A можно сопоставить, либо сопоставлена вероятность $P(A)$. То есть возможность A можно объективно измерить, либо она измерена. Теоретико-вероятностные методы в силу многих причин оказались не эффективны при моделировании социально — экономических систем и систем используемых в техносфере. Там в большинстве случаев получить объективную числовую меру возможности наступления с.с. нельзя в силу невыполнения вышеперечисленного необходимого комплекса условий для ее вычисления [1].

Употребление терминов **вероятно, вероятное, вероятность** вне математических рассуждений чаще всего не подразумевает сопоставление событию его вероятности в математическом смысле, поэтому в данном случае при взаимодействии логика математика и специалиста ПОД нужно использовать термин **возможность** (возможное).

Это случаи, в которых сопоставляемая возможности мера носит субъективный характер и (или) представляется в отличной от абсолютной шкале. Возможности, в отличие от вероятностей

измеряемых в абсолютной шкале, измеряются в порядковой (ранговой) шкале, то есть можно сравнивать меры возможностей между собой указав какая больше (меньше), но насколько больше (меньше)¹ и во сколько раз больше (меньше)² в этой шкале нельзя выявить [1].

Субъективные вероятности, приписываемые случайным событиям экспертным путем, в возможностном пространстве, образуемым семейством случайных событий, при отсутствии проверки на валидность измерений, как правило, оказываются несогласованными. В работе описана процедура экспертного оценивания **субъективной вероятности** случайных событий, определяющих некоторый эксперимент, которая согласует полученные меры между собой.

1. Дискретная модель схемы испытаний

Пусть определена схема испытаний с бесконечным числом элементарных случайных событий (с.с.) и в ней, задано семейство (1) случайных событий (с.с.) в общем случае зависимых в совокупности.

$$\bar{N}_n = \langle N_1, N_2, \dots, N_n \rangle \quad (1)$$

Определено достоверное Ω и невозможное \emptyset с.с. Каждое $N_i \subseteq \Omega$ и задана его вероятность $0 \leq P(N_i) \leq 1$. Будем называть конституентой семейства (1) – $K(i)$ произведение с.с. $K(i) = N_1^{\sigma_1} \cdot N_2^{\sigma_2} \cdot \dots \cdot N_n^{\sigma_n}$, где

$$\sigma_i \in \{0, 1\} \text{ и } N_i^{\sigma_i} = \begin{cases} N_i, \sigma_i = 1 \\ \Omega \setminus N_i, \sigma_i = 0 \end{cases}.$$

Отношение зависимости $G_7 : \Omega \setminus X = X' \subset Y$ (не X влечет Y) подразумевает пустоту конституенты $K(0) = X' \cdot Y'$. Очевидно, что объединение всех с.с. сопоставленных конституентам есть достоверно событие Ω . Нативный номер конституенты в двоичной системе счисления полностью определяет конституенту, например, конституента с номером три – $K(3), 3_{(2)} = 011 \Rightarrow K(3) = N'_1 \cdot N_2 \cdot N_3$. Отметим, что некоторые конституенты, число которых равно 2^n , могут в силу зависимости с.с. быть невозможными с.с. Это наглядно видно на рис. 1.

¹Это можно сделать в шкале равных интервалов

²Это можно выявить в абсолютной шкале (шкале отношений)

Схема испытаний есть алгебраическая система (АС) – (2) включающая булеву алгебру с.с. и отношения равенства и строгого порядка.

$$A = \langle \Omega = \sum_{i \in U^0} K(i), \{+, \cdot, '\}, \{\subset, =\} \rangle \quad (2)$$

Опорное множество *Omega* и семейство модельных множеств, его образующих, для конкретных множеств (1) принято задавать диаграммой Венна (левая часть рисунка 1). На этом рисунке изображено три случайных события, зависимых в совокупности. События \aleph_1, \aleph_2 и события \aleph_2, \aleph_3 попарно независимы, а событие \aleph_1 влечет за собой наступление события $\aleph'_3 = \Omega \setminus \aleph_3$. События $\aleph'_1 \cdot \aleph_2 \cdot \aleph_3$ с заданными бинарными отношениями их объемов определяют схему случайных испытаний.

Левая часть рис. 1 выражает семантику схемы испытаний, определяемой АС (2). Однако, для компьютерных вычислений необходимо провести дискретизацию вероятностного пространства с бесконечным числом элементарных с.с. в дискретное вероятностное пространство с конечным числом в общем случае не равновозможных элементарных с.с. Способ дискретизации показан на рис. 1 справа.

С.с. левой (традиционной) диаграммы Венна, обозначенные номерами, заменены элементарными с.с. в дискретном вероятностном пространстве справа помеченными этими же номерами. Каждый номер соответствует некоторой конституенте, которая выражает с.с. в обычной диаграмме Венна слева. Например, с.с. обозначенное номером 4 слева выражает конституенту $K(4)'' = \underbrace{\aleph'_1 \cdot \aleph'_2 \cdot \aleph_3'}_{100_{(2)} = 4_{(10)}}$. Таким

образом, элементарные с.с. в дискретном вероятностном пространстве изображенном справа в общем случае неравновозможны. Они имеют вероятности, равные вероятностям соответствующих конституент вероятностного пространства, выражаемого левой диаграммой Венна.

Логические причинно-следственные отношения из непрерывного вероятностного пространства однооднозначно переносятся в дискретное. $X_3 \subset X'_1$, (с.с X_3 влечет за собой с.с. $X'_1 \setminus = \Omega X_1$), что явно указывает на зависимость в совокупности образующих эксперимент с.с. $X_1, X_2, X_3, U = \{0, 1, 2, 3, 4, 6\}$

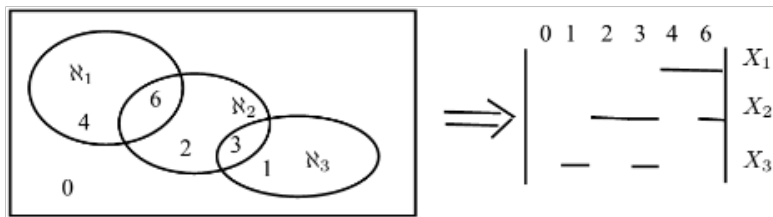


Рисунок 1 — Диаграмма Венна и ее дискретный аналог

Задача 1

Вычислить вероятности всех конституент, образуемых семейством с.с. (1) при условии, что вероятности модельных с.с., входящих в семейство (1) образующих схему испытаний, известны $P(N_i) = r_i$. Эта задача решена в работе [2] в которой построен алгоритм расчета $p(K(i)), \forall i \in U$.

Логико-семантическая модель вероятностного пространства строится в силлогистике L_{S_2} , с помощью программного средства, применение этих моделей, рассмотрено в работах [3, 4].

Относительно рис. 1 решение задачи 1 означает нахождение вероятностей конституент $K(0), K(1), K(2), K(3), K(4), K(6)$. В силу зависимости N_1, N_2, N_3 , конституенты $K(5), K(7)$ являются невозможными случайными событиями им на рис. 1 сопоставляются пустые конституентные множества³

Также выполняется соотношение:

$$P(\Omega) = P(K(0) + K(1) + K(2) + K(3) + K(4) + K(6)) = 1.$$

Для дискретной диаграммы рис. 1 при заданных вероятностях образующих испытание с.с. $r_1 = p(X_1), r_2 = p(X_2), r_3 = p(X_3)$ вероятности конституент по алгоритму из работы [2] вычисляются по формулам

$$p(K(0)) = (1 - r_2) \cdot (1 - r_1 - r_3);$$

$$p(K(1)) = r_3 - r_2 \cdot r_3;$$

$$p(K(2)) = r_2(1 - r_1 - r_3);$$

$$p(K(3)) = r_2 \cdot r_3;$$

³Множества состоящие из номеров конституент

$$p(K(4)) = r_1 \cdot (1 - r_2);$$

$$p(K(6)) = r_1 \cdot r_2;$$

Естественно, что $\sum_{i \in U} p(K(i)) = 1$. При этом вероятности r_1, r_2, r_3 не могут принимать независимо друг от друга значения из интервала $(0,1)$ в силу того, что вероятности конститuent имеют положительное значение. Область допустимых совместных значений параметров описывается неравенством $G : \begin{cases} r_1, r_2, r_3 \in (0, 1) \\ 1 - r_1 - r_3 > 0 \end{cases}$

Постановка задачи

Пусть мы находимся в ситуации, в которой **вероятности** образующих с.с. неизвестны и (или) не могут быть вычислены. В то же время имеется необходимость их согласованной оценки в форме субъективной вероятности, которую в данном случае можно получить с помощью экспертов.

Задача 2

В условиях эксперимента с образующими случайными событиями X_1, X_2, \dots, X_n , в общем случае зависимыми в совокупности, **согласованно** оценить в форме субъективных вероятностей возможность их наступления и используя эти вероятности произвести расчет субъективных вероятностей всех конститuent данного случайного эксперимента.

Здесь требуется пояснить, что понимается под согласованными оценками. Субъективные меры возможности наступления с.с. X_1, X_2, \dots, X_n измеряются также в абсолютной шкале, что подразумевает для каждой их пары возможность узнать, во сколько раз одна вероятность больше (меньше) другой. Лучшим и наиболее точным методом сравнения относительных весов вероятностей является метод парных сравнений. Он позволяет сравнивать не только объекты, измеряемые в абсолютной шкале, но и заданные в шкале порядка, в которой измеряются возможность как таковая [1]. Поэтому Томасом Саати для парных сравнений таких объектов разработана специальная абсолютная шкала сравнений в которой результат сравнения переводится в численную форму с градацией в виде набора значений из

множества $\{1/9, 1/8, \dots, 1, 2, \dots, 8, 9\}$. Эта шкала по результатам более чем полувекового тестирования в различных социально значимых проектах по всему миру в рамках применения метода анализа иерархий (МАИ) показала свою эффективность и валидность.

В психологии установлено, что способность человека производить качественные разграничения хорошо представлена пятью градациями: равно, слабое предпочтение, сильное, очень сильное и абсолютное. Можно принять компромиссные значения между этими градациями, когда нужна большая точность. В целом требуется девять значений, и они могут быть хорошо согласованы; получаемая в результате шкала подтверждается практикой. Ее использование также оказалось полезным в экспертизах, которые производились без парных сравнений.

Использование шкалы парных сравнений Т. Саати ограничено особенностями человеческой психики, которая позволяет одновременно, за исключением трансовых состояний, уверенно оперировать не более чем девятью (7 ± 2) объектами и при этом если все они слегка отличаются друг от друга, то понадобится 9 точек, чтобы различить их.

Результаты парных сравнений мер возможностей для X_1, X_2, \dots, X_n выражаются в матрице парных сравнений

$$A = (a_{ij})_{n \times n} = \begin{bmatrix} \omega_1 / \omega_1 & \omega_1 / \omega_2 & \dots & \omega_1 / \omega_n \\ \omega_2 / \omega_1 & \omega_2 / \omega_2 & \dots & \omega_2 / \omega_n \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \omega_n / \omega_1 & \omega_n / \omega_2 & \dots & \omega_n / \omega_n \end{bmatrix}$$

Здесь $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n$ сравниваемые субъективные вероятности, результат сравнения $a_{ij} = \omega_i / \omega_j$. Матрица А парных сравнений из которой можно вычислить $\bar{\omega} = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n)$ будет согласована если выполняются условия 1-4.

- 1) Все элементы матрицы неотрицательны
- 2) Матрица обратносимметричная $a_{ij} = \omega_i / \omega_j = 1 / \omega_j / \omega_i = 1 / a_{ji}$,
 $a_{ii} = 1$.

- 3) Матрица A обладает свойством совместности в том смысле, что для всех номеров $i, j, k = \overline{1, n}$ имеют место равенства $a_{ij} \cdot a_{jk} = \omega_i / \omega_j \cdot \omega_j / \omega_k = a_{ik}$
- 4) В случае выполнения условий согласованности 1-3, число n является собственным $\lambda = n$ значением матрицы A , а вектор столбец вероятностей (весов) $\bar{\omega}^T = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n)^T$ соответствующим собственным вектором матрицы удовлетворяющим уравнению $A \cdot \bar{\omega}^T = n \cdot \bar{\omega}^T$ [6]

Три бинарных отношений между возможными и недостоверными случайными событиями, выражают детерминированные причинно-следственные связи (включает, равносильно и независимость). Наличие в вероятностном пространстве отношений включает, равносильно между образующими с.с. либо их противоположными событиями указывает на зависимость в целом образующих испытание с.с.

Описание экспертной процедуры нахождения субъективных вероятностей образующих дискретное возможностное пространство случайных событий X_1, X_2, \dots, X_n состоит из пяти шагов.

- 1) Построить дискретную диаграмму Венна (ДДВ), отражающую логические связи между с.с. Таковыми являются отношение равенства, строгого включения и независимости образующих конститuentных множеств. Построение ДДВ осуществляется по разработанному и программно реализованному алгоритму. По алгоритму изложенному в работе [2], рассчитываются вероятности конститuent в предположении, что вероятности образующих с.с. X_1, X_2, \dots, X_n равны соответственно r_1, r_2, \dots, r_n . Далее строится область G допустимых значений параметров r_1, r_2, \dots, r_n .
- 2) Построить матрицу парных сравнений A для оценки соотношений (относительных весов) неизвестных пока вероятностей $p_i = p(X_i), i = \overline{1, n}$. Для того, чтобы получить согласованные оценки субъективных вероятностей нужно, чтобы матрица парных сравнений обладала свойствами 1-4. Как правило, при числе объектов оценивания $n > 5$ эта матрица не обладает свойствами 3 и 4. Т. Саати в созданном им МАИ указал как оценить несогласованность экспертных оценок. Он ввел специальный числовой

показатель — индекс совместности, который оценивает «степень невыполнения» свойства совместности $CI = \lambda_{max} - n/(n-1)$, где λ_{max} — максимальное собственное число матрицы парных сравнений. Индекс согласованности считается приемлемым, если он менее 0,1. Для построения матрицы парных сравнений требуется провести $n \cdot (n-1)/2$ сравнений. В работах [5, 6] указан способ построения согласованной матрицы парных сравнений с индексом совместности равным нулю. Сравнение его с традиционным методом парных сравнений на многочисленных примерах показало, что получаемые веса сравниваемых объектов обычным для МАИ способом и сокращенным отличаются незначительно. При сокращенном способе требуется провести всего лишь $n-1$ парное сравнение. Как показано в [6], упрощенный способ построения согласованной матрицы парных сравнений позволяет построить матрицу, обладающую свойством совместности. Для его реализации выделяется одно эталонное с.с. которому эксперт наиболее уверенно присваивает субъективную вероятность X_1 и переобозначаются остальные. Затем производится $n-1$ парное сравнение X_1 с остальными и вычисляется первая строка матрицы. Другие элементы матрицы находятся на основе подразумеваемого свойства ее совместности по формуле $a_{ij} = a_{i1} \cdot a_{1j} = \frac{a_{1j}}{a_{i1}}, i, j = 2, \dots, n$

- 3) Нахождение относительных весов. Показано [5, 6], что в качестве относительных весов $\bar{\omega} = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n)$ можно взять последний столбец матрицы A . В МАИ он затем нормируется так чтобы $\sum_i \omega_i = 1$.
- 4) Нахождение субъективных вероятностей. После нахождения весов находятся субъективные вероятности для этого наиболее «понятному» для эксперта случайному событию X_1 им присваивается вероятность $p(X_1) = p_1$. Затем на основании вычисленных относительных весов $\bar{\omega} = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n)$ вычисляются субъективные вероятности $p_i = p(X_i)$ по следующей формуле $p(X_i) = \frac{\omega_i}{\omega_1} \cdot p_1 = a_{i1} \cdot p_1, i = \overline{1, n}$. Если получаются вероятности большие единицы, то экспертная оценка $p(X_1) = p_1$ пересматривается в сторону уменьшения.
- 5) Проверяется, что полученные значения $p(X_i)$ входят в область допустимых значений G , при этом значения $p(X_i)$ подставляются

в описание области G вместо параметров r_i . Если набор $p(X_i)$ удовлетворяет ограничениям области G , то задача 2 решена. Если нет, то пытаются скорректировать эталонное значение $p(X_1)$, чтобы пересчитанные вероятности удовлетворяли ограничениям области G .

Заметим, что проверка совместности набора вероятностей $p(X_i)$ (п. 5) нужна только для зависимых в совокупности случайных событий, если все они независимы в совокупности, то значения вероятности могут принимать в совокупности любые значения из $(0, 1)$ интервала.

Рассмотрим пример.

Пусть намечено два варианта проведения спасательной операции (СО). В каждом из этих вариантов имеется возможность наступления трех с. с. X_1, X_2, X_3 , которые могут привести к недостижению целей СО. При этом для планировщиков, исходя из их практического опыта, ясно, что субъективная вероятность наступления негативных с.с. различаются в каждом из вариантов. Пусть между с.с. X_1, X_2, X_3 существуют зависимость описываемая формулой $X_3 \subset X'_1$.

Требуется оценить уровни риска неуспеха по первому и второму варианту.

По заданной зависимости между X_1, X_2, X_3 можно с помощью программного средства разработанного авторами построить дискретную диаграмму Венна, изображенную на рис. 1 смотри работу [2]. По ней решить задачу 1 (решение показано выше). Затем нужно экспертно оценить субъективные вероятности X_1, X_2, X_3 при действиях по первому и второму варианту и в каждом случае вычислить вероятности рисков по формуле $P_j(X_1 + X_2 + X_3), j = 1, 2$. Это и есть искомые оценки рисков.

Экспертным путем строим совместную матрицу парных сравнение относительных весов рисков первого варианта действий. Этот процесс автоматизирован с помощью пакета Excel.

$$\begin{bmatrix} 1 & 1/2 & 3 \\ 2 & 1 & 6 \\ 1/3 & 1/6 & 1 \end{bmatrix}$$
 затем находим из последнего столбца вектор весов $(3, 6, 1)$ и нормируем его $\omega = (0,3; 0,6; 0,1)$. Затем, считая, что субъективная вероятность первого риска равна 0,4, вычисляем по формулам $p(X_i) = \frac{\omega_i}{\omega_1} \cdot p_1 = a_{i1} \cdot p_1, i = \overline{1,3}$. $P(X_1) = 0,4; P(X_2) = 0,8; P(X_3) = 0,13$. Чтобы вычислить риск $P_1(X_1 + X_2 + X_3)$ для

первого варианта, нужно вычислить сумму вероятностей конституент с номерами 1, 2, 3, 4, 6 либо вероятность противоположного $(X_1 + X_2 + X_3)$ события $(X'_1 \cdot X'_2 \cdot X'_3) = K(0)$ (видно по рисунку 2)

$$p(K(0)) = (1 - r_2) \cdot (1 - r_1 - r_3) = (1 - 0,8)(1 - 0,4 - 0,13) = 0,94;$$

$$P_1(X_1 + X_2 + X_3) = 1 - 0,94 = 0,06;$$

Вычислим субъективную вероятность риска неудачи по второму варианту.

Матрица парных сравнений относительных весов рисков по второму варианту может отличаться от матрицы первого варианта. Например,

иметь такой вид
$$\begin{bmatrix} 1 & 1/4 & 6 \\ 4 & 1 & 24 \\ 1/6 & 1/24 & 1 \end{bmatrix}, \omega = (6/31; 24/31; 1/31)$$
 эталонным

для назначения субъективной вероятности можно взять третье с.с. назначение ее значения экспертом должно быть таким, чтобы наибольшая из вероятностей $P(X_2)$ была меньше единицы. Пусть эксперт присвоил $P(X_3) = 0,04$, тогда $P(X_2) = 0,96$; $P(X_1) = 0,24$. В этом случае $p(K(0)) = (1 - r_2) \cdot (1 - r_1 - r_3) = (1 - 0,96)(1 - 0,24 - 0,04) = 0,032$; $P_2(X_1 + X_2 + X_3) = 1 - 0,032 = 0,968$. Второй вариант более рискованный. Еще раз отметим, что для системы независимых в совокупности с.с. образующих схему эксперимента вычисление вероятностей конституент (вероятностей элементарных с.с.) значительно упрощается. В предлагаемой методике остается реализовать программно алгоритм расчета вероятностных полиномов, разработанный в [2].

Список источников

1. Пытьев Ю. П. Вероятность, возможность и субъективное моделирование в научных исследованиях. Математические и эмпирические основы, приложения. М.: «Физматлит», 2017. 250 с.
2. Ю. М. Сметанин, А. Garriga, В. М. Сметанина [и др.] Задача вычисления вероятностей элементарных событий в дискретном вероятностном пространстве // Безопасность в техносфере / М-во науки и высш. образования РФ, ФГБОУ ВО "Удмуртский государственный университет Междунар. ассоц. специалистов пожар., пром. и эколог. безопасности; науч. ред. В. М. Колодкин. - Ижевск : Удмуртский университет, 2024. Вып. 17. Труды XVII Междунар. науч.-практ. конф. (24 октября 2024 г. С. 19-28
3. Сметанин Ю.М. Использование распределенных вычислений при моделировании предметной области в универсальной силлогистике // Программные системы: теория и приложения. 2024. Т. 15. № 2(61). С. 87–112. https://psta.psiras.ru/read/psta2024_2_87-112
4. Сметанин Ю. М. Прикладные модели и задачи силлогистики // Программные системы: теория и приложения. 2025. Т. 16. № 4. С. 119–154. https://psta.psiras.ru/2025/4_119-154.
5. Ногин В.Д. Принятие решений при многих критериях (учебно-методическое пособие). СПб: Изд-во "Ютас 2007. 104 с.
6. 6. Ногин В.Д. Упрощенный вариант метода анализа иерархий на основе нелинейной свертки критериев //Журнал вычислительной математики и математической физики, 2004, т. 44, №7, С. 1261–1270.

EXPERT-DRIVEN MEASUREMENT OF SUBJECTIVE PROBABILITY VIA A COMPUTATIONAL LOGIC-SEMANTIC FRAMEWORK FOR RANDOM EXPERIMENTS

Iu M. Smetanin

Udmurt State University, Izhevsk, Russia

e-mail: *gms1234gms@rambler.ru*

Adan Garriga

Multimedia Technologies research group in Eurecat, Barcelona, Spain

e-mail: *adan.garriga@enti.cat*

V. M. Smetanina

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

e-mail: *2003vikasmet@gmail.com*

The paper examines an expert procedure for measuring subjective probability. It can be applied to measure the possibility of a random event occurring, for which an objective measure of its occurrence is impossible to determine under the given circumstances of a random trial.

The probability measured by experts on an absolute scale is referred to as subjective probability in this work. The task of organizing an expert procedure for measuring subjective probabilities of random events (r.e.) X_i , $i=1, n$, forming a random experiment, has been solved. It is shown that for collectively independent r.e. X_i , this task is solved relatively simply using the method of pairwise comparisons with the transfer of their results to an absolute scale. The discrete scale of pairwise comparisons used is the scale by T. Saaty, which he employed in the Analytic Hierarchy Process.

For collectively dependent r.e., the complexity of the measurement task sharply increases and requires the application of a special algorithm for calculating consistent estimates [1]. The expert procedure for assessing consistent subjective probabilities allows for the evaluation of risks associated with various courses of action to achieve a set goal. Simple examples are provided.

Keywords: subjective probability, discrete probability space, collectively dependent system of random events, discrete Venn diagrams, pairwise comparisons

УДК 007.3, 614.843

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ КОНТРОЛЯ МИКРОКЛИМАТА КЛИМАТИЧЕСКОЙ КАМЕРЫ

В.М. Колодкин, А.В. Вахтиева

Удмуртский Государственный Университет, г. Ижевск, Россия

e-mail: *Kolodkin@rintd.ru, anna.vashtieva@ya.ru*

В работе рассматривается математическая модель поддержания микроклимата в климатической камере. Модель ориентирована на поддержание микроклиматических условий путем создания интеллектуально-адаптивной системы автоматического регулирования параметров микроклимата в климатической камере. Модель основана на фундаментальных законах сохранения энергии, массы.

Ключевые слова: математическая модель микроклимата, управление температурно-влажностными режимами, интеллектуально-адаптивные системы регулирования.

Введение

Климатические камеры широко применяются при проектировании, производстве и контроле изделий. Камеры призваны поддерживать заданные параметры микроклимата. При построении систем управления режимами работы климатических камер зачастую используют достаточно простые (кибернетическое) модели, не отражающие физических закономерностей процессов, имеющих место в камере. Подход позволяет успешно выбрать структуру системы управления (законы управления). Однако возникают сложности с определением показателей качества управления. Подход к построению систем управления на основе анализа физических процессов в камере позволяет искать подходы к модернизации камеры (объекта управления). Последнее весьма значимо, если климатическая камера предназначена для исследования принципиально новых изделий.

Основные характеристики климатической камеры

Климатическая камера предназначена для испытания миниатюрных изделий (характерный размер 0.05 м) в условиях заданных параметров микроклимата: температуры, влажности. Камера состоит из отдельных секций. Каждая секция имеет автономную систему управления. Цикл испытаний занимает 200-300 часов, в течении которых параметры микроклимата скачкообразно изменяются N раз (циклический режим). Временной интервал испытаний (интервал микроцикла), в течении которого температура и относительная влажность должны быть постоянными, составляет ~ 20 - 30 часов. Температура воздушной среды в секции камеры при испытаниях скачкообразно изменяется в пределах от 20°С до 80 °С, а относительная влажность воздушной среды - в пределах от 55 % до 85 %. За цикл испытаний температура воздушной среды вне климатической камеры может изменяться в широких пределах.

Конструктивно секция климатической камеры включает две зоны:

- Зону подготовки воздушной среды,
- Рабочую зону.

Зона подготовки оборудована:

- Системой нагрева и охлаждения воздуха (теплообменник);
- Ультразвуковым парогенератором с системой подачи воды;
- Фреоновым осушителем.

Управление воздушными потоками осуществляется соответствующими заслонками и вентиляторами. Подача теплоносителя для системы нагрева и охлаждения воздуха регулируется насосом и вентилями. Поддержание уровня воды в камере парогенератора обеспечивается насосом и вентилями. Нагнетатель воздуха направляет подготовленную воздушную среду из зоны подготовки в рабочую зону. Размеры секции климатической камеры - 1.5 * 0.8 * 0.1 м.

Математическое описание воздушной среды в климатической камере

В отношении климатической камеры рассмотрению подлежат два взаимосвязанных процесса [1-3]:

- динамика изменения состояния воздушной среды в секции климатической камеры при внешних воздействиях;
- управление состоянием воздушной среды.

В первом приближении можно считать, что воздушная среда однородна в объеме секции камеры. Принимается, что изменениями термодинамического состояния изделий, заполняющих секцию, можно пренебречь. При принятых допущениях для описания динамики изменения состояния воздушной среды в секции и для управления состоянием воздушной средой, может быть использована интегральная модель. Отметим, что использование модели на основе уравнений баланса энергии и массы воды в воздушной среде приемлемо исключительно с точки зрения построения системы управления (анализа и синтеза алгоритмов управления).

Уравнения баланса энергии и влаги в воздушной среде секции камеры -

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{1}{\rho_{air} \cdot v_{air} \cdot c_{air}} * [J_{input} - J_{loss}] \quad (1)$$

$$v_{air} \cdot \frac{dX}{dt} = G_s \cdot X_s - G_{out} \cdot X + G_{steam} \quad (2)$$

В уравнениях

θ – температура воздуха в секции камеры, (°C);

ρ_{air} – плотность воздуха, (кг/м³);

v_{air} – объем воздуха в секции камеры, (м³);

c_{air} – удельная теплоемкость воздуха, [Дж/(кг· град)];

J_{input} – тепловые поступления от системы нагрева/охлаждения, (Вт);

J_{loss} – тепловые потери за счет теплопроводности и конвекции, (Вт);

X – абсолютная влажность воздушной среды в секции камеры, (кг_{water}/ м³);

G_s – приток воздуха в секцию камеры из внешней среды, (м³/с);

X_s – абсолютная влажность воздуха во внешней среде, (кг_{water}/ м³);

G_{out} – расход воздуха, попадающего из секции камеры во внешнюю среду, (м³/с);

G_{steam} – расход воды при увлажнении воздуха, (кг/с).

Тепловые поступления от системы нагрева/охлаждения:

$$J_{input} = G_{cool} \cdot c_{cool} \cdot \Delta Q_{cool}, \quad (3)$$

G_{cool} – расход теплоносителя, (кг/с);

c_{cool} – удельная теплоемкость теплоносителя, [Дж/(кг·град)];

$\Delta Q_{cool} = Q_{cool-st} - Q_{cool-fin}$ – перепад температур на входе и выходе теплообменника системы нагрева/охлаждения воздуха секции камеры, (град);

$Q_{cool-st}, Q_{cool-fin}$ – температура теплоносителя на входе и выходе теплообменника, (град).

Тепловые потери в окружающую среду за счет теплопроводности и конвекции:

$$J_{loss} = k \cdot F \cdot (\theta - \theta_s), \quad (4)$$

θ_s – температура окружающей среды, (°C);

k – эффективный коэффициент теплопередачи через единицу площади боковой стенки камеры, [Дж/(м²·с·град)];

F – площадь боковой стенки секции камеры, (м²).

Давление насыщенного пара по аппроксимации Ардена-Бака [4] -

$$P_n(\theta) = 6.1121 \cdot \exp \left[\frac{(18.678 - \theta/234.5) \cdot \theta}{257.14 + \theta} \right], (\text{гПа}) \quad (5)$$

В формуле (5) $P_n(\theta)$ давление в гПа, температура в °C.

Парциальное давление водяного пара $P(\theta) = P_n(\theta) \cdot \varphi/100$, где φ – относительная влажность воздуха. Переходя в (5) от гПа к Па имеем

$$P(\theta) = \frac{P_n(\theta) \cdot \varphi}{100} \cdot 100 = P_n(\theta) \cdot \varphi, (\text{Па}). \quad (6)$$

Если считать, что к водяному пару применимо уравнение состояния Менделеева-Клапейрона, то для массы водяного пара в воздухе m_{water} при температуре θ_K °K имеем –

$$m_{water} = \frac{\mu \cdot P(\theta) \cdot v_{air}}{R \cdot \theta_K}, (\text{кг}) \quad (7)$$

μ – молекулярный вес водяного пара, 0.018 кг/моль;

R – газовая постоянная, 8.314 Дж/(моль · °K)

С учетом (6), (7) выражение для абсолютной влажности X , (кг/м³)

$$X = \frac{m_{water}}{v_{air}} = \frac{\mu \cdot \varphi}{R \cdot (\theta + 273.15)} \cdot 6.1121 \cdot \exp \left[\frac{(18.678 - \theta/234.5) \cdot \theta}{257.14 + \theta} \right], \text{ кг/м}^3 \quad (8)$$

Выражение (8) определяет функциональную зависимость абсолютной влажности воздушной среды (массы водяного пара) в климатической камере от измеренной в камере относительной влажности φ (%) и температуре θ °С.

Уравнения (1) - (8) определяют динамику температурно-влажностного режима климатической камеры.

Заключение

Представленная математическая модель позволяет исследовать характеристики температурно-влажностного режима климатической камеры. Модель обеспечивает расчет задающих воздействий по параметрам микроклимата. Модель, в силу принятых допущений, предназначена для построения интеллектуально-адаптивной системы автоматического управления и регулирования параметров микроклимата в климатической камере.

Список источников

1. Пешко М. С. Адаптивная система управления параметрами микроклимата процессов производства и хранения пищевых продуктов : автореф. дис. ... канд. тех. наук: 05.13.06. Омск, 2015. 23 с.
2. Паюк Л. А., Воронина Н. А., Умурзакова А. Д., Лазуткина Е. Е., Хацевский К. В. Система управления микроклиматом тепличного комплекса на базе нечёткой логики // Омский научный вестник. 2024. № 2 (190). С. 59–68. DOI: 10.25206/1813-8225-2024-190-59-68.
3. Герасимов Д. Н., Лызлова М. В. Адаптивное управление микроклиматом в теплицах // Известия РАН. Теория и системы управления. 2014. № 6. С. 124–135. URL: <https://clck.ru/HHiDy> (дата обращения: 10.11.2025).
4. Vömel H. Saturation Vapor Pressure Formulations. University of Colorado, 2015. – 14 p.

A MATHEMATICAL MODEL FOR MICROCLIMATE CONTROL IN A CLIMATIC CHAMBER

V.M. Kolodkin, A.V. Vashtieva

Udmurt State University, 426034 Russia, Izhevsk, Universitetskaya, 1
e-mail: *Kolodkin@rintd.ru, anna.vashtieva@ya.ru*

This paper examines a mathematical model for maintaining microclimate in a climate chamber. The model is aimed at maintaining microclimatic conditions by creating an intelligent adaptive system for automatically regulating microclimate parameters in the climate chamber. The model is based on the fundamental laws of conservation of energy and mass.

Keywords: microclimate mathematical model, temperature and humidity control, intelligent adaptive control systems.

УДК 614.84.31

ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ОБУЧЕНИЯ С ПОДКРЕПЛЕНИЕМ В ЗАДАЧАХ УПРАВЛЕНИЯ РЕАГИРОВАНИЕМ НА ПОЖАРЫ НА ОБЪЕКТАХ ТЭК

Р.Ш. Хабибулин

Академия ГПС МЧС России, г. Москва, Россия

e-mail: *kh-r@yandex.ru*

В статье представлен специализированный программный комплекс для моделирования и сравнительного анализа методов обучения с подкреплением, предназначенный для решения задач оптимизации управления реагированием на пожары на объектах топливно-энергетического комплекса. Программный продукт реализует модульную архитектуру, включающую компоненты загрузки и предобработки данных реальных пожаров, среду симуляции марковского процесса принятия решений, движок обучения с подкреплением с поддержкой множественных алгоритмов, а также подсистему генерации аналитических отчетов с визуализацией результатов. Система обеспечивает автоматизацию полного цикла экспериментального исследования: от загрузки исходных данных до формирования научного отчета с результатами сравнительного анализа эффективности различных методов. Валидация программного комплекса проведена на наборе данных из 194 пожаров, подтвердившая корректность реализации алгоритмов и адекватность моделирования.

Ключевые слова: программный комплекс, обучение с подкреплением, топливно-энергетический комплекс, марковские модели, управление реагированием на пожар

Введение

Обучение с подкреплением (*Reinforcement Learning, RL*) является одним из наиболее перспективных направлений машинного обучения для решения задач последовательного принятия решений в сложных динамических средах. Особую актуальность данные методы приобретают в критических областях, таких как управление реагированием на пожары и чрезвычайные ситуации, где необходимо принимать

оптимальные решения в условиях неопределенности, ограниченного времени и высоких рисков [1, 2]. Пожары на объектах топливно-энергетического комплекса (далее – ТЭК) представляют собой один из наиболее опасных типов чрезвычайных ситуаций, требующих быстрого и эффективного реагирования для минимизации ущерба и предотвращения катастрофических последствий

Применение методов обучения с подкреплением для оптимизации управления реагированием на пожары сталкивается с рядом специфических вызовов: необходимостью работы с реальными данными о пожарах, необходимостью учета множества разнородных факторов (тип объекта защиты, фаза развития пожара, доступные ресурсы, погодные условия и другие), а также критичностью результатов для обеспечения безопасности людей и материальных ценностей. В этой связи разработка специализированного программного инструментария, обеспечивающего полный цикл исследования методов обучения с подкреплением в данной предметной области, представляет значительный научно-практический интерес.

Существующие программные решения для работы с обучением с подкреплением предоставляют реализации базовых алгоритмов и универсальные интерфейсы для создания сред, однако не учитывают специфику предметной области управления реагированием на пожары: структуру статистических данных пожаров, нормативные требования к классификации действий на пожаре, особенности марковского моделирования динамики фаз реагирования на пожары, необходимость интеграции экспертных знаний специалистов пожарной охраны.

Целью разработки представляемого программного комплекса является создание специализированного инструментария для автоматизации полного цикла исследования методов обучения с подкреплением применительно к задачам оптимизации управления реагированием на пожары объектов ТЭК. Программный продукт должен обеспечивать: (1) загрузку и предобработку данных реальных пожаров с учетом их специфической структуры; (2) реализацию среды симуляции, адекватно моделирующей динамику развития фаз реагирования на пожар как марковский процесс принятия решений; (3) унифицированный интерфейс для обучения и оценки различных алгоритмов обучения с подкреплением; (4) автоматическую генерацию научных отчетов с ре-

зультатами сравнительного анализа методов, включая статистическое тестирование и визуализацию.

Архитектура и функционал программного комплекса

Программный комплекс реализован на языке *Python 3.8* с использованием объектно-ориентированного подхода и следованием принципам модульной архитектуры. Выбор языка программирования *Python* обусловлен его доминирующим положением в области машинного обучения, наличием обширной экосистемы научных библиотек (*NumPy*, *Pandas*, *SciPy*, *Matplotlib*), а также читаемостью кода и поддержкой быстрого прототипирования, что крайне востребовано в научных исследованиях. Система состоит из шести основных модулей, организованных в иерархическую структуру с четко определенными интерфейсами взаимодействия (Рисунок 1).

Модуль *data_loader.py* реализует функционал загрузки данных о пожарах из CSV-файлов и их трансформации в формат, пригодный для обучения рассматриваемых моделей обучения с подкреплением. Модуль выполняет следующие операции: (1) чтение исходных данных с автоматическим определением кодировки и разделителей; (2) валидацию целостности данных и обработку пропущенных значений; (3) извлечение признаков состояний из атрибутов пожаров; (4) нормализацию числовых признаков для обеспечения численной стабильности алгоритмов обучения; (5) разделение данных на обучающую и тестовую выборки с сохранением временной последовательности фаз реагирования.

Модуль *environment.py* содержит реализацию среды симуляции процессов реагирования на пожар как марковского процесса принятия решений. Пространство состояний представлено 11-мерным вектором, включающим: фазу реагирования на пожар, тип объекта ТЭК, площадь пожара, доступные ресурсы, расстояние от объекта защиты до пожарно-спасательной части, метеоусловия, время суток, а также накопленные издержки (время, ущерб, затраченные ресурсы). Пространство действий состоит из 6 дискретных альтернатив, соответствующих практике действий пожарно-спасательных подразделений.

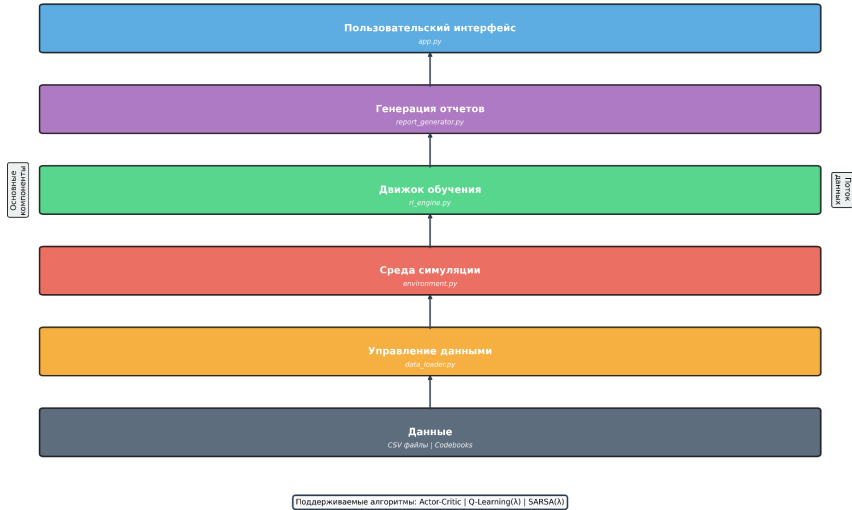


Рисунок 1 — Архитектура программного комплекса

Модуль *rl_engine.py* представляет собой ядро системы, реализующее три классических алгоритма обучения с подкреплением: Актор-Критик, *Q-Learning* и *SARSA* ($State \rightarrow Action \rightarrow Reward \rightarrow State \rightarrow Action$). Все алгоритмы реализованы с использованием линейной функциональной аппроксимации ценностных функций, что обеспечивает интерпретируемость весовых коэффициентов и возможность анализа значимости различных признаков состояния для принятия решений.

Метод Актор-Критик реализует архитектуру с двумя компонентами: актор, представляющий стохастическую политику через softmax-функцию над линейной комбинацией признаков, и критик, аппроксимирующий функцию ценности состояния. Алгоритм *Q-Learning* аппроксимирует функцию действие-ценность для каждой пары состояние-действие через линейную комбинацию признаков с отдельным набором весовых коэффициентов для каждого действия. Алгоритм *SARSA* является вариантом обучения функции, обеспечивающим более консервативное обучение, что потенциально приводит к более безопасным стратегиям в подобных критических приложениях.

Модуль *app.py* реализует высокоуровневый интерфейс для проведения вычислительных экспериментов, обеспечивая автоматизацию полного цикла исследования: загрузку данных, инициализацию среды и обучающих агентов, выполнение обучения с мониторингом прогресса, оценку обученных моделей на тестовых данных, статистический анализ результатов и визуализацию.

Модуль *report_generator.py* отвечает за автоматическую генерацию научных отчетов в формате *HTML* с результатами сравнительного анализа методов обучения с подкреплением. Отчет включает следующие разделы: введение с описанием постановки задачи, архитектурные диаграммы, блок-схемы алгоритмов, графики кривых обучения, статистическое сравнение методов с использованием бутстрап-тестирования, визуализацию распределений метрик эффективности, таблицы с детальными результатами, выводы и рекомендации.

Статистический анализ реализован через независимое двухвыборочное бутстрап-тестирование с 5000 репликациями. Для метрик с правыми хвостами распределения (время тушения, материальный ущерб) в качестве статистики используется медиана с расчетом величины эффекта через критерий *Cliff's delta*. Для метрик с более симметричным распределением (интегральное вознаграждение, затраченные ресурсы) применяется среднее значение с расчетом величины эффекта через критерий *Cohen's d*.

Программный комплекс разработан на языке *Python* с использованием следующих программных библиотек и технологий:

- *NumPy 1.21*: Векторные операции над числовыми массивами, реализация линейной алгебры для аппроксимации функций ценности.
- *Pandas 1.3*: Загрузка, обработка и анализ табличных данных из базы данных о пожарах.
- *Matplotlib 3.4*: Построение графиков кривых обучения, гистограмм и других визуализаций.
- *SciPy 1.7*: Статистические функции для бутстрап-тестирования и анализа распределений.
- *Jinja2 3.0*: Шаблонизация HTML-отчетов с динамической вставкой результатов и визуализаций.

- *pytest 7.0*: Фреймворк для модульного и интеграционного тестирования компонентов системы.

Валидация программного комплекса

Валидация корректности работы программного комплекса проведена на наборе данных из 194 пожаров на объектах ТЭК, произошедших в период с 2009 по 2021 годы на территории Российской Федерации. Набор данных включает разнообразные типы объектов защиты (нефтеперерабатывающие заводы, нефтебазы, компрессорные станции) и широкий диапазон значений характеристик пожаров.

В таблице показаны результаты эффективности рассматриваемых методов обучения с подкреплением (медианные значения на тестовой выборке из 39 инцидентов).

Метод Актор-Критик продемонстрировал наилучшую производительность по всем метрикам эффективности, достигнув медианного интегрального вознаграждения -26,5 (Рисунок 2), что на 25,3% выше эвристического и статистически значимо превосходит *Q-Learning* и *SARSA* ($p < 0,001$). Наиболее эффективен данный алгоритм по времени тушения (51,2 мин) по сравнению с *Q-Learning* (154,9 мин) и *SARSA* (141,2 мин).

Таблица 1 — Результаты эффективности методов обучения

Метод обучения с подкреплением	Награда	Время реагирования (мин.)	Ресурсы (ед.)
Актор-Критик	26.5	51.2	8.5
Q-Learning	-31.4	154.9	9.2
Актор-SARSA	-31.2	141.2	9.0

Разработанный программный комплекс представляет собой специализированное решение для автоматизации полного цикла исследований методов обучения с подкреплением в предметной области управления реагирования на пожары на объектах ТЭК. Ключевым преимуществом системы является тесная интеграция с реальными данными и учет

специфики предметной области на всех уровнях архитектуры: от структуры пространства состояний и действий до формы функции вознаграждения и методов статистического анализа результатов.

В отличие от универсальных фреймворков, ориентированных на стандартные бенчмарки и требующих значительных усилий по адаптации к конкретной предметной области, разработанная система предоставляет готовый инструментарий, специфичный для рассматриваемых задач управления реагированием. Реализация трех алгоритмов обучения с подкреплением различных классов позволяет исследователю проводить сравнительный анализ подходов и выбирать наиболее подходящий метод для конкретной задачи.

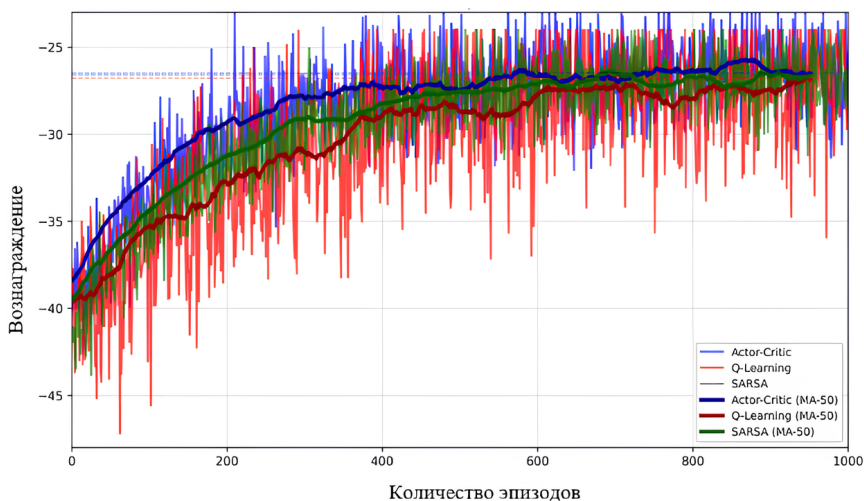


Рисунок 2 — График медианного интегрального вознаграждения (награда) в зависимости от количества эпизодов и методов обучения с подкреплением

Разработанный программный комплекс может быть применен в следующих направлениях практической деятельности: научные исследования в области применения методов машинного обучения для управления реагированием на пожары и чрезвычайные ситуации, обучение и подготовка оперативного состава пожарной охраны, разра-

ботка систем поддержки принятия решений для диспетчерских служб, анализ ретроспективных данных о пожарах, оптимизация размещения пожарно-спасательных подразделений, разработка нормативно-методических документов.

В дальнейшем планируется интеграция разработанного программного комплекса как модуля в создаваемый цифровой двойник процессов реагирования на пожары объектов ТЭК [3].

Заключение

Представленные в работе результаты можно обобщить следующим образом:

1. Разработан специализированный программный комплекс для автоматизации полного цикла исследований методов обучения с подкреплением в задачах оптимизации управления реагированием на пожары на объектах ТЭК.

2. Реализованы три алгоритма обучения с подкреплением: Актор-Критик, *Q-Learning* и *SARSA*, с полной поддержкой настройки гиперпараметров.

3. Среда симуляции реализует марковский процесс принятия решений с 11-мерным пространством состояний, 6 дискретными действиями и многокритериальной функцией вознаграждения.

4. Валидация программного комплекса проведена на наборе данных из 194 реальных пожаров, подтвердившая корректность реализации алгоритмов.

5. Экспериментальные исследования выявили наибольшую эффективность у метода Актор-Критик.

6. Программный комплекс предоставляет исследователям и специалистам инструментарий для разработки интеллектуальных систем поддержки принятия решений.

Список источников

1. Sutton R.S., Barto A.G. Reinforcement Learning: An Introduction. 2nd ed. Cambridge: MIT Press, 2018. 526 p.
2. Wang, X., Li, Y., Lyu, Y. and Hu, H., Fire Truck Firefighting Path Planning Based on Prediction and Multi-Agent Reinforcement Learning, vol. 4, pp. 1313–1317.
3. Хабибулин, Р. Ш. Теоретико-множественное описание и информационная технология статистического цифрового двойника процессов реагирования пожарно-спасательных подразделений / Р. Ш. Хабибулин // Технологии техносферной безопасности. – 2025. – № 2(108). – С. 8–22.

**SOFTWARE PACKAGE FOR MODELING
REINFORCEMENT LEARNING IN MANAGEMENT TASKS
RESPONDING TO FIRES AT FUEL AND ENERGY
COMPLEX FACILITIES**

R.Sh. Khabibulin

State Fire Academy of EMERCOM of Russia, Moscow, Russia

e-mail: *kh-r@yandex.ru*

The article presents a specialized software package for modeling and comparative analysis of reinforcement learning methods, designed to solve problems of optimizing fire response management at facilities of the fuel and energy complex. The software product implements a modular architecture that includes components for downloading and preprocessing real-world fire data, a Markov decision-making simulation environment, a reinforcement learning engine with support for multiple algorithms, as well as a subsystem for generating analytical reports with visualization of results. The system provides automation of the full cycle of experimental research: from uploading initial data to generating a scientific report with the results of a comparative analysis of the effectiveness of various methods. The validation of the software package was carried out on a data set of 194 fires, which confirmed the correctness of the implementation of the algorithms and the adequacy of modeling.

Keywords: software package, reinforcement learning, fuel and energy complex, Markov models, fire response management.

УДК 303.732:004.942

СИСТЕМНОЕ ПОНИМАНИЕ НЕОПРЕДЕЛЁННОСТИ И РИСКА

Ф.И. Маврикиди

Институт проблем нефти и газа РАН, г. Москва, Россия

e-mail: *mavrikidi@mail.ru*

С.А. Хорьков

Удмуртский государственный университет, г. Ижевск, Россия

e-mail: *horkov_07@mail.ru*

Статья посвящена системному пониманию неопределённости и риска. Она имеет целью очертить картину системного характера рискологии, основываясь на достижениях естествознания и результатах авторов, полученных в последние годы. На основе сосуществования конвергентной и дивергентной логик очерчено пространство рискологии. Это сочетание логик воспроизводится фрактальной топологией и её математической основой – числовой асимметрией. Показано, что числовая асимметрия есть произведение вещественных и радикальных чисел – двуэлементковая числовая система. Представлен подход к формальному пониманию неопределённости в общей рискологии. Показано, что риск есть результат расчёта конфликта живого и косного. Анализ неопределённости и риска в терминах последовательной биотехнической теории систем показывает, что такое понимание рискологии отвечает её научной специфике и хорошо обеспечивается формальным математическим аппаратом. Теория матриц как физических движений, дополненная кронекеровскими (блочными) матрицами позволяет отобразить всё многообразие биотехнической реальности.

Ключевые слова: система, системный анализ, математическая модель, числовая асимметрия, риск, неопределённость

Введение

Наука о риске является одной из самых сложных для математического моделирования. Она включает в себя помимо естественнонаучного и общетехнического знания, круг биологических наук –

экологию, психофизиологию человека, социальную теорию. Особой темой рискологии является целеполагание, предвосхищение – утверждение о существовании несуществующего, т.е. её направленность в будущее [1]. Причем это будущее биологическое – как развитие, трансформация организма, а не физико-техническое по типу полета снаряда. Эти вопросы по большей части чужды стандартной математике, но органичны общей теорией систем с биологией в качестве её эталона. Техническая глава рискологии также математически нестандартна. Она включает в себя дискретно-непрерывные модели в виде деревьев и сетей [2].

Предлагаемая работа имеет целью очертить картину системного характера рискологии, основываясь на последних достижениях естествознания и результатах авторов, полученных ими в последние годы [3-5].

Проблематизация

Обзор литературы, посвященной моделированию, анализу и управлению рисками в самых разных областях человеческой практики, показывает, что общими темами для всех вариантов являются единство разнообразия и конфликт живого и косного, биологии и техники. Картина методов и техник представляет собой раздельно сосуществующие идеи – от строгих математических, до неформальных эвристических.

Она типична для работ по математическому моделированию в общей теории систем. Её содержание заключается в параллельном существовании многочисленных методов, каждый из которых является ограниченно адекватным, но, которые не сливаются в единую теорию.

Системы являются образами, т.е. синтетическими объектами. Они составлены из частей, распределённых в пространстве и времени. Физико-математические методы работают только для аналитических объектов, которые появляются как итог процессов сжимающих преобразований – выводов, расчетов, доказательств, т.е. процессов конвергентных (механических), составом которых можно пренебречь. Противоречия в конвергентной модели – это разрыв или блокировка механики. В сложных системах, же, напротив, противоречия являются образующим элементов целостности.

Материнским понятием математики является определимость – исчерпывающее описание всех возможных движений и состояний объекта. Оно лежит в основе тотального контроля и прогнозирования. Определимость для синтетических объектов/систем традиционными методами невозможна – системы формируются дивергентными, а не конвергентными формальными процессами. Дивергентные процессы – это «математическая кисточка», рисующая разнообразие истинности, дивергентный веер доказательств, каждое из которых, дополняя – отрицает остальные. Впервые они появились в теории фракталов под видом итеративной системы функций, которая определяет их все математические особенности.

Системное понимание риска основано не на конвергентной, а на дивергентной, множественной определимости факторов движения системы. Это понимание действий в условиях алгоритмической неопределимости служит отправной точкой разработки системной модели риска.

Пространство рискологии

В двойственности сосуществования конвергентной и дивергентной логик, заключена вообще основная проблема математического моделирования. Возможно самым известным объектом, порожденным этим сочетанием, является аттрактор Лоренца. Лоренц пытался смоделировать движение воздуха при нагревании, т.е. расширении, дивергенции, снизу и охлаждении, т.е. сжатии, конвергенции, сверху. Результат известен как хаотический аттрактор с фрактальной структурой, имеющий двухлепестковую форму бабочки.

Это сочетание логик воспроизводится фрактальной топологией и её математической основой – числовой асимметрией. Числовая асимметрия есть произведение вещественных R и p -адических чисел Z_p . Это двухлепестковая числовая система. Она формально отображает функциональную асимметрию природы – сосуществование пар конвергентных и дивергентных процессов. Эта пара обща всем наукам – материальным, биологическим, гуманитарным. Такая интерпретация дает возможность включить в теорию нефизические, т.е. нематериальные, невидимые, нульмерные, бескоординатные факторы, а, именно, – язык, сознание, биологию, экологию, политику. Эти системные, по сути, факторы являются главным компонентом, отличающим риско-

логию от математической физики. Их носителем является нульмерное, бескоординатное пространство 2 -адических чисел.

Математическое пространство системной теории риска есть пространство двойственности фракталов, которое формально воспроизводится включением в модель 2 -адических чисел Z_2 . Топология пространства образуется комбинацией универсальной пары процессов конвергенции \wedge и дивергенции \vee . Под разными названиями они известны во всех науках, в том числе и в биологии, и в психологии (психике) человека, чаще всего, как энергия, негэнтропия, определённая и энтропия, неопределённость, слово, и/ или как расчёт и образ, целостность.

Формальным выражением для универсума наблюдения U является декартово произведение вещественных R и 2 -адических чисел Z_2 :

$$U = R \times Z_2 \quad (1)$$

Такое представление универсума наблюдения (1) парой числовых символов, выражающих процессы конвергенции-дивергенции, дает возможность оцифровывать различные природные явления. В точных науках эти символы являются основой представления чисел в компьютере и образуют его пространство состояний. Число в пространстве числовой асимметрии имеет вид:

$$u = x \cdot \xi, x \in R, \xi \in Z_2. \quad (2)$$

Оно определяет две оси координат – аддитивную R^+ и мультипликативную R^x , которые метрически неразличимы. Так невозможно по данному отрезку сказать получен ли он сложением меньших частей или делением большего.

Можно показать, что числовая асимметрия в точности соответствует психофизиологии человека. За числовой моделью мира стоит действие первой (1cc) и второй (2cc) сигнальных систем психики – пространство физических импульсов/стимулов, и пространство слов/символов: $R \equiv 1cc$, $Z_2 \equiv 2cc$. Следовательно, универсум наблюдения представляет собой также результат взаимодействия физического Φ и психического Ψ .

Тем самым подобная модель включает субъекта вместе со способами его восприятия, которые отображаются на аддитивной R^+ и/или мультипликативной R^x шкале измерений.

Пространство систем является мультиматематическим, то есть оно связывает основные разделы математики, которые в нем присутствуют как образы в голограмме.

$$H \equiv \{Z_2 \cong AP \cong 2^C \cong [IFS \equiv \{0, 1\}^N] \cong [Z_2 \rightarrow Z_2] \equiv exp(Z_2)\} \quad (3)$$

$$U \cong (R \times Z_2) \times (R \times Z_2) \times \dots \times (R \times Z_2) = (R \times Z_2)^n$$

Эти свойства заключаются (слева направо в верхнем выражении (3)): в неотделимости пространства Z_2 от логики арифметики Пресбургера AP и множества её истинности 2^c , иерархической структуры формальных языков $IFS \equiv \{0, 1\}^N$, множества непрерывных функций $Z_2 \rightarrow Z_2$ и набора его подпространств $exp(Z_2)$. С точки зрения биологии и психики человека, как пространств качественного разнообразия – многомодальности, пространство представляет собой математический аналог мультифрактала, т.е. содержит в себе разнокачественные пространства – голограммы (нижнее выражение(3))

Асимметрия биологического и технического.

Спецификой науки о риске является опасность – конфликт живого и косным. Эта угроза заключается в ослаблении, частичном или даже полном разрыве его связей с внешней средой. Числовую характеристику степени этого ослабления следует называть риском.

В итоге приходим к выводу о числовой асимметрии живого и косного. Получает цепочку изоморфизмов, определяющих специфику рискологии:

$$U = R \times Z_2 = 1cc \times 2xx = \Phi \times \Psi = Tech \times Bio \quad (4)$$

Соответственно, два способа наблюдения – отражение и умозрение формально выглядят так, как это вербально показано в [6]:

$$(R^+, |x|_\infty) \xleftarrow{\wedge} Tech \times Bio \xrightarrow{\vee} (R^x, |\xi|_2) \quad (5)$$

Иными словами, конфликт живого и косного, биологии и техники, либидо и мортидо есть конфликт процессов дивергенции и конвергенции. Поэтому пространство рискологии метафорически есть странный аттрактор Лоренца, два лепестка которого соответствуют вещественным R и 2 -адическим числам Z_2 .

Неопределённость. Опишем в общей рискологии, близко к формальному, системное понимание неопределённости.

Истоком неопределённости являются дивергентные процессы. Они совмещают противоположные пары значений. Являются генераторами и носителями логических оппозиций. Их формальные эквиваленты – окто- и квадродеревья. Техника их построения разработана в теории фракталов

Логические значения связаны отрицанием. Объединение отрицаний есть Образы, они суть синтетические, а не аналитические объекты. Логикой образов является арифметика Пресбургера – полная и непротиворечивая формальная система (по теореме Дж. Майхилла). Арифметика Пресбургера – антипод теоремы Гёделя о неполноте [4].

Пространство образов есть графы и сети – множество разделённо-связанных объектов. Вершины сетей отражают наличие событий, факторов, объектов. Ребра связи – влияния как физические, так и информационные. Последние – играют решающую роль в управлении, политике.

Числовой аналог образов – 2 -адические числа Z_2 . Они имеют множественную интерпретацию – как делимость материальных, так и пространство символических объектов – языка, теорий. Важным является их интерпретация как пространства психики человека, что позволяет семантически замкнуть пространство рискологии. В этом символическом пространстве находится способность системы реагировать на неизвестное изменением своей символической динамики, т.е. обеспечивать управление модификацией структуры и переменой поведения.

Биотехническую природу рискологии представляют асимметрии биологического и технического. Она является математическим содержанием техногенных систем и истоком опасности существования биологии и человека.

Моделью будущего является временной фрактал – дивергентное дерево Z_2 , т.е. числовая система, построенная на отношении событий

раньше-позже. В силу (4) в будущее включается психика человека и биологии. Числовые характеристики событий будущего задаются мерами возможности (5).

Мера возможности. Теория возможности (*possibility theory* – *англ.*) дополнительна к теории вероятности. Её мера известная как мера Хаара на 2-адических числах в объединении с биологией и психикой субъекта, посредством обобщенных линейных моделей (*generalized linear models, GLM* – *англ.*) [7] имеет потенциал преобразования в объективные и субъективные меры неопределённости [8]. В этом смысле мера возможности семантически первична. Прежде чем иметь вероятность, событие должно быть возможным. В отличие от мер вероятности меры возможности имеют самые разнообразные источники.

Риск. Риск есть результат расчёта конфликта живого и косного. Его вычислительные методы следует строить на матричном исчислении. Известно, что все вычислительные методы математики сводятся к проблемам решения систем линейных алгебраических уравнений. Других способов получения численных результатов просто нет. Это следствие из теоремы Гёделя о неполноте – все, что делается с помощью функций можно сделать про помощи арифметики.

Основное отличие матричного исчисления, в нашей модели, от традиционного – заключается в совместном использовании техник линейной алгебры и кронекеровских (блочных) матриц [9]. Линейная алгебра отображает физику явления, кронекеровские (блочные) матрицы – графы и сети, т.е. структуры и сценарии. Таким образом, числовой асимметрии соответствует вычислительная – аналог (2).

Числовые параметры и характеристики элементов матриц получаются двумя проекциями из $R \times Z_2$:

$$m_{i,j} \leftarrow |x|_\infty \leftarrow R \times Z_2 \rightarrow |\xi|_2 \rightarrow \mu_{i,j}, \quad (6)$$

где $m_{i,j} \in M_\infty$ и $\mu_{i,j} \in M_2$.

Выражение (6) может быть преобразовано:

$$\begin{aligned} M_U &= |M_\infty| \times |M_2| \\ M_\infty \in R^+ &\leftarrow M_\infty \times M_2 \rightarrow M_2 \in R^\times \end{aligned} \quad (7)$$

Нормы матриц $|M_\infty|$ и $|M_2|$ выбирают из условий задачи, которая является уникальной. Она требует согласования практики измерений данной области исследования с математическими функциями, которые определяют расчётные методы.

Голограмма (3) содержит все математические пространства, вместе с их взаимными отображениями, и схема укладывается в метрическую модель тензоров [10].

Матричная динамика (7) дает образ распределения числовых характеристик в пространстве-времени будущего. Тогда понятие риска возникает из сопоставления тензорного произведения, моделирующего целостность биологической системы с критериями допустимости отклонений.

Двойственность в структуре модели представляет собой связь внешней среды и внутреннего состояния в динамике. Она обнаруживает себя причинно-рефлексивным кругом, который является замкнутым циклом причин, отражающих взаимодействия системы с внешней средой [11].

Заключение

Проведенный анализ неопределённости и риска в терминах последовательной биотехнической теории систем показывает, что такое понимание рискологии отвечает её научной специфике и хорошо обеспечивается формальным математическим аппаратом. Теория матриц как физических движений, дополненная кронекеровскими (блочными) матрицами позволяет отобразить всё многообразие биотехнической реальности. Полезным приобретением теории оказывается возможность включения в неё субъекта, что ведет к привлечению в профессиональную сферу техногенных систем методов психологии личности. Перспективным представляется естественное сопряжение модели рискологии с моделью теоретической экологии, что позволяет ставить задачи вычисления скорости и интенсивности технического прогресса в зависимости от природной среды.

Список источников

1. Буянов В.П., Кирсанов К.Л., Михайлов Л.М. Рискология. – Москва: Экзамен, 2003. – 384 с.
2. Белов П.Г. Управление рисками, системный анализ и моделирование: учебник и практикум для вузов. – Москва: Юрайт, 2025. – 721 с.
3. Хорьков С.А. Проблема расчёта электропотребления многономенклатурного цеха промышленного предприятия, модели и методики её решения. – Ижевск: Изд-во ИжГТУ им. М.Т. Калашникова, 2019. – 124 с.
4. Маврикиди Ф.И. Числовая асимметрия в прикладной математике. Фракталы, p -адические числа, апории Зенона, сложные системы. – Москва: Дельфис, 2015. – 416 с.
5. Хорьков С.А., Маврикиди Ф.И. Техноценозы, системы и их модели: монография. 2-е изд., испр. и доп. – Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2025. – 309 с.
6. Герасимова И.А. Природа живого и чувственный опыт // Вопросы философии. – 1997. – № 8. – С. 123–134.
7. McCullagh P., Nelder J.A. Generalized Linear Models. – Chapman and Hall, 1989. – P. 479–499.
8. Halpern J. Reasoning About Uncertainty. – MIT Press, 2017. – 473 p.
9. Van Loan C. The ubiquitous Kronecker Product // J. Comput. Appl. Math. – 2000. – 123 (1–2). – P. 85–100.
10. Ryan R. Introduction to Tensor Product of Banach Spaces. – Springer, 2002. – 225 p.
11. Хорьков С.А., Маврикиди Ф.И. Целостность техноценозов // Фёдоровские чтения–2024: LIV Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием (Москва, 12–15 нояб. 2024 г.). – Москва: НИУ «МЭИ», 2024. – С. 375–389.

SYSTEMIC UNDERSTANDING OF UNCERTAINTY AND RISK

F.I. Mavrikidi, S.A. Khorkov

Institute of Oil and Gas Problems, Russian Academy of Sciences,
Moscow, Russia

Udmurt State University, Izhevsk, Russia

e-mail: *mavrikidi@mail.ru, horkov_07@mail.ru*

The article is devoted to a systemic understanding of uncertainty and risk. Based on the coexistence of convergent and divergent logic, the space of riskology is outlined. This combination of logics is reproduced by fractal topology and its mathematical basis — numerical asymmetry (product of real and p -adic numbers). An approach to the formal understanding of uncertainty in general riskology is presented. It is shown that risk is the result of calculating the conflict between the living and the inanimate. Analysis of uncertainty and risk in terms of a consistent biotechnical theory of systems shows that such an understanding of riskology meets its scientific specifics and is well supported by a formal mathematical apparatus. The theory of matrices as physical movements, supplemented by Kronecker (block) matrices, makes it possible to display the entire diversity of biotechnical reality.

Keywords: system, system analysis, mathematical model, numerical asymmetry, risk, uncertainty, fractals, p -adic numbers, biotechnical systems

УДК 681.51:004.9

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА ДЛЯ МОНИТОРИНГА И УПРАВЛЕНИЯ НА БАЗЕ САМОДВИЖУЩЕЙСЯ ПЛАТФОРМЫ

С.А. Хорьков, И.Н. Серезжечкин, А.В. Рассаматин

Удмуртский государственный университет, г. Ижевск, Россия

e-mail: horkov_07@mail.ru, resurs18@ya.ru, Rassamaha47@gmail.com

Статья посвящена поиску вариантов интеллектуальных самодвижущихся платформ для создания опытных образцов. Приведены краткие сведения о шасси, электродвигателях, аккумуляторах микроконтроллерах, программном обеспечении, дополнительных аксессуарах необходимых для создания самодвижущейся платформы. Сделан вывод о том, что для выполнения различных задач одного типа может быть использована некая единая универсальная самодвижущаяся платформа, в тоже время различные типы задач могут потребовать построения целого ряда таких платформ. Рассматриваются перспективы развития и предлагаются направления дальнейших исследований для внедрения подобных интеллектуальных платформ в практику и повышения их эффективности.

Ключевые слова: интеллектуальные системы, самодвижущиеся платформы, управление и мониторинг.

В современном мире высоких технологий и стремительного развития науки и техники все чаще используют машины и механизмы с искусственным интеллектом. Такие устройства могут работать при тесном взаимодействии с человеком или без него. Задачи, решаемые с помощью таких машин, могут быть направлены на повышение безопасности, устранения различных вида аварий и профилактику подобных ситуаций. Такие решения должны иметь комплексный системный характер и отвечать требованиям подстройки под ситуации в зависимости от их развития.

Одним из таких устройств могут являться интеллектуальные системы мониторинга и управления на базе самодвижущихся платформ [1,2]. Эти конструкции могут быть оснащены различными конфигурационными модулями для одиночной или групповой работы. Они могут быть применены в системах противопожарной защиты (обнаружение, оповещение, тушение), в системах гражданской обороны и

ликвидации чрезвычайных ситуаций, в системах охраны, в системах мониторинга зданий и сооружений, в системах энергетики, в жилищно-коммунальном хозяйстве и других сферах, связанных с безопасностью жизнеобеспечения и жизнедеятельности.

Целью статьи является отражение результатов по поиску вариантов интеллектуальных самодвижущихся платформ для создания опытных образцов.

Начальным этапом для разработки таких образцов является поиск подходящих аналогов [3] и выбор программной среды для 3D проектирования (Компас 3D, NanoCad и т.п.).

Существует несколько типов шасси, на которых возможно построение платформы, а именно трехколесные, четырехколесные и гусеничные.

Рассмотрим их последовательно.

Платформы на трёх колесах часто используют для создания мобильных роботов благодаря простоте конструкции, устойчивости и манёвренности.

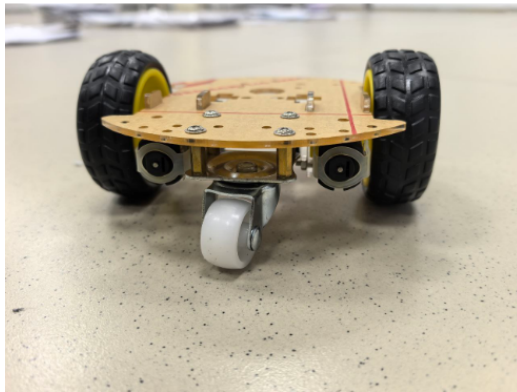


Рисунок 1 — Трехколесное шасси
(фотография выполнена 14.11.2025года И.Н.Сережечкиным)

Двухмоторная дифференциальная платформа включает два мотора, управляющих двумя ведущими колёсами, расположенными спереди или сзади, и одно направляющее колесо посередине. Управляется такая

платформа изменением скорости вращения моторов. Её преимущества заключаются в простоте управления движением вперёд-назад и поворотом вокруг собственной оси; возможностью легко реализовать обратную связь по положению и скорости движения. Недостатками такой платформы являются: невысокая проходимость по неровностям; дополнительное колесо для поддержки равновесия.

Платформа с ведущим центральным колесом управляется одним двигателем, а переднее и заднее колеса свободно вращаются либо являются пассивными опорами. Преимуществами такой платформы будут: минимальное количество компонентов (один мотор); компактность и простота сборки. Недостатки проявляются в ограниченной точности позиционирования и маневренности; в необходимости балансировки нагрузки для предотвращения переворачивания.

Платформы с омниколесами (omni-wheel) оснащены специальными роликами-колёсами («омни») [4]. Они позволяют двигаться в любом направлении независимо от ориентации самого устройства. Такая конструкция популярна среди автономных робототехнических решений.



Рисунок 2 — Омниколеса)

Её преимущества: полностью свободное перемещение во всех направлениях; высокая стабильность и надёжность при работе на ровных поверхностях.

Недостатки проявляются в сложности программирования алгоритмов передвижения; и высоких требованиях к точности установки элементов.

Четырёхколесных шасси с дифференциальным управлением оснащено двумя ведущими колесами, расположенными на одной оси, и

одним или несколькими направляющими колесами. Дифференциальное управление позволяет управлять направлением движения путем изменения скорости вращения каждого колеса отдельно.

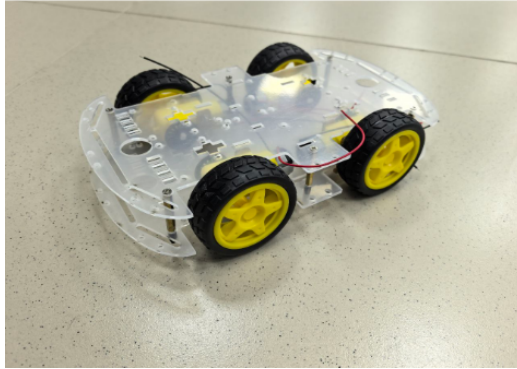


Рисунок 3 — Четырёхколёсное шасси
(фотография выполнена 14.11.2025года И.Н.Сережечкиным)

Преимущества такой платформы заключены в простоте реализации и хорошем маневрировании, а недостатки – в ограниченной проходимости по неровностям местности.

Платформа с двухосным дифференциальным управлением оснащена двумя осями, каждая из которых оснащена двумя ведущими колесами. Такая конструкция обеспечивает лучшее распределение нагрузки и улучшает устойчивость.

Её преимуществами являются повышенная стабильность и управляемость, а также улучшенная проходимость. Недостатком будет увеличение массы и габаритов.

У платформы с четырёхколёсным независимым рулевым управлением каждое колесо имеет собственный привод и механизм поворота. Эта конфигурация позволяет реализовать движение практически в любом направлении (omni-directional). Её достоинствами являются: возможность двигаться боком, вращаться вокруг собственной оси; высокая точность позиционирования. Недостатки заключены в сложности конструкции и управления; в высоких требованиях к электронике и программному обеспечению.

Классическое гусеничное шасси имеет традиционную конструкцию, состоящую из двух гусениц, каждая из которых приводится отдельным двигателем. Такая схема обеспечивает высокую маневренность и способность преодолевать препятствия.

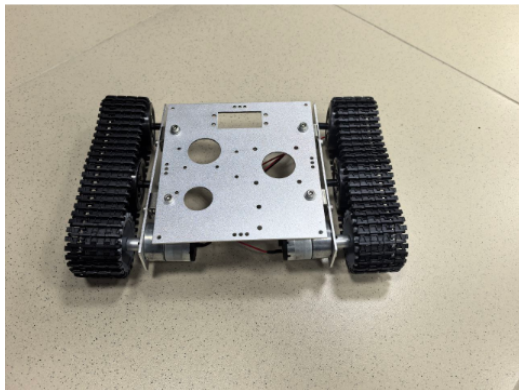


Рисунок 4 — Гусеничное шасси
(фотография выполнена 14.11.2025года И.Н.Сережечкиным)

Преимуществами этой конструкции являются: высокая проходимость на неровных поверхностях; возможность поворота на месте путем вращения гусениц в противоположных направлениях.

Недостатки выражаются: в сложности конструкции и обслуживания; в большем весе и энергопотреблении по сравнению с колесными шасси.

Гибридное гусенично-колесное шасси сочетает элементы классического гусеничного и колесного шасси. Например, платформа может иметь колеса для движения по ровным поверхностям и разворачиваемые гусеницы для преодоления препятствий. Её преимущества заключаются в адаптивности к различным условиям местности: в повышенной энергоэффективности на ровных участках и улучшенной проходимости на труднопроходимых участках. Недостатки заключаются в увеличенной сложности и стоимости конструкции, а также в необходимости иметь дополнительный механизм переключения между режимами.

Конструкция модульного гусеничного шасси состоит из отдельных модулей, каждый из которых включает двигатель, трансмиссию и сегмент гусеничной ленты. Модули могут соединяться друг с другом различными способами, позволяя создавать разнообразные конфигурации. Достоинства такой конструкции заключаются в гибкости и масштабируемости конструкции и простоте замены поврежденных сегментов. Недостатки связаны с потенциальными проблемами синхронизации между модулями и ограниченными возможностями управления движением при большом количестве модулей.

В схеме с шасси с регулируемым натяжением гусениц используется механизм регулировки натяжения гусениц, позволяющий изменять профиль ходовой части в зависимости от условий эксплуатации. Например, уменьшение натяжения улучшает плавность хода на мягких грунтах, тогда как увеличение натяжения повышает устойчивость на твердых покрытиях. Преимущества такой платформы связаны с возможностью адаптации к разным типам поверхностей и оптимизацией производительности и эффективности передвижения. Недостатки связаны с дополнительной механической сложностью и возможными трудностями настройки оптимального режима натяжения.

Выбор того или иного типа шасси самодвижущейся платформы определен задачами, решаемыми с её помощью, условиями предполагаемой работы и технико-экономическими показателями конструкции. Может также отметить, что для решения однотипных задач может быть предложен ряд платформ, отличающихся разной мощностью привода. Решение одной задачи группой самодвижущихся платформ позволит увеличить многофункциональность и эффективность всего агрегата.

Рассмотрим материалы и компоненты для создания платформы:

- Корпус/рама: лёгкий материал типа алюминия или пластика обеспечивает достаточную прочность и малый вес.
- Колёса/гусеницы: пластиковые колёса среднего диаметра обеспечивают хорошую сцепляемость и износостойкость, гусеничные ленты высокую проходимость и транспортируемую массу полезной нагрузки, бывают резиновыми, пластиковыми или металлическими.

- Электродвигатели: стандартные двигатели постоянного тока с редуктором или сервоприводы с возможностью контроля скорости вращения. Мощность двигателей должна соответствовать массе конструкции и требуемым характеристикам движения.
- Контроллеры двигателя: модули H-мостового драйвера помогают регулировать скорость вращения двигателей.
- Аккумуляторы: литий-полимерные (LiPo) аккумуляторы обеспечивают хорошее соотношение мощности и массы.
- Микроконтроллер управляет всей системой, обрабатывает команды и передаёт сигналы на двигатели. Популярные микроконтроллеры включают ArduinoUno, ESP32 и RaspberryPi.
- Программное обеспечение: поведение платформы с использованием языков программирования, таких как C++, Python или JavaScript.

Этапами создания опытного образца являются: сборка платформы; сборка ходовой части; установка двигателей и редуктора; подключение электроники; программирование контроллера: опробывание образца.

Пример программы для Arduino:

```
#include<AFMotor.h>
// Настройка двигателей
AF_DCMotormotorLeft(1); // Левый мотор подключён к выходу M1
AF_DCMotormotorRight(2); // Правый мотор подключён к выходу M2
void setup()
Serial.begin(9600);
void loop()
//Едем в перёд
motorLeft.run(FORWARD);
motorRight.run(FORWARD);
motorLeft.setSpeed(200);
motorRight.setSpeed(200);
delay(2000);
//Остановка
motorLeft.run(RELEASE);
```

```
motorRight.run(RELEASE);  
delay(1000);  
//Поворот вправо  
motorLeft.run(BACKWARD);  
motorRight.run(FORWARD);  
motorLeft.setSpeed(200);  
motorRight.setSpeed(200);  
delay(1000);  
//Повтор цикла
```

Дополнительные аксессуары самодвижущейся платформы: камеры наблюдения (Wi-Fi камеры или IP-камеры); ультразвуковые датчики расстояния; датчики освещения и температуры; модули связи Wi-Fi или Bluetooth для удалённого управления.

Канал управления платформы может быть проводным (оптический или медный кабель) или беспроводным (блютуз, WiFi, радиоканал, ИИ (нейросеть) [5].

Возможные варианты применения самодвижущейся платформы:

- платформа-эвакуатор для обеспечения подъезда спецтехники к месту пожара;
- платформа-домкрат/лебедка для разбора строительных конструкций;
- платформа систем оповещения ГО и ЧС;
- платформа мониторинга открытых площадок хранения с тепловизионной камерой;
- платформа мониторинга общественных зданий – охрана;
- платформа с модулями пожаротушения;
- грузовые платформы с системой «Следуй за мной»;
- платформа обследователи скрытых коммуникаций;

Таким образом, интеллектуальные системы управления и мониторинга на базе самодвижущейся платформы могут быть востребованы

в различных сферах и областях промышленности. Многофункциональность, мобильность и компактность данных устройств позволяет эффективно выполнять специализированные задачи по обеспечению безопасности людей на промышленных объектах, а значительное разнообразие типов конструкций помогает оптимизировать процесс их работы.

Представленный обзор позволяет сделать вывод о том, что для выполнения различных задач одного типа может быть использована некая единая универсальная самодвижущаяся платформа, в тоже время, различные типы задач могут потребовать построения целого ряда таких платформ, отличающихся габаритами и мощностью.

Перспективным направлением исследований является рассмотрение возможности решения одной задачи группой самодвижущихся платформ.

Список источников

1. Филатов, В.И. Разработка наземного мобильного робота, оснащенного системами адаптивной подвижности/ В.И.Филатов, Д.В.Зезюлин, Д.Ю.Тюгин, П.И.Пронин, Д.Н.Зарубин, А.А.Еремин, В.В.Беляков, А.А.Куркин // Вестник Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева. – 2018. – №2(8). – С. 30–40.
2. Суворова, К.В. Разработка интеллектуальных систем мониторинга для умных городов // Информационные технологии и безопасность. – 2024. – №2. – С. 34–38
3. Модели и алгоритмы для интеллектуальных систем управления: монография/ А.А.Богуславский, Г.К.Боровин, В.А.Карташев, В.Е.Павловский, С.М.Соколов.– Москва: ИПМ им. М.В. Келдыша, 2019. – 228 с.
4. Килин, А.А. Управление тележкой с омниколесами на плоскости// А.А.Килин, А.Д.Бобыкин// Нелинейная динамика. 2014. Т. 10. № 4. С. 473–481.
5. Горюнов, А.Г. Телеконтроль и телеуправление : учебное пособие / А.Г. Горюнов, С.Н. Ливенцов, А.А. Лысенок. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2008. – 130 с.

INTELLIGENT MONITORING AND CONTROL SYSTEM BASED ON A SELF-PROPELLED PLATFORM

S.A. Khorkov, I.N. Serezhechkin, A.V. Rassamaha

Udmurt State University, Izhevsk, Russia

e-mail: *horkov_07@mail.ru, resurs18@ya.ru, Rassamaha47@gmail.com*

This article is devoted to the search for intelligent self-propelled platforms for the development of prototypes. It provides brief information on the chassis, electric motors, batteries, microcontrollers, software, and additional accessories required to create a self-propelled platform. It is concluded that a single universal self-propelled platform can be used to perform various tasks of the same type, while different types of tasks may require the construction of a variety of such platforms. Development prospects are discussed and areas for further research are proposed for the practical implementation of such intelligent platforms and their increased effectiveness.

Keywords: intelligent systems, self-propelled platforms, control and monitoring.

УДК 004.932.1

Использование сверточной нейронной сети для локализации трещин на бетонных поверхностях

А.А.Ажеев

Удмуртский Государственный Университет, г. Ижевск, Россия

e-mail: andreyakeew@xmail.ru

В статье представлен комплексный подход к автоматизированной диагностике бетонных конструкций, включающий разработку сверточной нейронной сети для локализации трещин и создание веб-интерфейса на основе Flask. Предложенное решение позволяет проводить неразрушающий контроль с помощью фотосъемки, что обеспечивает своевременное выявление дефектов в труднодоступных или опасных для человека зонах.

Ключевые слова: Ключевые слова: распознавание образов, компьютерное зрение; сверточные нейронные сети; трещины; дефекты и повреждения в строительных конструкциях; визуальная диагностика

Введение

В настоящее время обследование бетонных конструкций производственных предприятий в целях определения их технического состояния, получения коррозионных характеристик, а также других конструктивных элементов представляет собой достаточно трудоемкий процесс. В следствие отсутствия возможности полноценно обследовать некоторые бетонные конструкции не всегда получается объективно оценить надежность сооружений на предмет дефектов и повреждений, а также выработать правильные рекомендации, направленные на обеспечение безотказной эксплуатации. Как итог, увеличение времени обследования ведет к простоям работы и убыткам компании.

Актуальность

Современные промышленные объекты характеризуются высокой насыщенностью инженерных конструкций, многие из которых эксплу-

атируются в условиях повышенных нагрузок и агрессивных сред. Бетонные конструкции подвергаются постепенной деградации вследствие коррозии арматуры, воздействия вибраций, температурных перепадов и механических повреждений [1-2]. Своевременное выявление трещин и дефектов является критически важным фактором обеспечения эксплуатационной надежности сооружений и предотвращения аварийных ситуаций, однако традиционные методы контроля зачастую не позволяют оперативно фиксировать ранние стадии разрушения.

Проблема усугубляется тем, что значительная часть конструктивных элементов расположена в труднодоступных или опасных для обследования зонах. Визуальный осмотр без дополнительного оборудования требует привлечения специализированного персонала, использования подъемного оборудования и обеспечения мер безопасности, что ведет к увеличению финансовых и временных затрат. Более того, субъективность оценки специалиста может вызывать расхождения в результатах диагностики, особенно при анализе мелких или скрытых трещин.

В условиях цифровизации строительной отрасли возрастает потребность в автоматизированных системах, способных обеспечить объективный, быстрый и воспроизводимый контроль состояния бетонных конструкций. Использование методов компьютерного зрения и глубокого обучения открывает возможность точной идентификации дефектов даже при сложных условиях освещения, наличии шумов или неоднородной фактуры поверхности. Разработка подобных инструментов позволяет существенно сократить время обследования и повысить качество технического мониторинга.

Создание интеллектуальной системы диагностики, включающей сверточную нейронную сеть для локализации трещин и удобный веб-интерфейс для взаимодействия с пользователем, обеспечивает практическую значимость исследования. Такой подход позволяет реализовать принцип неразрушающего контроля на основе фотосъёмки, снижая зависимость от человеческого фактора и повышая точность выявления дефектов. В результате предприятия получают инструмент для оперативной оценки состояния конструкций, минимизации простоев и повышения безопасности эксплуатации.

Результаты

Для создания сверточной нейронной сети было принято решение использовать язык программирования Python с использованием библиотеки TensorFlow и её надстройки keras[3].

При обучении модели был использован датасет из 40 000 изображений, содержащих фрагменты бетона. На половине изображений бетон содержит трещины, 20 000 фотографий бетона без трещин нужны для успешного обучения нейронной модели. В процессе тренировки модели было проведено 40 эпох обучения. Каждая эпоха представляет собой настройку весов сети таким образом, чтобы ошибка на выходе была минимальна.

На рисунке 1 отображена динамика функций потерь для обучающих данных (Training Loss, обозначена синим цветом) и проверочных данных (Validation Loss, обозначена красным цветом). Как видно по графикам функций, в первые 20 эпох происходит наиболее продуктивное обучение модели, в котором значения функций потери стремительно уменьшаются, что указывает на эффективное формирование признаковых зависимостей. На последующих эпохах темп снижения функции потерь заметно замедляется, что свидетельствует о постепенном насыщении модели и достижении ею более высоких уровней точности при меньших изменениях параметров.

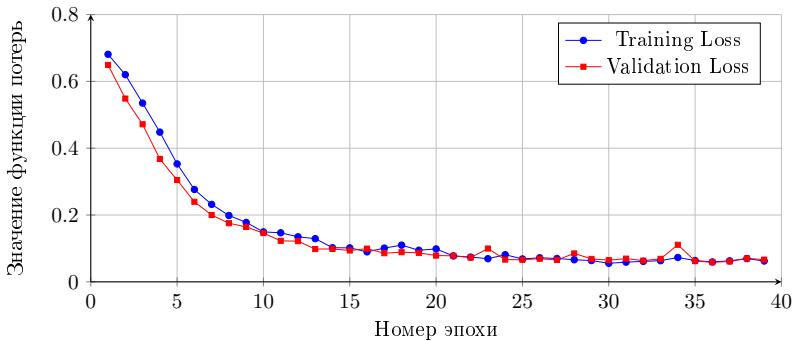


Рисунок 1 — Динамика функции потерь в процессе обучения модели

После обучения модели было проведено её тестирование. Результаты представлены в виде матрицы ошибок в Таблице 1. Синим цветом

выделены корректные предсказания, серым - ложные предсказания модели. Общее число обработанных в ходе тестирования фотографий - 1800, из которых 917 случаев приходится на изображения без трещин и 883 случая с наличием трещин на изображениях.

Таблица 1 — Матрица ошибок (Confusion Matrix)

		Предсказанный класс		Всего
		Трещины нет	Трещина есть	
Фактический класс	Трещины нет	884	33	917
	Трещина есть	4	879	883
Всего		888	912	1800

Анализ итоговых метрик показывает, что разработанная модель демонстрирует высокую точность распознавания исследуемых классов. Общая точность (Accuracy) составила 97.94 %, что означает: из ста фотографий бетона модель допускает ошибку примерно в двух случаях. Поскольку классы распределены достаточно равномерно (917 изображений без трещин и 883 с трещинами), различия между маско- и weighted-усреднениями незначительны, что подтверждает устойчивость модели к дисбалансу данных. Следует отметить, что для класса «трещин нет» показатель полноты (Recall) равен 0.96 — модель пропустила только 33 случая, ошибочно определив отсутствие трещины как её наличие. При этом точность (Precision) для данного класса достигает 1.00, что говорит о полной уверенности модели в корректности предсказаний при классификации изображений как «без дефектов».

Не менее значимыми являются результаты для класса «трещина есть». Показатель полноты для данного класса достигает значения 1.00, что свидетельствует о способности модели корректно обнаруживать все реальные трещины на изображениях. Значение точности 0.96 означает, что лишь в 4 % случаев модель определяет наличие трещины там, где её на самом деле нет, что соответствует 33 ложным срабатываниям. Для задач технической диагностики подобное поведение является предпочтительным: в области промышленной безопасности критически важно не пропустить реальное повреждение, тогда как дополнительные проверки в случаях ложных тревог не приводят к существенным рискам или затратам. В совокупности полученные результаты подтверждают высокую практическую применимость разработанной сверточной нейронной сети для автоматизированного выявления дефектов бетонных конструкций.

Веб-интерфейс для данной модели был создан с применением фреймворка Flask для Python. Пользователю предлагается выбрать файл, содержащий фото фрагмента бетона и при нажатии на кнопку "Upload and Predict" (Загрузить и получить предсказание) - будет выведено обработанное моделью изображение, содержащее подсветку трещины. Также на экран выводится сообщение с предсказанием модели о наличии трещины на снимке и показатель уверенности (confidence). Пример работы с веб-приложением показан на Рисунке 2.

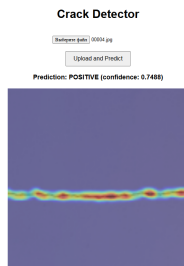


Рисунок 2 — Веб-интерфейс

В дальнейшем в веб-интерфейс будут добавлены возможности загрузки групп изображений, сжатых в архив, и функционал для обработки видео, что позволит данному программному решению предоставлять полноценные отчеты по осматриваемым пользователями объектам.

Заключение

Полученные результаты демонстрируют, что предложенная система может успешно применяться для первичного анализа состояния бетонных конструкций, сокращая временные затраты на обследование и снижая влияние человеческого фактора. Высокая точность и устойчивость модели позволяют рекомендовать разработанный метод как перспективное направление для внедрения в практику промышленных и строительных предприятий.

Разработанный веб-интерфейс на основе фреймворка Flask обеспечивает удобный и интуитивно понятный доступ к функционалу системы. Возможность оперативной загрузки изображений и получения визуализированных результатов классификации делает инструмент применимым в реальных условиях эксплуатации, включая труднодоступные или потенциально опасные зоны обследования. Интеграция нейросетевой модели в веб-сервис повышает практическую ценность решения и позволяет использовать его как вспомогательный инструмент при техническом мониторинге.

В дальнейшем планируется расширить функциональные возможности веб-интерфейса за счет обработки пакетных данных, поддержки архивов изображений и анализа видеопотока. Это позволит использовать систему для более комплексной диагностики и формирования автоматизированных отчетов, что еще больше повысит её применимость в сфере неразрушающего контроля и технического мониторинга инженерных сооружений.

Список источников

1. ГОСТ 31937–2024. Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния : [с Поправкой] / Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации. — Введ. 2024-07-01. — М. : Стандартиформ, 2024. — 42 с.
2. Касимов, Р. Г. Дефекты и повреждения строительных конструкций, методы и приборы для их количественной и качественной оценки : учебное пособие / Р. Г. Касимов ; Оренбургский гос. ун-т. — Оренбург : ОГУ, 2016. — 109 с.
3. Keras: Deep Learning API in Python : официальный сайт. — URL: <https://keras.io/> (дата обращения: 18.11.2025).

USING A CONVOLUTIONAL NEURAL NETWORK TO DETECT CRACKS IN CONCRETE SURFACES

A.A. Akeew

Udmurt State University, Izhevsk, Russia

e-mail: *andreyakeew@mail.ru*

The article presents a comprehensive approach to the automated diagnostics of concrete structures, which includes the development of a convolutional neural network for crack localization and the creation of a Flask-based web interface. The proposed solution enables non-destructive inspection using photographic imaging, ensuring timely detection of defects in hard-to-reach or hazardous areas.

Keywords: pattern recognition; computer vision; convolutional neural networks; cracks; defects and damage in concrete structures; visual inspection

УДК 004.89

ЛОГИКО-ЛИНГВИСТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ОЦЕНКИ УРОВНЯ ТЕХНОСФЕРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ЗНАНИЙ

М.А. Сенилов

Удмуртский Государственный Университет, г. Ижевск, Россия

e-mail: *senilov@bk.ru*

М.О. Попов

Ижевский государственный технический университет имени М.Т.

Калашникова, г. Ижевск, Россия

e-mail: *porovto999@gmail.com*

В статье рассматривается постановка задачи интегральной оценки уровня техносферной безопасности с помощью логико-лингвистического моделирования, в основе которого лежит разработка схемы индуктивного нечеткого вывода и формализация знаний эксперта в области техносферной безопасности. В разработанной модели учитывается взаимозависимость факторов техносферной безопасности и предлагается методика анкетного опроса экспертов для ее оценки. Вывод интегральной оценки осуществляется на основе частных оценок, соответствующих тривиальным ситуациям в области техносферной безопасности.

Ключевые слова: оценка уровня техносферной безопасности, логико-лингвистическая модель, схема индуктивного нечеткого вывода, нечеткие множества, лингвистическая переменная, шкалирование квантификаторов, модель представления знаний, анкетный опрос экспертов.

Введение

Оценка уровня техносферной безопасности – комплексная задача, которая включает в себя выявление факторов техносферной безопасности, оценку степени их влияния на техносферную безопасность, интегральную оценку влияния всех факторов с учетом их взаимозависимости.

Для оценки уровня техносферной безопасности могут использоваться различные методы, например, методы экспертных оценок, моделирование последствий аварий, статистический анализ данных о частоте и последствиях нарушений безопасности и др. Задача усложняется тем, что факторы, определяющие техносферную безопасность очень разнообразны и неоднородны [1]: это, например, факторы, связанные с загрязнением окружающей среды (химическое, физическое, биологическое загрязнение), негативные социальные и психологические факторы, производственно-технологические факторы (уровень техники безопасности на производстве, транспорте, в энергетике, промышленности) и т.д. В силу большого разнообразия факторов и невозможности дать четкую оценку их влияния в различных ситуациях задача оценки уровня техносферной безопасности относится к плохо формализуемым, решаемым в условиях неопределенности. Для решения этой задачи предлагается использовать методы искусственного интеллекта, основанные на построении нечетких логико-лингвистических моделей, включающих модели представления знаний эксперта, и применении теории принятия решений при нечетких основаниях [2].

Математическая постановка задачи

Пусть задано множество техносферных ситуаций, каждая из которых адекватна определенному уровню техносферной безопасности. Ситуация описывается некоторым набором параметров – факторов техносферной безопасности $1, 2, \dots, n$. Параметры $i (i = 1, \dots, n)$ могут быть разнородными и зависимыми между собой.

Задача состоит в нахождении интегральной оценки уровня техносферной безопасности заданной или сложившейся ситуации (как в качественной, так и в количественной форме).

Оценка в количественной форме выражается числом $\alpha, \alpha \in [0; 1]$.

Например, если $\alpha = 0.7$, то это означает, что уровень безопасности (степень предпочтительности) ситуации равен 0.7; если $\alpha = 1$, то это означает, что уровень безопасности (степень предпочтительности) ситуации наивысший, т.е. техносферная ситуация самая комфортная (самая предпочтительная). Таким образом, чем ближе значение α к единице, тем уровень безопасности (степень предпочтительности) ситуации выше.

Оценка в качественной форме определяется значениями лингвистической переменной ОЦЕНКА, которыми являются нечеткие понятия (множества), выбор которых определяется существом рассматриваемого класса ситуаций.

В дальнейшем значения лингвистической переменной ОЦЕНКА будем обозначать через GN . Здесь N – высказывание, определяющее наивысшую степень предпочтительности ситуации, например, «ситуация – самая предпочтительная» или «ситуация – в норме» (или просто «норма»), т.е. ситуация, для которой $\alpha = 1$;

G – квантификатор, представляющий собой нечеткое понятие, определяющее меру для высказывания N , т.е. в какой мере (степени) выполняется высказывание N . G принадлежит некоторому множеству квантификаторов $\{G\}$:

$G \in \{G\} = \{\text{«приблизительно равно...», «немного меньше, чем...», «выражено меньше, чем...», «значительно меньше, чем...»}\}.$

Таким образом, GN представляет собой нечеткое множество, являющееся элементом терм-множества $T(\text{ОЦЕНКА})$ лингвистической переменной ОЦЕНКА, т.е. $GN \in T(\text{ОЦЕНКА}) = \{GN\} = \{\text{«приблизительно норма», «немного меньше нормы», «выражено меньше нормы», «значительно меньше нормы»}\}.$

Числовая переменная α является базовой для лингвистической переменной ОЦЕНКА. Можно установить соответствие между интервалом $[0; 1]$, на котором определена переменная α , и терм-множеством $T(\text{ОЦЕНКА})$ лингвистической переменной ОЦЕНКА. Это соответствие устанавливается в результате шкалирования квантификаторов $G \in \{G\}$ на интервале $[0; 1]$ значений переменной α . В результате установления такого соответствия можно осуществлять переход от количественных оценок к качественным и наоборот с помощью отображения $G(\alpha)$, $G(\alpha) \in \{G\}$.

Для качественной оценки величины любого из параметров введем лингвистическую переменную ВП («Величина параметра»). Значение лингвистической переменной ВП для параметра P_i будем обозначать через XQ_i , где Q_i – высказывание «норма параметра P_i », или «параметр P_i в норме»; X – квантификатор, определяющий качественную меру для высказывания Q_i , т.е. в какой мере (степени) выполняется высказывание Q_i , $X \in \{X\} = \{\text{«значительно меньше, чем...», «выражено меньше, чем...», «немного меньше, чем...», «приблизительно равно...», «немного больше, чем...», «выражено больше, чем...», «значительно больше, чем...»}\}.$

«приблизительно равно...», «немного больше, чем...», «выражено больше, чем...», «значительно больше, чем...»}.

Таким образом, $\mathcal{H}Q_i \in T(ВП) = \{\mathcal{H}Q_i\} = \text{«значительно меньше нормы», «выражено меньше нормы», «немного меньше нормы», «приблизительно норма», «немного больше нормы», «выражено больше нормы», «значительно больше нормы», где } T(ВП) \text{ – терм-множество лингвистической переменной } ВП.$

Рассмотрим вопрос установления соответствия между множеством допустимых значений параметра P_i и терм-множеством $T(ВП)$ лингвистической переменной ВП. Поставим в соответствие каждому значению параметра P_i числовую оценку $\mu \in [0; 2]$, характеризующую степень принадлежности значения параметра P_i «норме». Тем самым мы задали функцию $\mu = \mu_{Q_i}(P_i)$ – функцию принадлежности значений параметра P_i «норме». Таким образом,

$\mu_{Q_i} : \Delta P_i \rightarrow [0; 2]$, где ΔP_i – множество допустимых значений параметра P_i . При этом будем считать, что функция μ_{Q_i} обладает следующими свойствами:

- 1) $\mu_{Q_i} = 1$, если значение параметра P_i в «норме»;
- 2) $0 \leq \mu_{Q_i} < 1$, если значение параметра P_i меньше «нормы»;
- 3) $1 < \mu_{Q_i} \leq 2$, если значение параметра P_i больше «нормы»;
- 4) $\mu_{Q_i} \rightarrow 0$, если значение параметра P_i стремится к минимальному ($p_i = \inf \Delta P_i$), где p_i – значение параметра P_i);
- 5) $\mu_{Q_i} \rightarrow 2$, если $p_i = \sup \Delta P_i$.

Например, если $\mu_{Q_i} = 0.7$, то это означает, что значение параметра P_i меньше «нормы», степень принадлежности к «норме» равна 0.7; если $\mu_{Q_i} = 1.2$, то это означает, что значение параметра больше «нормы», степень принадлежности к «норме» равна 1.2 (в данной интерпретации), или $2 - 1.2 = 0.8$ (в традиционном понимании функции принадлежности, когда она не может превышать 1).

Введенная в рассмотрение шкала – интервал $[0; 2]$ – является универсальной для всех параметров P_i ($i = 1, \dots, n$), т.к. она не зависит от типа параметров и вида функций принадлежности $\mu_{Q_i}(P_i)$ ($i = 1, \dots, n$). Значение числовой переменной μ ($\mu \in [0; 2]$) определяет величину любого из параметров. Зная значение μ , можно найти значение, или в общем случае интервал значений, любого параметра (P_i): $\Delta p_i = \mu_{Q_i}^{-1}(\mu)$ ($i = 1, \dots, n$), где Δp_i – интервал значений параметра P_i , индуцированный значением переменной μ

(предполагается, что функции принадлежности $\mu_{Q_i}(P_i)$ ($i = 1, \dots, n$) являются неубывающими).

Числовая переменная $\mu \in [0; 2]$ является базовой для лингвистической переменной ВП. Соответствие между интервалом $[0; 2]$ и термножеством $T(ВП)$ лингвистической переменной ВП устанавливается в результате шкалирования квантификаторов $X \in \{X\}$ на интервале $[0; 2]$ – интервале значений базовой переменной μ . При этом получают отображение $X(\mu)$, $X(\mu) \in \{X\}$.

Пусть шкалирование квантификаторов произведено. Тогда каждому значению базовой переменной μ может быть поставлен в соответствие определенный квантификатор $X(\mu) \in \{X\}$. Если считать, что значение $\mu = \mu_i$ переменной μ обусловлено значением p_i параметра P_i ($i = 1, \dots, n$), т.е. $\mu_i = \mu_{Q_i}(p_i)$, то каждому значению p_i параметра P_i может быть поставлен в соответствие определенный квантификатор $X(\mu_i) = X(\mu_{Q_i} p_i \in K)$, такой что $X(\mu_{Q_i}(p_i)) Q_i \in T(ВП)$. И, наоборот, каждому квантификатору $X \in \{X\}$ может быть поставлен в соответствие некоторый интервал $\Delta\mu(X) \subset [0; 2]$. В свою очередь, интервал $\Delta\mu(X)$ индуцирует интервал $\Delta p_i(\Delta\mu(X))$ на шкале значений параметра P_i ($i = 1, \dots, n$). Так, если $\mu(X) = [\mu', \mu'']$, то $\Delta p_i(\Delta\mu(X)) = [\inf \mu_{Q_i}^{-1}(\mu'), \sup \mu_{Q_i}^{-1}(\mu'')]$.

Таким образом, можно осуществлять переход от шкалы значений любого параметра P_i ($i = 1, \dots, n$) к шкале количественных оценок степени принадлежности значений параметра «норме», а от неё — к шкале качественных оценок, а также — обратный переход.

Определим теперь понятие ситуации. Под ситуацией будем понимать либо вектор (p_1, p_2, \dots, p_n) , где p_i — значение параметра P_i , либо (в нечёткой форме) совокупность нечётких высказываний $\{X_1 Q_1, X_2 Q_2, \dots, X_n Q_n\}$, где $X_i = X(\mu_{Q_i}(p_i)) \in \{X\}$ ($i = 1, \dots, n$).

Если определены функции принадлежности μ_{Q_i} ($i = 1, \dots, n$) и множество квантификаторов, то нечёткая форма ситуации всегда может быть получена. Перевод ситуации в нечёткую форму (фаззификация) необходим для построения логико-лингвистических моделей принятия решений, использующих нечёткие схемы вывода.

Для получения оценки степени предпочтительности ситуации будем использовать следующую схему нечёткого вывода [3]:

$$\frac{\{X_1 Q_1, X_2 Q_2, \dots, X_n Q_n\}; \{Q_1, Q_2, \dots, Q_n\} \Rightarrow N}{G^* N}, \quad (1)$$

где $G^* \in \{G\}$.

В этой схеме посылка $\{Q_1, Q_2, \dots, Q_n\} \Rightarrow N$ означает, что если значения всех параметров в «норме», то такая ситуация является самой предпочтительной (безопасной). Требуется же определить оценку предпочтительности (уровня безопасности) G^*N для произвольной ситуации $\{X_1Q_1, X_2Q_2, \dots, X_nQ_n\}$, т. е. требуется определить G^* .

Схема индуктивного нечёткого вывода

В предлагаемом методе для получения оценки уровня безопасности (степени предпочтительности) ситуации используется нечёткая логико-лингвистическая модель принятия решений, которая строится на основе частных моделей, адекватных тривиальным ситуациям, т. е. ситуациям, на которые накладываются сильные ограничения [4]. Считается, что оценка степени предпочтительности тривиальной ситуации очевидна и может быть получена достаточно легко с помощью экспертов (путём их опроса — анкетирования).

Под **тривиальной ситуацией** $S(X_i)$, определяемой значением X_iQ_i параметра P_i , будем понимать ситуацию

$S(X_i) = \{X_1Q_1 \Rightarrow Q_1, \dots, X_{i-1}Q_{i-1} \Rightarrow Q_{i-1}, X_iQ_i, X_{i+1}Q_{i+1} \Rightarrow Q_{i+1}, \dots, X_nQ_n \Rightarrow Q_n\}$, где знак « \Rightarrow » означает «стремится к...», т. е. ситуацию, при которой значение параметра P_i равно X_iQ_i , а значения всех других параметров P_j ($j \neq i$) стремятся к «норме» (т. е. к наиболее благоприятным), насколько это возможно. Фактически в такой ситуации значения параметров P_j ($j \neq i$) находятся в «норме», если параметры P_j не зависят от параметра P_i , либо, насколько это возможно, минимально отклоняются от «нормы», если параметры P_j зависят от параметра P_i . Другими словами, $S(X_i)$ является наиболее предпочтительной ситуацией при данном фиксированном значении X_iQ_i параметра P_i .

Оценка степени предпочтительности ситуации $S(X_i)$ считается известной и равной $G_i(X_i)N$, где $G_i(X) \in \{G\}$ — зависимость, полученная для параметра P_i в результате опроса экспертов, при условии, что параметр P_i пробегает всевозможные значения XQ_i , $X \in \{X\}$, а значения других параметров P_j ($j \neq i$) при этом стремятся к «норме».

Поэтому можно считать справедливой следующую схему нечёткого вывода:

$$\frac{S(\mathcal{X}_i); \{Q_1, Q_2, \dots, Q_n\} \Rightarrow N}{G_i(\mathcal{X}_i)N} \quad (i = 1, \dots, n). \quad (2)$$

Таким образом, если справедлива посылка $\{Q_1, Q_2, \dots, Q_n\} \Rightarrow N$ и справедлива посылка $S(\mathcal{X}_i)$, то, согласно схеме (2), заключением является оценка $G_i(\mathcal{X}_i)N$.

Перейдем теперь к общему случаю (1), т.е. к случаю произвольной ситуации. Используя схемы вывода для частных случаев (2), схему вывода для общего случая можно свести к следующей общей схеме индуктивного нечёткого вывода:

$$\frac{\frac{S(\mathcal{X}_1); \{Q_1, \dots, Q_n\} \Rightarrow N}{G_1(\mathcal{X}_1)N} ; \dots ; \frac{S(\mathcal{X}_n); \{Q_1, \dots, Q_n\} \Rightarrow N}{G_n(\mathcal{X}_n)N}}{\frac{\{\mathcal{X}_1 Q_1, \mathcal{X}_2 Q_2, \dots, \mathcal{X}_n Q_n\}; \{Q_1, Q_2, \dots, Q_n\} \Rightarrow N}{[G_1(\mathcal{X}_1) \circ G_2(\mathcal{X}_2) \circ \dots \circ G_n(\mathcal{X}_n)]N}} \quad (3)$$

Таким образом, оценка G^*N для общего случая представляет собой композицию оценок $G_i(\mathcal{X}_i)$ для частных случаев, т.е.

$$G^* = G_1(\mathcal{X}_1) \circ G_2(\mathcal{X}_2) \circ \dots \circ G_n(\mathcal{X}_n), \quad (4)$$

где \circ — знак операции композиции.

Композиция (4) учитывает зависимость параметров P_i ($i = 1, \dots, n$) между собой и определена в [5].

Шкалирование квантификаторов

Рассмотрим задачу шкалирования квантификаторов $G \in \{G\}$ и $\mathcal{X} \in \{\mathcal{X}\}$. Квантификаторы $G \in \{G\}$ используются для определения нечётких значений лингвистической переменной «ОЦЕНКА». Термножество этой переменной есть $\{G_N\}$. Базовой переменной является числовая переменная $\alpha \in [0; 1]$. Шкалирование квантификаторов

$G \in \{G\}$ производится по шкале $[0; 1]$ базовой переменной α . Задача шкалирования квантификаторов $G \in \{G\}$ состоит в том, чтобы для каждого $G \in \{G\}$ определить интервал $\Delta_\alpha(G) \subset [0; 1]$. Причём должны выполняться следующие условия:

- 1) $\Delta_\alpha(G') \cap \Delta_\alpha(G'') = \emptyset$ для любых $G' \neq G''; G', G'' \in \{G\}$;
- 2) $\bigcup_{G \in \{G\}} \Delta_\alpha(G) = [0; 1]$.

Каждое нечёткое множество $G_N \in \{G_N\}$ характеризуется функцией принадлежности $\mu_{G_N} : [0; 1] \rightarrow [0; 1]$, которая ставит в соответствие каждому элементу $\alpha \in [0; 1]$ число $\mu_{G_N}(\alpha)$ из интервала $[0; 1]$, характеризующее степень принадлежности элемента α нечёткому множеству G_N .

Покажем, как производится шкалирование квантификаторов $G \in \{G\}$, если известны (построены) функции принадлежности $\mu_{G_N}(\alpha)$.

Пусть $\{G_i N\}_{i=1}^4$ — терм-множество лингвистической переменной «ОЦЕНКА», где:

- $G_1 = \text{«значительно меньше, чем...»};$
- $G_2 = \text{«выраженно меньше, чем...»};$
- $G_3 = \text{«немного меньше, чем...»};$
- $G_4 = \text{«приблизительно равно...»}.$

На рисунке 1 показан примерный вид функций принадлежности $\mu_{G_i N}(\alpha)$ для нечётких множеств $G_i N$ ($i = 1, \dots, 4$).

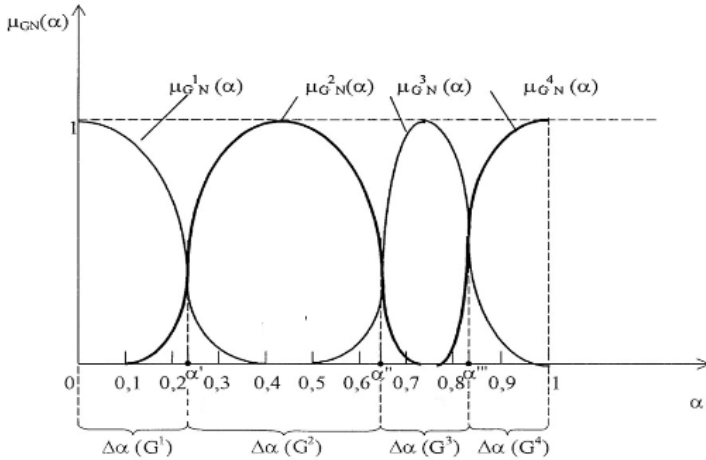


Рисунок 1 — Примерный вид функций принадлежности $\mu_{GN}^i(\alpha)$

Интервалы $\Delta_\alpha(G_i)$ ($i = 1, \dots, 4$) строятся следующим образом:

$$\Delta_\alpha(G_1) = [0, \alpha'), \quad \text{где } \alpha' \text{ определяется из уравнения } \mu_{G_1 N}(\alpha) = \mu_{G_2 N}(\alpha);$$

$$\Delta_\alpha(G_2) = [\alpha', \alpha''), \quad \text{где } \alpha'' \text{ определяется из уравнения } \mu_{G_2 N}(\alpha) = \mu_{G_3 N}(\alpha);$$

$$\Delta_\alpha(G_3) = [\alpha'', \alpha'''), \quad \text{где } \alpha''' \text{ определяется из уравнения } \mu_{G_3 N}(\alpha) = \mu_{G_4 N}(\alpha);$$

$$\Delta_\alpha(G_4) = [\alpha''', 1].$$

Таким образом, задача сводится к построению функций $\mu_{G_i N}(\alpha)$ ($i = 1, \dots, 4$). Так как областью определения этих функций является интервал $[0, 1]$, то их построение эквивалентно построению функций принадлежности следующих нечётких множеств: «значительно меньше, чем 1», «выраженно меньше, чем 1», «немного меньше, чем 1», «приблизительно 1».

Для построения этих функций принадлежности проводится следующий эксперимент. Берутся четыре ящика, каждый из которых снабжён этикеткой: первый ящик имеет этикетку «Значительно меньше 1», второй — «Выраженно меньше 1», третий — «Немного меньше 1», четвёртый — «Приблизительно 1».

Кроме того, имеется набор карточек, на каждой из которых записано одно из чисел из интервала $[0; 1]$ с двумя знаками после запятой, т.е. числа: $0; 0,01; 0,02; \dots; 0,99; 1$ — всего 101 карточка.

Задача каждого испытуемого, участвующего в эксперименте, заключается в следующем: необходимо разложить все карточки по всем ящикам в соответствии с прикреплёнными к ним этикетками, при этом в первый ящик обязательно кладётся карточка с «0», а в последний — карточка с «1». Остальные карточки раскладываются по всем четырём ящикам по смыслу на усмотрение испытуемого.

Обработка результатов эксперимента производится следующим образом. Для каждого нечёткого понятия, записанного на этикетке (т.е. для каждого ящика), и для каждого числа из набора чисел $0; 0,01; 0,02; \dots; 0,99; 1$ подсчитывается, сколько раз данное число попадает в ящик при всех испытаниях, т.е. для каждого числа определяется частота его попадания в определённый ящик.

Затем определяется относительная частота, получаемая в результате деления найденной частоты на общее число испытаний. На основе полученных данных для каждого нечёткого понятия $G_i N$ ($i = 1, \dots, 4$) строится полигон относительных частот, который можно рассматривать в качестве приближения функции принадлежности $\mu_{G_i N}(\alpha)$ (см. рис. 2).

Таким образом, задачу шкалирования квантификаторов $G \in \{G\}$ можно считать решённой.

В проведённом эксперименте участвовало 20 человек. Полученные полигоны относительных частот, принимаемые в качестве функций принадлежности для нечётких понятий «значительно меньше 1», «выраженно меньше 1», «немного меньше 1», «приблизительно 1», показаны на рис. 3.

Результаты шкалирования квантификаторов G_i ($i = 1, \dots, 4$) (представлены графически — см. рис. 3) следующие:

- G_1 («значительно меньше нормы»): $\Delta_\alpha(G_1) = [0; 0,23]$;

- G_2 («выраженно меньше нормы»): $\Delta_\alpha(G_2) = [0, 23; 0, 65]$;
- G_3 («немного меньше нормы»): $\Delta_\alpha(G_3) = [0, 65; 0, 87]$;
- G_4 («приблизительно норма»): $\Delta_\alpha(G_4) = [0, 87; 1]$.

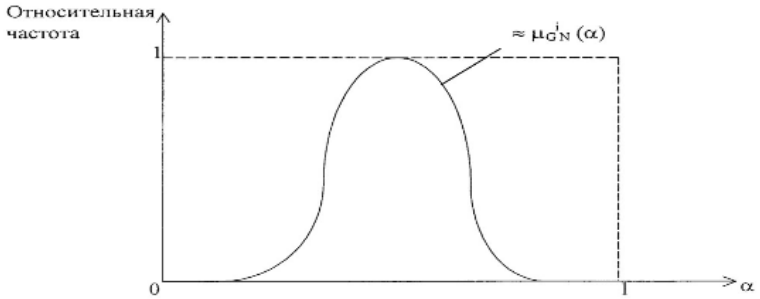


Рисунок 2 — Полигон относительных частот, принимаемый в качестве функции принадлежности $\mu_{GN}^i(\alpha)$

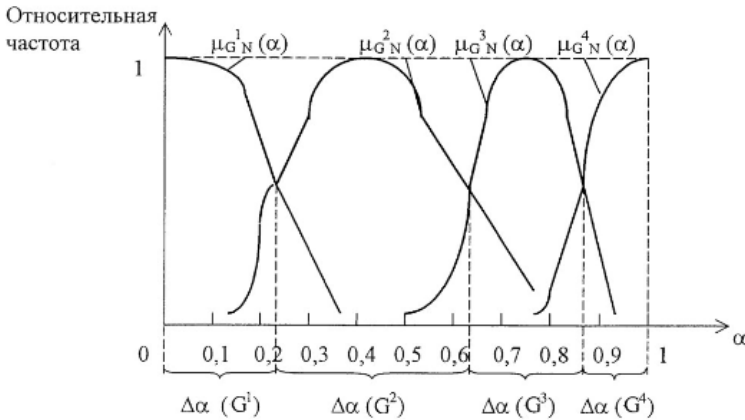


Рисунок 3 — Полигоны относительных частот, построенные на основе проведенного эксперимента

Рассмотрим теперь задачу шкалирования квантификаторов $X \in \{X\}$, которые используются для определения нечётких значений лингвистической переменной ВП, т.е. значений, принадлежащих $T()$. Базовой переменной для ВП является числовая переменная $\mu \in [0; 2]$. Задача шкалирования состоит в том, чтобы для каждого $X \in \{X\}$ определить интервал $\Delta_\mu(X) \subset [0; 2]$.

Пусть $X \in \{X_i\}_{i=1}^7$, где:

- $X_1 = \text{«значительно меньше, чем...»};$
- $X_2 = \text{«выраженно меньше, чем...»};$
- $X_3 = \text{«немного меньше, чем...»};$
- $X_4 = \text{«приблизительно равно...»};$
- $X_5 = \text{«немного больше, чем...»};$
- $X_6 = \text{«выраженно больше, чем...»};$
- $X_7 = \text{«значительно больше, чем...»}.$

Нетрудно заметить, что $\{G\} \subset \{X\}$. Кроме того, между множествами квантификаторов $\{G\}$ и $\{X\} \setminus \{G\}$ существует «семантическая симметрия», т.е., например, квантификатор «немного меньше, чем...», принадлежащий $\{G\}$, «симметричен» квантификатору «немного больше, чем...», принадлежащему $\{X\} \setminus \{G\}$ и т.д. Поэтому шкалирование квантификаторов $\{X\}$ можно получить на основе шкалирования квантификаторов $\{G\}$.

Пусть шкалирование квантификаторов $\{G\}$ осуществлено. Покажем, как в этом случае можно произвести шкалирование квантификаторов $\{X\}$, используя результаты шкалирования квантификаторов $\{G\}$.

Интервалу $[0; 1]$ значений μ соответствуют квантификаторы X_1, X_2, X_3, X_4 ; интервалу $[1; 2]$ — квантификаторы X_4, X_5, X_6, X_7 . Очевидно, что на интервале $[0; 1]$ значений μ задача шкалирования квантификаторов X полностью совпадает с задачей шкалирования квантификаторов $G \in \{G\}$. Поэтому задачу шкалирования квантификаторов X на интервале $[0; 1]$ будем считать решённой.

Пусть на интервале $[0; 1]$ мы получили следующее шкалирование:

$$\begin{aligned}\Delta_{\mu}(\mathcal{X}_1) &= [0; \mu']; \\ \Delta_{\mu}(\mathcal{X}_2) &= [\mu'; \mu'']; \\ \Delta_{\mu}(\mathcal{X}_3) &= [\mu''; \mu''']; \\ \Delta_{\mu}(\mathcal{X}_4) &= [\mu'''; 1]; \\ \mu', \mu'', \mu''' &\in [0; 1].\end{aligned}$$

Тогда в силу симметричности квантификаторов на интервале $[1; 2]$ шкалирование может быть получено как зеркальное отражение относительно точки $\mu = 1$ результатов шкалирования на интервале $[0; 1]$, т.е. на интервале $[1; 2]$ имеем:

$$\begin{aligned}\Delta_{\mu}(\mathcal{X}_4) &= [1; 2 - \mu''']; \\ \Delta_{\mu}(\mathcal{X}_5) &= (2 - \mu'''; 2 - \mu''); \\ \Delta_{\mu}(\mathcal{X}_6) &= (2 - \mu''; 2 - \mu'); \\ \Delta_{\mu}(\mathcal{X}_7) &= (2 - \mu'; 2].\end{aligned}$$

Так как квантификатор \mathcal{X}_4 шкалируется как на интервале $[0; 1]$, так и на интервале $[1; 2]$, то на всём интервале $[0; 2]$ шкалирование квантификатора \mathcal{X}_4 будет следующим:

$$\Delta_{\mu}(\mathcal{X}_4) = [\mu'''; 1] \cup [1; 2 - \mu'''] = [\mu'''; 2 - \mu'''].$$

Итак, задача шкалирования квантификаторов $\mathcal{X} \in \{\mathcal{X}\}$ решена.

Результаты проведённых экспериментов позволяют получить следующее шкалирование квантификаторов $\mathcal{X} \in \{\mathcal{X}\}$:

$$\begin{aligned}\Delta_{\mu}(\mathcal{X}_1) &= [0; 0, 23]; \\ \Delta_{\mu}(\mathcal{X}_2) &= [0, 23; 0, 65]; \\ \Delta_{\mu}(\mathcal{X}_3) &= [0, 65; 0, 87]; \\ \Delta_{\mu}(\mathcal{X}_4) &= [0, 87; 1, 13]; \\ \Delta_{\mu}(\mathcal{X}_5) &= (1, 13; 1, 35]; \\ \Delta_{\mu}(\mathcal{X}_6) &= (1, 35; 1, 77]; \\ \Delta_{\mu}(\mathcal{X}_7) &= (1, 77; 2].\end{aligned}$$

Формализация опыта эксперта (представление знаний)

В данном подходе одной из важнейших проблем при разработке модели принятия решений является проблема сбора и формализации информации, отражающей знания, опыт и интуицию эксперта, принимающего решения, а также включение этой информации в разрабатываемую логико-лингвистическую модель. Получение такой информации может быть осуществлено путем анкетного опроса экспертов. Для создания модели знаний системы необходима формализация этой информации.

Рассмотрим вопросы методологии проведения анкетного опроса экспертов и формализации информации, полученной в результате такого опроса.

В соответствии с рассмотренной моделью нам необходимо прежде всего для каждого параметра P_i знать зависимости:

$$\mu_{Q_i}(P_i), \quad X_i = X(\mu_{Q_i}(P_i)), \quad G_i(X) \quad (i = 1, \dots, n).$$

Перечисленные зависимости мы и должны получить на основе данных анкетного опроса экспертов. Кроме того, анкетирование проводится с целью выявления зависимостей между параметрами, т.е. с целью получения для всех параметров оценок степени зависимости одного параметра от другого, выраженных в виде коэффициентов субъективной зависимости параметров.

Рассмотрим вопросы получения указанных зависимостей и оценок на основе анкетного опроса экспертов. При этом от экспертов требуется, чтобы они при анкетировании давали ответы в нечётких терминах из заранее установленного перечня таких терминов.

Исходя из этого, процесс анкетирования организуем следующим образом. Разобьём его на ряд этапов.

1 этап. Анкетирование с целью получения зависимостей:

$$\mu_{Q_i}(P_i) \quad \text{и} \quad X(\mu_{Q_i}(P_i)) \quad (i = 1, \dots, n).$$

Задача эксперта — заполнить пустые клетки этой таблицы значениями или интервалами значений параметра P_i , соответствующими, по его мнению, тем нечётким значениям, которые проставлены над этими клетками. При этом должен быть охвачен весь спектр допустимых зна-

чений параметра, и разные клетки не должны содержать одинаковых значений.

Если экспертов не один, а несколько, то результаты анкетного опроса усредняются. Таким образом, в результате анкетного опроса получаем множество интервалов на шкале $[p_i \min, p_i \max]$ значений параметра P_i :

$$\Delta_{p_i}(X_1), \Delta_{p_i}(X_2), \dots, \Delta_{p_i}(X_7) \quad (i = 1, \dots, n),$$

где $p_i \min$, $p_i \max$ — соответственно минимальный и максимальный пределы изменения значений параметра P_i .

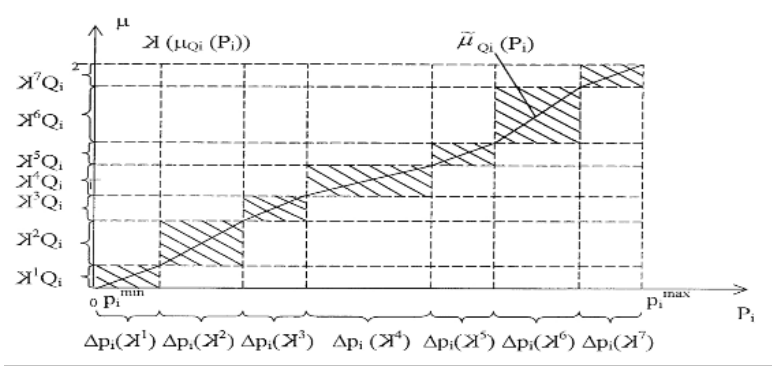


Рисунок 4 — Функция принадлежности $\tilde{\mu}_{Q_i}(P_i) \approx \mu_{Q_i}(P_i)$

2 этап. Анкетирование с целью получения для каждого параметра P_i качественных зависимостей $G_i(X)(X)$ и соответствующих им количественных зависимостей $\alpha = \alpha_{G_i}(\mu)$ и $\alpha = \alpha_{G_i}(\mu)$.

Задача эксперта состоит в следующем. Пусть известно, что значение всех параметров P_j ($j \neq i$), если они: * не зависят от параметра P_i — находятся в «норме»; * зависят от параметра P_i — минимально отклоняются от «нормы» (стремятся к «норме»).

Необходимо для каждого нечёткого значения величины параметра P_i , указанного в таблице, проставить наиболее подходящую, по мнению эксперта, оценку степени предпочтительности получающейся тривиальной ситуации в терминах: * «приблизительно норма»;

* «немного меньше нормы»; * «выраженно меньше нормы»; * «значительно меньше нормы».

Таким образом, эксперту предлагается оценить предпочтительность ряда тривиальных ситуаций. При этом клетка таблицы, соответствующая значению величины параметра «приблизительно норма», всегда заполняется постоянной информацией, соответствующей наивысшей оценке степени предпочтительности ситуации — «приблизительно норма», так как в этом случае значения всех параметров в «норме», что соответствует наиболее предпочтительной ситуации.

Таким образом, результатом этого анкетного опроса являются зависимости $G_i(\mathcal{X})$ ($i = 1, \dots, n$).

При условии, что шкалирование квантификаторов произведено, можно изобразить результаты анкетного опроса графически.

Приведём пример. Пусть эксперт заполнил анкетную таблицу 2. На рис. 5 результаты этого опроса представлены графически, где заштрихованные прямоугольники отражают результаты анкетного опроса. Если провести кусочно-линейную аппроксимацию, то получим приближённую функцию $\tilde{\alpha}_{G_i}(\mu) \approx \alpha_{G_i}(\mu)$.

3 этап. Анкетирование с целью выявления зависимостей между параметрами.

Введём в рассмотрение лингвистическую переменную ЧАСТОТА с терм-множеством: $T() = \{\text{«никогда»}, \text{«почти никогда»}, \text{«очень редко»}, \text{«редко»}, \text{«ни часто, ни редко»}, \text{«часто»}, \text{«очень часто»}, \text{«почти всегда»}, \text{«всегда»}\}$.

Пусть Ч — квантификатор, соответствующий лингвистической переменной ЧАСТОТА, где:

- Ч₁ = «никогда»;
- Ч₂ = «почти никогда»;
- Ч₃ = «очень редко»;
- Ч₄ = «редко»;
- Ч₅ = «ни часто, ни редко»;
- Ч₆ = «часто»;
- Ч₇ = «очень часто»;

- \mathcal{C}_8 = «почти всегда»;
- \mathcal{C}_9 = «всегда».

Пусть базовой переменной для лингвистической переменной ЧАСТОТА является числовая переменная $\chi \in [0; 1]$. Задача шкалирования квантификаторов решена в [2] и здесь рассматриваться не будет.

Будем рассматривать всевозможные пары параметров P_i и P_j ($i \neq j$). Целью анкетирования является построение для параметра P_i зависимостей: $\ast \mu_{Q_i}(P_i)$; $\ast \mathcal{C}_i(\mu_{Q_i})$; $\ast \alpha_i(\mu_{Q_i})$.

Зависимости $\mathcal{C}_i(\mu_{Q_i})$ и $\alpha_i(\mu_{Q_i})$ определяют частоту появления значений параметра P_i соответственно в качественной (нечёткой) и количественной форме.

Зависимости $\mathcal{C}_{ij}(\mu_{Q_i})$ и $\alpha_{ij}(\mu_{Q_i})$ определяют частоту появления значений параметра P_i соответственно в качественной (нечёткой) и количественной форме при условии $P_j = N$, т.е. при условии, что значение параметра P_j в «норме».

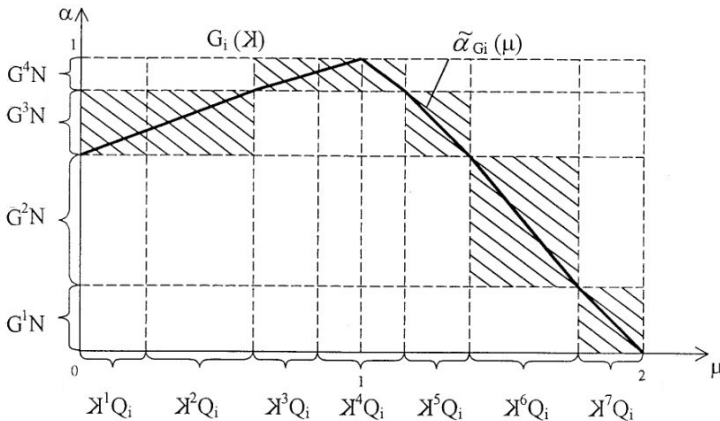


Рисунок 5 — Зависимости $G_i(X)$ и $\tilde{\alpha}_{Gi}(\mu) \approx \alpha_{Gi}(\mu)$ для параметра P_i

Для каждой упорядоченной пары параметров P_i, P_j ($i \neq j$) построим анкетную таблицу 3.

Задача эксперта состоит в заполнении второй и третьей строк таблицы.

Во второй строке требуется для каждого качественного (нечёткого) значения величины параметра P_i , указанного в первой строке, проставить в соответствующей клетке нечёткую оценку частоты появления данного значения величины параметра P_i в терминах: «никогда»; «почти никогда»; «очень редко»; «редко»; «ни часто, ни редко»; «часто»; «очень часто»; «почти всегда»; «всегда».

Тем самым будет построена зависимость $\mathcal{C} = \mathcal{C}_i(\mathcal{X})$.

В третьей строке таблицы требуется для каждого нечёткого значения величины параметра P_i , указанного в первой строке, проставить в соответствующей клетке нечёткую оценку частоты появления данного значения величины параметра P_i (в тех же терминах) при условии, что значение параметра P_j в «норме».

Тем самым будет построена зависимость $\mathcal{C} = \mathcal{C}_i(\mathcal{X}/Q_j)$.

При условии, что шкалирование квантификаторов $\mathcal{C} \in \mathcal{C}$ произведено, можем изобразить результаты анкетного опроса графически.

Пусть эксперт заполнил таблицу 3. Результаты этого опроса изображены графически на рис. 6 и 7. Рис. 6 соответствует заполнению второй строки, а рис. 7 — третьей строки таблицы 5. Заштрихованные прямоугольники на этих рисунках отражают результаты анкетного опроса.

Проведём аппроксимацию, как показано на рис. 6 и 7. В результате получим приближённые функции:

$$\tilde{\nu}_i(\mu) \approx \nu_i(\mu) \quad \text{и} \quad \tilde{\nu}'_i(\mu/Q_j) \approx \nu'_i(\mu/Q_j)$$

Функции $\nu_i(\mu)$ и $\nu'_i(\mu/Q_j)$ совместно характеризуют зависимость параметра P_i от параметра P_j . Проанализируем (качественно) эти функции с точки зрения зависимости формы их графиков от степени зависимости параметров P_i от P_j .

Рассмотрим три случая.

1. Параметр P_i не зависит от параметра P_j .

Очевидно, что в этом случае график функции $\nu_i(\mu)$ совпадает с графиком функции $\nu'_i(\mu/Q_j)$ (см. рис. 8).

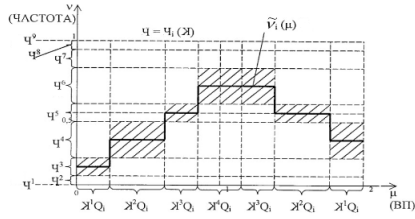


Рисунок 6 — Зависимости $\mathcal{C}_i(\mathcal{X})$ и $\tilde{\nu}_i(\mu) \approx \nu_i(\mu)$

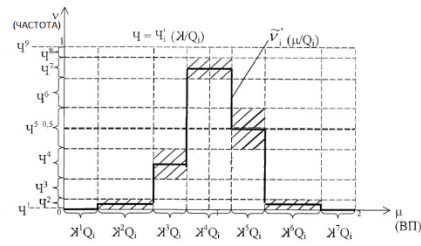


Рисунок 7 — Зависимости $\mathcal{C}'_i(\mathcal{X}/Q_j)$ и $\tilde{\nu}'_i(\mu/Q_j) \approx \nu'_i(\mu/Q_j)$

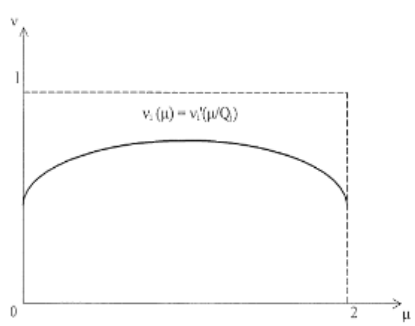


Рисунок 8 — Случай независимости параметра P_i от параметра P_j

2. Параметр P_i полностью зависит от параметра P_j .

В этом случае графики функций $\nu_i(\mu)$ и $\nu'_i(\mu/Q_j)$ в идеале будут иметь вид, показанный на рис. 9.

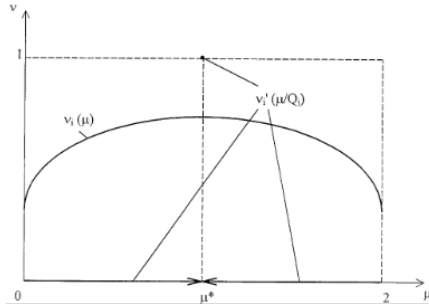


Рисунок 9 — Случай полной независимости параметра P_i от параметра P_j

Функция $\nu'_i(\mu/Q_j)$ при полной зависимости параметра P_i от параметра P_j аналитически может быть представлена следующим образом: $\nu'_i(\mu/Q_j) = \begin{cases} 0, & \text{при } \mu \in [0, \mu^*) \cup (\mu^*, 2]; \\ 1, & \text{при } \mu = \mu^*, \end{cases}$ где $\mu^* \in [0; 2]$.

При очень сильной (но не абсолютно полной) зависимости параметра P_i от параметра P_j графики функций $\nu_i(\mu)$ и $\nu'_i(\mu/Q_j)$ будут иметь примерно вид, показанный на рис. 10.

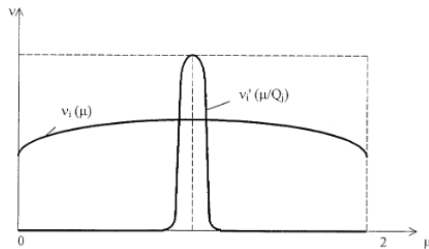


Рисунок 10 — Случай очень сильной (но не абсолютно полной) зависимости параметра P_i от параметра P_j

3. Параметр P_i в некоторой степени (не абсолютно полно) зависит от параметра P_j (наиболее общий случай).

В этом случае графики функций $\nu_i(\mu)$ и $\nu'_i(\mu/Q_j)$ будут иметь примерно вид, показанный на рис. 11.

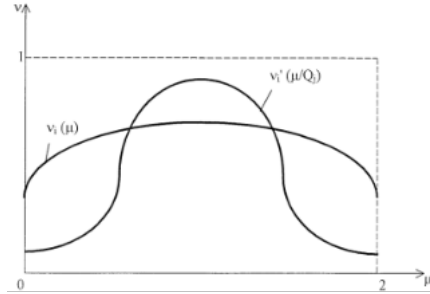


Рисунок 11 — Общий случай зависимости (не абсолютно полной) параметра P_i от параметра P_j

Для того, чтобы выразить количественно зависимость между параметрами, введём в рассмотрение коэффициент субъективной зависимости параметра P_i от параметра P_j , отражающий (субъективно, в силу расчётов, основанных на экспертных оценках) степень зависимости параметра P_i от параметра P_j . Обозначим его через γ_{ij} и определим следующим образом:

$$\gamma_{ij} = \frac{\int_0^2 \left| v_i(\mu) - v'_i\left(\frac{\mu}{Q_j}\right) \right| d\mu}{\int_0^2 \max \left\{ v_i(\mu), v'_i\left(\frac{\mu}{Q_j}\right) \right\} d\mu} \quad (5)$$

Нетрудно убедиться в том, что определённый таким образом коэффициент γ_{ij} обладает следующими свойствами:

1. $0 \leq \gamma_{ij} \leq 1$;
2. $\gamma_{ij} = 0$, если параметр P_i не зависит от параметра P_j , т.е. имеет место 1-й случай (см. рис. 8), когда $\nu_i(\mu) = \nu'_i(\mu/Q_j)$;
3. $\gamma_{ij} = 1$, если параметр P_i полностью зависит от параметра P_j , т.е. имеет место 2-й случай (см. рис. 9), при котором числитель и знаменатель выражения равны;

4. $0 < \gamma_{ij} < 1$, если параметр P_i в некоторой степени (не абсолютно полно) зависит от параметра P_j , т.е. имеет место 3-й случай (см. рис. 11); чем ближе значение γ_{ij} к 1, тем зависимость P_i от P_j более сильная, и наоборот.

Коэффициент γ_{ij} назван коэффициентом субъективной зависимости, т.к. вычисляется на основе субъективных данных — функций $\nu_i(\mu)$ и $\nu'_i(\mu/Q_j)$, полученных на основе данных анкетного опроса экспертов.

Дадим графическую интерпретацию коэффициенту γ_{ij} . Рассмотрим наиболее общий (3-й случай), когда параметр P_i в некоторой степени зависит от параметра P_j (см. рис. 11, 12).

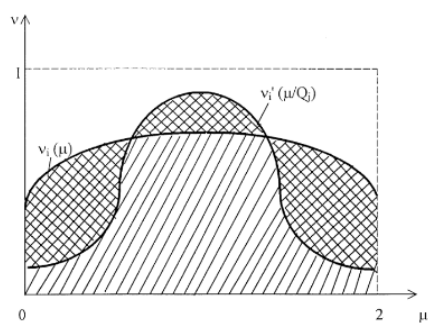


Рисунок 12 — Графическая интерпретация коэффициента γ_{ij}

Величина коэффициента γ_{ij} как следует из формулы (5), равна отношению площади, заштрихованной в клетку, ко всей заштрихованной площади.

Заключение

В работе рассмотрена постановка задачи оценки уровня техносферной безопасности с помощью логико-лингвистического моделирования, в основе которого лежит разработка схемы индуктивного нечеткого вывода и формализация знаний эксперта в области техносферной безопасности. Алгоритм принятия решений описывается во второй части данной работы, представленной в настоящем сборнике [5].

Список источников

1. Соколов А.К. Управление техносферной безопасностью. – М.: Юрайт, 2025. – 110 с.
2. Поспелов Д.А. Логико-лингвистические модели в системах управления. – М.: Энергоиздат, 1981. – 231 с.
3. Сенилов М.А., Истомин К.Ю. Применение логико-лингвистических моделей в оценке качества сложных многопараметрических объектов. – Диагностика, информатика, метрология, экология, безопасность – 96: Сб. докл. науч.-техн. конф. – СПб, 1996. – С. 243-247.
4. Senilov M.A. A Logical-Linguistic Decision-Making Model for Evaluation of Alternative Situations Preference. – International Colloquium on European Cooperation in the International Projects, Information Technologies and Environmental Sciences: Proceedings, Kothen, Germany, June, 1997. – P. 98 – 104.
5. Сенилов М.А., Попов М.О. Схема индуктивного нечеткого вывода для оценки уровня техносферной безопасности. Алгоритм принятия решений. – Безопасность в техносфере: труды XVIII Междунар. науч.-практ. конф. (25 ноября 2025 г.). – Вып. 18. – Ижевск: Удмуртский университет, 2025.

**A LOGICAL-LINGUISTIC DECISION-MAKING MODEL
FOR ASSESMENT OF TECHNOSPHERE SAFETY LEVEL.
PROBLEM STATEMENT AND KNOWLEDGE
REPRESENTATION.**

M.A. Senilov

Udmurt State University, Izhevsk, Russia

e-mail: *senilov@bk.ru*

M.O. Popov

Kalashnikov ISTU, Izhevsk, Russia

e-mail: *popovmo999@gmail.com*

This article considers the problem statement for integral assesment of technosphere safety level using logical-linguistic modeling, based on the development of an inductive fuzzy inference framework and the formalization of expert knowledge in the field of technosphere safety. The developed model takes into account the interdependence of technosphere safety factors and proposes a methodology for assessing this interdependence using a questionnaire survey of experts. The integral assessment is derived from partial assessments corresponding to trivial situations in the field of technosphere safety.

Keywords: technosphere safety level assessment, logical-linguistic model, inductive fuzzy inference framework, fuzzy sets, linguistic variable, quantifier scaling, knowledge representation model, expert questionnaire survey.

УДК 004.8:004.418

ПРИКЛАДНОЕ ПРИМЕНЕНИЕ НЕЙРОСЕТЕЙ И СИСТЕМ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ В ЗАДАЧАХ ТЕХНОСФЕРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

А.А. Акеев, М.С. Матвеев

Удмуртский Государственный Университет, г. Ижевск, Россия

e-mail: andreyakeew@mail.ru, aang.matveev@gmail.com

В данной статье рассмотрены задачи техносферной безопасности, которые могут быть решены благодаря применению систем машинного обучения и сверточных нейронных сетей. Рассмотренные примеры показывают, что модели YOLO позволяют выполнять распознавание образов в режиме реального времени, что может помочь при создании систем автоматизированного контроля движения на перекрёстках, модели CNN, построенные с использованием надстройки keras достаточно легко выполняют распознавание трещин не только в бетоне, но при правильном подходе и в схожих типах поверхностей

Ключевые слова: нейронные сети, машинное обучение, техносферная безопасность, детекция дефектов, контроль качества строительных конструкций, интеллектуальные транспортные системы, обнаружение объектов, компьютерное зрение, прогнозирование аварийных ситуаций

Введение

За последние несколько лет произошёл скачок в развитии технологий машинного обучения. Стало общедоступным использование нейронных сетей в прикладных задачах различных предприятий, что обосновано облегчёнными моделями свёрточных нейронных сетей, не требующих дорогостоящего оборудования для их применения.

Можно выделить две задачи, с которыми успешно справляются технологии компьютерного зрения:

- 1) **Классификация:** бинарный/многоклассовый вывод о наличии дефекта в кадре. Применима для фильтрации снимков, не даёт геометрической информации.

- 2) **Детекция:** определение координат ограничивающих прямоугольников вокруг областей с заданными объектами. Подход хорош для быстрой приоритизации и мониторинга регионов интереса.

Рассмотрим подробнее как решаются данные задачи.

Роль классических методов компьютерного зрения (OpenCV)

Классические методы остаются важными: предобработка, генерация дополнительных признаков и постобработка результатов нейросетей (морфологическая очистка масок, объединение сегментов, валидация по геометрическим критериям). Эти методы повышают устойчивость на практике и уменьшают требования к объёму размеченных данных.

CNN автоматически извлекают локальные пространственные признаки через свёртки и агрегацию. На ранних слоях формируются простые текстурные признаки, на глубинных – сложные паттерны, относящиеся к трещинам.

Для локализации требуется архитектура, сохраняющая пространственную информацию, или специальный детектор.

Архитектурные подходы

- **Encoder–decoder:** энкодер снижает размерность и захватывает семантику. Декодер же восстанавливает пространственную детализацию, часто с переходами, чтобы комбинировать локальные и контекстные признаки. Хорошо подходит для тонкой сегментации трещин.
- **Фичер-пирамида и многомасштабные подходы:** трещины встречаются в разных масштабах. Архитектуры, агрегирующие признаки, улучшают обнаружение мелких и крупных дефектов.
- **Детекторы:** одношаговый предсказатель локальных якорных рамок и классов. Он ориентирован на скорость и пригоден для детекции в реальном времени, но дает менее точные границы по сравнению с сегментацией. К детекторам относятся модели YOLO(You Only Look Once).

- **Комбинированные модули:** детектор для быстрой локализации зон интереса и добавление к нему локальной сегментации внутри зон для уточнения формы трещины.

Ни одна задача распознавания не может быть решена без грамотно составленного датасета (набор данных для обучения модели). Поэтому существуют требования, несоблюдение которых ведёт к ухудшению результата работы CNN или же к невозможности её применения на предприятиях:

- Разнообразие условий съемки: освещение, влажность, загрязнение масштаб
- Разметка в соответствии с целевой задачей: пиксельные маски для сегментации — точность масок важна для вычисления геометрических параметров.
- Баланс и частота классов: необходимы стратегии балансировки или усиленной аугментации.
- Качество разметки: систематические ошибки разметки приводят к систематическим смещениям модели; требуется проверка межаннотаторов и набор валидационных образцов.

Помимо этого, предобработка должна повышать информативность текстуры и подавлять шумы, не искажая геометрию объектов. Аугментации имитируют вариативность данных и помогают устойчивости.

Метрики качества и их смысл

Для отслеживания процесса обучения модели существуют специальные метрики.

- IoU / Jaccard: измеряет перекрытие предсказанной и эталонной области; ключевая метрика для сегментации/детекции.
- Dice (F1-для масок): чувствительна к малым областям — полезна при детальном осмотре.
- Precision / Recall / F1: баланс ложноположительных и ложноотрицательных срабатываний - они важны для эксплуатационной пригодности.

- mAP (mean Average Precision): стандарт для детекторов. Он усредняет качество по порогам IoU.

Выбор метрики должен отражать прикладную цель: минимизация ложных пропусков - важнее при риске аварий

Поставленные задачи

В ходе работы с промышленными партнёрами были поставлены две задачи, которые частично могут быть решены при помощи сверточных нейронных сетей:

- 1) Разработка программно-аппаратного комплекса для обнаружения различных дефектов бетонных конструкций для предотвращения аварий на предприятиях.
- 2) Разработка модели "умного перекрёстка" для оптимизации управления светофорами и транспортными потоками.

Из этих задач выделили часть, которую можно реализовать для рассмотрения прикладного применения нейросетей в задачах техносферной безопасности:

- 1) Детекция трещин бетонных поверхностей.
- 2) Детекция автомобилей для автоматизации перекрёстков.

Рассмотрим эти задачи.

Детекция трещин бетонных поверхностей.

Для решения задачи обнаружения дефектов бетонных поверхностей, было принято решение начать с самого очевидного – трещин. Чтобы успешно обучить модель требуется большой датасет. На данном примере, рассмотрим искусственное создание датасета.

Когда набор изображений не является достаточным для обучения модели, можно применить методы генерации схожих изображений с целью повышения качества обучаемой модели. Первоначальный набор данных состоит из 458 изображений высокого разрешения (4032 × 3024 пикселя)[2]. Далее применяется алгоритм, предложенный Лэй

Чжаном и его соавторами в 2016 году[3]. В результате получаем 40000 изображений (227×227 пикселей), половина из которых содержат трещины, а оставшиеся не содержат трещин.

После того как датасет подготовлен, можно приступить к установке необходимых библиотек для *Python*. Для обучения создаём модель *keras* (надстройка для TensorFlow)[4]. Разработанная модель демонстрирует высокую точность распознавания исследуемых классов, что было продемонстрировано ранее[1].

Детекция автомобилей с помощью камер видеонаблюдения на перекрёстках.

Для обнаружения автомобилей с помощью камер видеонаблюдения на перекрёстках следует использовать модель, позволяющую обрабатывать видео-поток в режиме реального времени. По этой причине была выбрана модель YOLO v12m. Данная модель является новейшей среди семейства YOLO, в связи с чем следует понимать, что по ней ещё не созданы кейсы применения. Тем не менее, по показателям, заявленным группой разработчиков, она превосходит предыдущие версии[5]. Применение YOLO подразумевает наличие размеченного датасета, для которого уже существуют bounding boxes, а также необходимо создать конфигурационный файл, с указанием путей до директорий с изображениями для обучения модели, валидации модели и именами классов распознаваемых объектов. Наша модель создана для поиска легковых автомобилей, поэтому файл конфигурации содержит только один класс - автомобиль. Первоначальная разметка объектов в датасете требует нормализации – преобразования из системы координат с целочисленными значениями в значения с плавающей точкой на отрезке $[0, 1]$, где 0 - это наименьшая координата пикселя на изображении, а 1 - наибольшая координата. Все промежуточные значения представляют собой данные типа *float*, например:

$$[0, 0.513, 0.552, 0.179, 0.117] \quad (1)$$

Данная запись может быть прочитана следующим образом:

- первое число – номер класса объекта(у нас класс «автомобиль» – единственный и имеет порядковый номер "0")

- второе число – x-координата центра выделенного прямоугольника(bounding box)
- третье число – y-координата центра
- четвёртое число – ширина bounding box
- пятое число – высота bounding box

После завершения работы с датасетом и проверки полученных нормализованных значений, можно приступить к обучению модели. Суффикс "m" в названии модели YOLO v12m означает, что модель сбалансирована в точности и скорости работы. Данная модель во время обучения использовала 7.8 ГБайт видеопамяти. Обучение проходило на видеокарте NVIDIA RTX 4070 Mobile, которая обладает 8 ГБайтами видеопамяти. Разницу в 200 МБайт можно объяснить системным резервированием для обеспечения отображения изображения на экране рабочего ноутбука.

После обучения модели можно посмотреть на результат обработки фотографий, содержащих автомобили. Как видно на рисунке 1, модель успешно справляется с задачей детекции автомобилей даже на снимках, где автомобилей несколько и один автомобиль перекрывает другой.

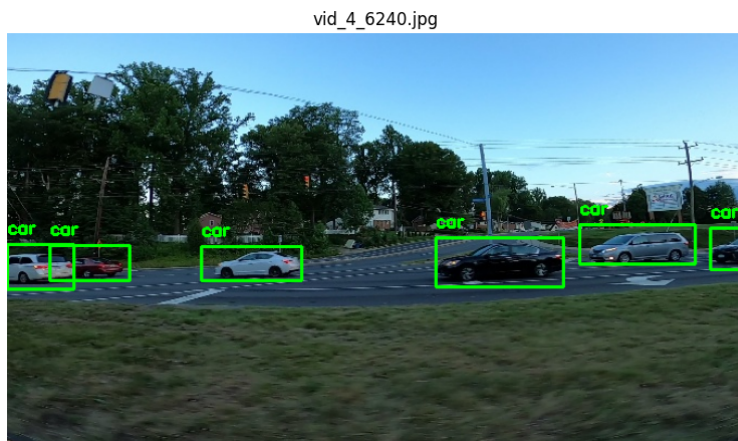


Рисунок 1 — Распознавание автомобилей обученной моделью

Заключение

Применение нейронных сетей и систем машинного обучения в различных прикладных задачах техносферной безопасности позволяет автоматизировать многие процессы: от предотвращения разрушения несущих конструкций на предприятиях до обеспечения безопасного движения транспортных потоков. Дальнейшее продвижение работы над рассмотренными задачами предполагает создание полноценных автоматизированных систем с широким функционалом, для чего будет необходимо создать пользовательские интерфейсы, которые позволят сотрудникам предприятий применять рассмотренные модели.

Список источников

1. Акеев А.А. Использование сверточной нейронной сети для локализации трещин на бетонных поверхностях // Безопасность в техносфере №18 — Ижевск: Издательский центр Удмуртский Университет, 2025. — С. 68–75.
2. Lei Zhang , Fan Yang , Yimin Daniel Zhang, and Y. J. Z., Zhang, L., Yang, F., Zhang, Y. D., & Zhu, Y. J. (2016). Road Crack Detection Using Deep Convolutional Neural Network. In 2016 IEEE International Conference on Image Processing (ICIP). <http://doi.org/10.1109/ICIP.2016.7533052>
3. Özgenel, Ç.F., Gönenc Sorguç, A. “Performance Comparison of Pretrained Convolutional Neural Networks on Crack Detection in Buildings”, ISARC 2018, Berlin.
4. Keras: Deep Learning API in Python : официальный сайт. – URL: <https://keras.io/> (дата обращения: 18.11.2025).
5. Ultralytics. YOLO12: Объектное обнаружение с акцентом на внимание [Электронный ресурс] // Документация Ultralytics. URL: (дата обращения: 08.12.2025)

APPLIED USE OF NEURAL NETWORKS AND MACHINE LEARNING SYSTEMS IN TECHNOSPHERIC SAFETY TASKS

A.A. Akeev, M.S. Matveev Udmurt State University, Izhevsk, Russia
e-mail: andreyakeew@mail.ru, aang.matveev@gmail.com

This article examines technospheric safety problems that can be solved through the application of machine learning systems and convolutional neural networks. The examples considered demonstrate that YOLO models enable real-time image recognition, which can be beneficial in developing automated traffic monitoring systems at intersections. CNN models built using the Keras framework can easily detect cracks not only in concrete but also in similar types of surfaces, provided an appropriate approach is applied.

Keywords: neural networks, machine learning, technospheric safety, defect detection, quality control of construction structures, intelligent transportation systems, object detection, computer vision, prediction of emergency situations

УДК 628.5

ПЕРСПЕКТИВЫ ПОВЫШЕНИЯ ТЕХНОСФЕРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ПРОМЫШЛЕННЫХ ИНСЕКТАРИЕВ НА ОСНОВЕ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

А.В. Ваштиева, В.К. Ваштьев, В.М. Колодкин

Удмуртский Государственный Университет, г. Ижевск, Россия

e-mail: anna.vashtieva@ya.ru, vashtiev@ya.ru, kolodkin@rintd.ru

*В статье рассматриваются вопросы обеспечения техносферной безопасности при промышленном разведении большой восковой моли (*Galleria mellonella*). Проанализированы риски, связанные с эксплуатацией лабораторного прототипа системы управления микроклиматом, и определены ключевые направления для создания безопасных, отказоустойчивых и масштабируемых промышленных решений. Предложены подходы к разработке архитектуры АСУ ТП, внедрению предиктивного управления и интеграции подсистем, направленные на минимизацию технологических рисков, предотвращение аварийных ситуаций, обеспечение санитарно-гигиенической безопасности продукции и снижение энергопотребления. Реализация этих направлений позволит создать устойчивые и безопасные производства в области агробиотехнологий.*

Ключевые слова: техносферная безопасность; промышленная безопасность; биотехнологическое производство; большая восковая моль (*Galleria mellonella*); автоматизированная система управления технологическими процессами (АСУ ТП); отказоустойчивость, предиктивная аналитика; управление рисками; энергоэффективность; промышленная экология.

Введение

Интенсификация и переход к промышленным масштабам в таких биотехнологических отраслях, как разведение насекомых (на примере большой восковой моли, *Galleria mellonella*), порождает новые вызовы в области техносферной безопасности. Помимо задач рентабельности, критическое значение приобретает обеспечение безопасных условий эксплуатации оборудования, стабильности технологических параметров, предотвращение биологических рисков и минимизация экологи-

ческого следа производства. Как показали предыдущие исследования, точный контроль микроклимата является не только фактором продуктивности, но и ключевым элементом системы безопасности, предотвращающим развитие патогенной микрофлоры и обеспечивающим благополучие объектов разведения [1]. Разработанный лабораторный макет АСУ доказал свою эффективность, однако прямой перенос в промышленные условия без учета аспектов безопасности чреват возникновением новых рисков. Цель данной статьи – сформулировать перспективные направления развития АСУ ТП для промышленных инсектариен с позиции обеспечения комплексной техносферной безопасности.

Анализ рисков и ограничений лабораторного прототипа с точки зрения безопасности

Лабораторная система управления локальным инсектариен [3] не учитывает ряд факторов риска, характерных для промышленной среды:

- 1) **Риски, связанные с масштабированием:** Централизованный отказ системы при управлении сотнями модулей может привести к массовой гибели биоматериала и значительным экономическим потерям. Отсутствие избыточности и распределенного управления снижает отказоустойчивость
- 2) **Риски, обусловленные неадаптивностью:** Классический ПИД-регулятор, не учитывающий динамику биомассы, стадии развития насекомых и внешние возмущения, может привести к:
 - Некритичным отклонениям параметров микроклимата, создающим условия для стресса популяции и развития заболеваний.
 - Повышенному энергопотреблению и износу оборудования из-за неоптимального управления.
 - Аварийным ситуациям при резких изменениях внешних условий (скачки температуры/влажности в цехе).
- 3) **Риски из-за недостаточной функциональности:** Отсутствие систем удаленного мониторинга, предиктивной диагностики обо-

рудования и анализа данных повышает вероятность незамеченных отказов датчиков или исполнительных механизмов, что ведет к технологическим сбоям и потенциальным санитарным нарушениям.

На основе анализа сформулированы **приоритетные задачи по обеспечению безопасности** при создании промышленной АСУ ТП:

- 1) Разработка отказоустойчивой и масштабируемой архитектуры системы управления.
- 2) Внедрение адаптивных алгоритмов управления для компенсации возмущений и профилактики аварийных режимов.
- 3) Интеграция систем контроля, диагностики и протоколирования для управления производственными рисками.

Направления повышения техносферной безопасности промышленных инсектариев на основе АСУ ТП

Для минимизации рисков общесистемных сбоев предлагается переход к **многоагентной распределенной архитектуре** с четким разделением уровней ответственности:

- **Нижний (полевой) уровень:** Автономные контроллеры (на базе ESP32, STM32) в каждом модуле инсектария, обеспечивающие базовое поддержание параметров даже при потере связи с верхними уровнями. Встроенные механизмы аварийной сигнализации и безопасной остановки.
- **Средний (цеховой) уровень:** Шлюзы-агенты, осуществляющие локальный мониторинг группы модулей, первичный анализ данных на предмет аномалий и обеспечение резервирования каналов связи.
- **Верхний (диспетчерский) уровень:** Центральная SCADA-система (например, Ignition или отечественный аналог) для корпоративного мониторинга, долгосрочного анализа трендов, управления производственными рецептами и формирования

отчетов для органов контроля. Реализация функций раннего предупреждения.

Такая архитектура повышает живучесть системы, локализует возможные отказы и облегчает безопасное масштабирование производства.

Для проактивного управления рисками предлагается использование **предиктивных моделей (MPC - Model Predictive Control)**. Модель, учитывающая не только текущие параметры, но и прогнозные данные, позволит:

- **Заблаговременно компенсировать внешние возмущения** (сезонные изменения, работа смежного оборудования), предотвращая выход параметров за критические пределы.
- **Оптимизировать энергопотребление** климатического оборудования, снижая нагрузку на энергосистемы и минимизируя углеродный след.
- **Учитывать биодинамику производства** (изменение биомассы, тепловыделения) для поддержания стабильных и безопасных условий на всех стадиях развития насекомых, снижая биологические риски.

Повышение общего уровня безопасности требует интеграции всех технологических подсистем в единый контур управления с использованием надежных промышленных протоколов (Modbus TCP, OPC UA):

- **Контроль микроклимата** (температура, влажность, газовый состав) как основа санитарно-гигиенической безопасности.
- **Системы автоматической подачи субстрата и утилизации отходов** для минимизации ручного труда и рисков биологического загрязнения.
- **Системы технического зрения** для автоматического мониторинга состояния популяции и раннего выявления аномалий.
- **Системы аварийного освещения и вентиляции** для действий в нештатных ситуациях.

Централизованное протоколирование всех событий и параметров создает цифровой след, необходимый для расследования инцидентов, анализа причин отказов и совершенствования системы управления безопасностью.

Ожидаемый вклад в обеспечение техносферной безопасности

Внедрение предложенных решений позволит достичь следующих результатов в области безопасности:

- 1) **Повышение технологической безопасности:** Снижение вероятности аварийных остановок и массовой гибели продукции на 25-30% за счет предиктивного управления и отказоустойчивой архитектуры.
- 2) **Снижение профессиональных рисков:** Минимизация присутствия персонала в производственных зонах за счет автоматизации мониторинга и управления, снижение рисков травматизма и воздействия неблагоприятных факторов.
- 3) **Обеспечение санитарно-эпидемиологической безопасности:** Повышение стабильности контролируемых параметров микроклимата на 25-30%, что является ключевым условием для предотвращения развития патогенов и получения безопасной продукции.
- 4) **Повышение экологической и энергетической эффективности:** Снижение удельного энергопотребления на 15-20% за счет оптимизации работы оборудования, что соответствует принципам «зеленой» экономики и снижает нагрузку на техносферу.

Заключение

Переход от лабораторных образцов к промышленным биотехнологическим комплексам требует переосмысления подходов к проектированию систем управления с приоритетом задач техносферной безопасности. Предложенные направления – создание отказоустойчивой распределенной архитектуры, внедрение предиктивных моделей для проактивного управления рисками и комплексная интеграция на

основе промышленных стандартов – формируют основу для разработки безопасных, устойчивых и эффективных производств. Реализация данной программы НИОКР будет способствовать не только технологическому развитию отрасли разведения насекомых, но и становлению высоких стандартов промышленной и экологической безопасности в агробиоинженерии.

Список источников

1. 1. Кондратьева Н.П., Ваштиев В.К., Ваштиева А.В. Модель управления микроклиматом в инсектарии для выращивания большой восковой моли при помощи ПИД-регулятора // Вклад молодых ученых в реализацию приоритетных направлений развития аграрной науки. – Ижевск. – 2021. – 348-353 С.
2. 2. Осокина, А. С. Ресурсный потенциал применения большой восковой моли (*Galleria mellonella* L.) при выращивании в лабораторных условиях: автореф. дис. ... канд. биол. наук. — Москва, 2016.
3. 3. Осокина А.С., Кондратьева Н.П., Ваштиев В.К. и др. Управление развитием личинок большой восковой моли (*G. Mellonella* L.) регулированием параметров микроклимата // Вестник Чувашского государственного аграрного университета. – 2023. – 135-143 С.

PROSPECTS FOR ENHANCING TECHNOSPHERIC SAFETY OF INDUSTRIAL INSECTARIES BASED ON AUTOMATED CONTROL SYSTEMS

A.V. Vashtieva, V.K. Vashtiev, V.M. Kolodkin Udmurt State
University, Izhevsk, Russia e-mail: anna.vashtieva@ya.ru,
vashtiev@ya.ru, kolodkin@rintd.ru

The article addresses issues of technosphere safety in industrial breeding of the greater wax moth (Galleria mellonella). The risks associated with the operation of a laboratory prototype of the microclimate control system are analyzed, and key directions for creating safe, fault-tolerant, and scalable industrial solutions are identified. Approaches to the development of automated process control system (APCS) architecture, implementation of predictive control, and integration of subsystems are proposed, aimed at minimizing technological risks, preventing emergency situations, ensuring sanitary and hygienic product safety, and reducing energy consumption. The implementation of these directions will enable the creation of sustainable and safe production facilities in the field of agrobiotechnology.

Keywords: technosphere safety; industrial safety; biotechnological production; greater wax moth (*Galleria mellonella*); automated process control system (APCS); fault tolerance; predictive analytics; risk management; energy efficiency; industrial ecology.

Раздел II

Приложение информационных технологий к решению практи- ческих задач

УДК 004.9

ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЛИЧЕСТВА ЧЕЛОВЕК В БОЛЬШИХ И МАЛЫХ ЗОНАХ ЗДАНИЯ

А.М. Сивков

г. Ижевск, Россия

e-mail: amsiv@mail.ru

В статье рассматривается работа автоматической системы мониторинга распределения людей в здании в реальном времени, использующей сеть горизонтальных двухлучевых инфракрасных счётчиков. По результатам, полученным в ходе эксплуатации системы, выполнена оценка возможной погрешности определения числа людей в различных зонах здания.

Ключевые слова: оптимальное планирование эвакуации, мониторинг распределения людей в здании, горизонтальный двухлучевой инфракрасный счётчик, оценка погрешности.

Введение

В простейшем случае план эвакуации при возникновении чрезвычайной ситуации предполагает движение людей к ближайшему выходу. Если пропускная способность этого выхода невелика, а людей в этой зоне здания изначально достаточно много, может оказаться выгодным для сокращения полного времени эвакуации часть людей из этой зоны направить в дальние выходы. Принятие решения по изменению схемы людских потоков возможно только при наличии информации о том, как люди изначально распределены по зонам здания, то есть информации о том, где они сейчас находятся и в каком количестве. Техническую систему, способную автоматически в реальном времени предоставлять такую информацию, можно построить по-разному. При этом существенное значение имеют два показателя: а) стоимость системы; б) погрешность определения числа людей.

Наиболее экономным вариантом системы, считающей людей в реальном времени, является сеть горизонтальных двухлучевых

инфракрасных счётчиков, установленных на входах в подлежащие контролю зоны здания.

Такая сеть счётчиков установлена для опытной эксплуатации в левом и правом крыле третьего этажа 6-го учебного корпуса УдГУ. Наблюдение ее работы в реальном времени доступно по ссылке <http://amsiv.beget.tech/monitor/>

Метод счёта людей

Определение текущего количества человек в различных зонах здания является косвенным. Количество человек в контролируемой зоне рассчитывается автоматически в реальном времени как разность числа вошедших и числа вышедших к этому моменту.

Непрерывный счёт людей, входящих в зону и выходящих из неё, производится по прерыванию двух горизонтальных параллельных инфракрасных лучей, создаваемых счётчиком. Последовательность их прерывания позволяет счетчику определить, входит человек в контролируемую зону или выходит из нее. Если зона имеет несколько входов, данные соответствующих счетчиков автоматически суммируются.

Источники ошибок

Ошибки счета людей инфракрасным счётчиком имеют два разных источника.

Один источник порождает ошибки, присущие методу счета по пересечению луча, как таковому. Подразумевается, что одно прерывание луча, расположенного на уровне плеч и головы, означает одного прошедшего человека. Однако, можно случайно прервать луч дважды: головой, и рукой. И напротив, два идущих рядом друг с другом человека могут вызвать всего одно прерывание луча.

Другой источник ошибок связан с подверженностью счётчика влиянию электромагнитных помех.

Накопленная ошибка

Будем различать элементарную и накопленную ошибку.

Элементарная (или “атомарная”) ошибка счётчика - это ошибка, которая возникает при единичном акте взаимодействия человека с сенсорной системой счётчика, когда “что-то пошло не так”. Один человек, изредка, может быть сосчитан за двоих, и в этом случае элементарная ошибка равна единице. Она имеет знак плюс. Если, напротив, два человека “вошли как один”, то есть, счётчик одного из них не сосчитал, элементарная ошибка имеет знак минус.

В памяти счётчика раздельно накапливается количество вошедших и количество вышедших. Ясно, что при этом накапливаются и элементарные ошибки, если они есть. Накопленная, то есть суммарная ошибка счётчика - случайная величина. В целом, она может иметь положительный или отрицательный знак, в зависимости от того, элементарных ошибок с каким знаком случилось больше.

Автоматическая система мониторинга распределения людей по зонам здания использует данные, полученные счетчиками. И, значит, рассчитанное число человек в какой-то зоне здания содержит накопленную случайную ошибку. Ее знак и величину можно увидеть на табло монитора в ночное время, когда в контролируемых зонах учебного корпуса в действительности никого нет.

Описание контролируемых зон

Для статистического анализа были выбраны две показательные зоны здания: малая и большая.

Малая зона представляет собой одну из однотипных учебных аудиторий 6-го учебного корпуса УдГУ. Перед началом занятия студенты входят в аудиторию, по окончании - выходят из нее. И так несколько раз за день.

По данным системы мониторинга, среднее (за 100 суток) количество студентов, входящих в аудиторию в течение учебного дня: 85,4. Среднее (за 100 суток) максимальное за учебный день количество студентов, одновременно находящихся в аудитории: 15,8.

Коэффициент сменяемости (то есть отношение этих чисел) составляет величину не менее 5,4.

Большая зона представляет собой левое крыло третьего этажа 6-го учебного корпуса УдГУ. Крыло имеет три входа: с центральной

лестницы, с пожарной лестницы, а также из перехода в 4-й учебный корпус. Внутри этой зоны расположены коридор, учебные аудитории, административные и вспомогательные помещения.

По данным системы мониторинга, среднее (за 50 суток) количество студентов, входивших в левое крыло третьего этажа в течение учебного дня: 1359,7. Среднее (за 50 суток) максимальное за учебный день количество студентов, одновременно находившихся в этой зоне: 53,8.

Коэффициент сменяемости составляет величину не менее 25,3. Большая величина коэффициента сменяемости для этой зоны объясняется тем, что левое крыло третьего этажа обеспечивает сквозной проход из одного учебного корпуса в другой.

Результаты оценки

Практический интерес представляет оценка математического ожидания ошибки нахождения числа человек в зоне и оценка среднеквадратического отклонения этой ошибки от её математического ожидания. Для типовой учебной аудитории оценка производилась по выборке из 100 измерений. Для левого крыла третьего этажа учебного корпуса использовалась выборка из 50 измерений.

Типовая учебная аудитория:

Мат. ожидание максимума одновременно присутствующих: 15,8 чел.

Мат. ожидание ошибки: 0,18 чел.

Среднеквадратическое отклонение ошибки: 2,8 чел.

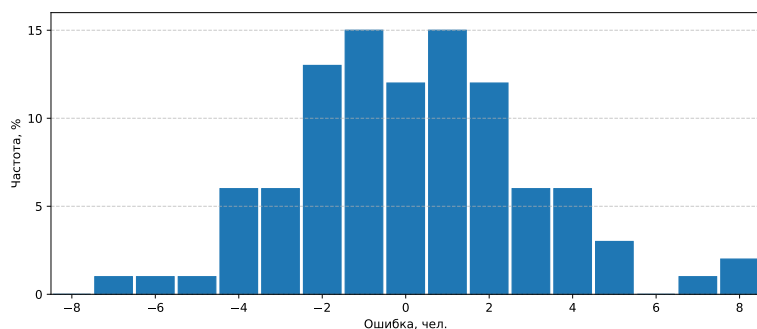


Рисунок 1 — Частотное распределение суточной ошибки для типовой учебной аудитории

Левое крыло этажа в целом:

Мат. ожидание максимума одновременно присутствующих: 53,8 чел.

Мат. ожидание ошибки: 0,20 чел.

Среднеквадратическое отклонение ошибки: 10,7 чел.

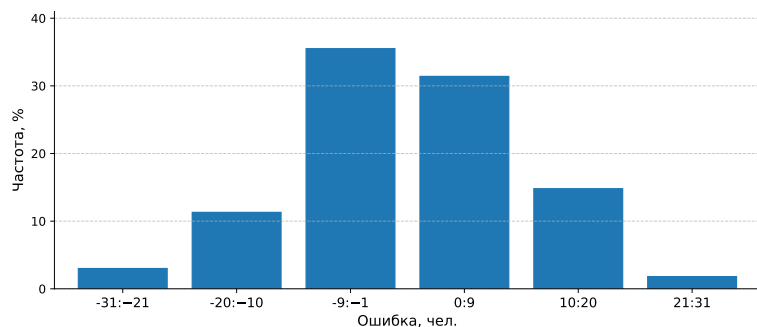


Рисунок 2 — Частотное распределение суточной ошибки для левого крыла этажа в целом

В теории погрешностей измерений принято оценивать абсолютную погрешность удвоенной величиной среднеквадратического отклонения. В свою очередь, относительную погрешность получают делением абсолютной погрешности на измеряемую величину.

Согласно этому, относительная погрешность нахождения числа человек составляет:

Для типовой учебной аудитории: 35%

Для левого крыла этажа в целом: 40%

Заключение

По результатам, полученным в ходе эксплуатации автоматической системы, основанной на сети горизонтальных двухлучевых инфракрасных счётчиков, получена оценка абсолютной и относительной погрешности определения количества человек в контролируемых зонах здания. Найденная величина погрешности позволяет очертить круг задач, для решения которых система имеет приемлемые характеристики.

ASSESSMENT OF THE ERROR IN DETERMINING THE NUMBER OF PEOPLE IN LARGE AND SMALL AREAS OF A BUILDING

A.M. Sivkov

Izhevsk, Russia

e-mail: *amsiv@mail.ru*

This article examines the operation of an automated real-time building occupancy monitoring system using a network of horizontal dual-beam infrared counters. Based on the results obtained during system operation, an assessment of the potential error in determining the number of occupants in various areas of the building is made.

Keywords: Optimal evacuation planning, monitoring the distribution of people in a building, horizontal dual-beam infrared counter, error assessment.

УДК 681.513.2

РАБОТА КОРИОЛИСОВОГО РАСХОДОМЕРА

А.Д. Шакиров

ООО «НПП Электротех», г. Ижевск, Россия

e-mail: artdmshakirov@gmail.com

Кориолисовые расходомеры могут измерять расход и плотность с высокой точностью, но только если учитывать ряд явлений, происходящих при различных внешних факторах. В данной работе представлена упрощённая модель, показывается работа расходомера в нормальных условиях, и даётся объяснение влияния внешних факторов на модель. Это может позволить разрабатывать расходомеры с лучшей устойчивости к внешним факторам.

Ключевые слова: кориолисовый, расходомер, сила Кориолиса, измерение

Введение

Кориолисовые расходомеры применяются в различных областях промышленности, где требуется физическая или химическая устойчивость к жидкостям. Например, буровой раствор закачивается под большим давлением и содержит твёрдые примеси, имеют место скачки давления. Или химически активные жидкости, которые могут вызывать повреждение обычных расходомеров. Или пищевые субстанции, для которых требуется простота прочистки трубопровода. Кориолисовый расходомер может подойти для таких сложных условий – он не содержит в себе свободно движущихся частей и представляет собой одну или (чаще) несколько вибрирующих металлических труб с измеряемым потоком жидкости. Отсутствие других элементов помимо, собственно, труб позволяет повысить надёжность. Однако, при определённых требованиях, таких как требования минимизации размера при достаточном для задачи сечении труб, сложно предсказать характеристики на этапах проектирования, а массовое прототипирование экспериментальных моделей недоступно из-за большой стоимости производства. В данной работе опытом испытывается упрощённая модель измерения расхода, дающая необходимые представления для примерного определения характеристик и их улучшения.

Часто моделирование кориолисовых расходомеров производится численными методами (например, моделирование с целью определения резонансной частоты) как в [1], которые не удобны в ряде случаев. В данной статье численные методы не применяются, по аналогии с [2], но в данной работе предлагается измерять сдвиг в угловых единицах.

Основная часть

Используемый на предприятии вариант объяснения определения расхода, а так же простая математическая модель, заключается в следующем. Пусть в трубе имеется массовый расход жидкости Q , отвод с прямым участком длиной L отведён на расстояние d и колеблется на (собственной) частоте ω (рисунок 1а). Тогда крутящий момент M силы Кориолиса F_k :

$$M = F_k d = 2m_1 V_1 \omega d, \quad (1)$$

где m_1 – масса жидкости, V_1 – скорость жидкости.

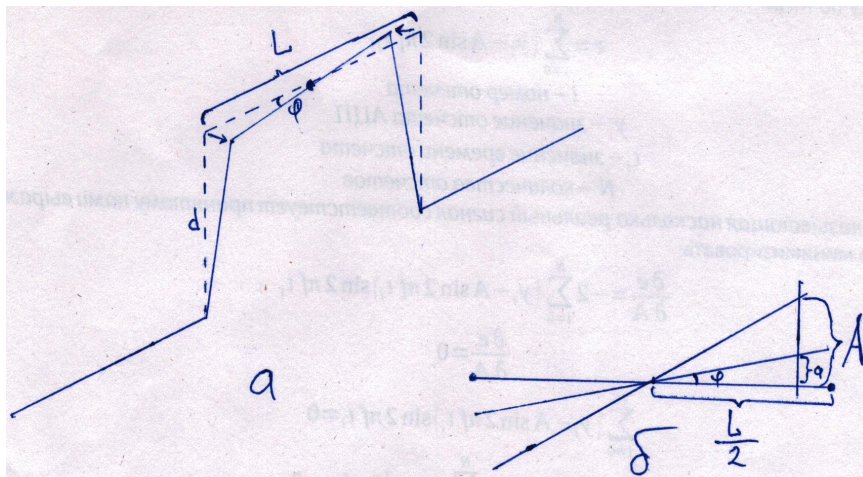


Рисунок 1 — Упрощённая схема расходомера (а), отклонение верхней трубы из-за расхода (б)

Принимая во внимание массовый расход Q

$$Q = \frac{m_1 V_1}{L} \quad (2)$$

считается, что

$$M = 2QL\omega d. \quad (3)$$

Принимая за k жёсткость на скручивание, объявляется угол поворота трубки ϕ

$$\phi = \frac{M}{k} = \frac{2QL\omega d}{k}, \quad (4)$$

а массовый расход тогда выражается так:

$$Q = \frac{\phi k}{2L\omega d}. \quad (5)$$

На практике, данные об отклонении трубки получают с сенсоров положения (ускорения) на краях труб в виде разности α фаз двух сигналов, а не в виде угла поворота. Часто предпринимается попытка выразить её единицами времени (т. е. на какое время одна синусоида опережает другую). В данной работе же, в отличие от используемой в данный момент на предприятии разнице в единицах времени, автор далее попытается выявить зависимость массового расхода непосредственно от разности фаз сигналов, измеряемой в угловых единицах. Это также позволит приблизить предложенную модель с вычислительными методами на базе преобразования Фурье, где смещение по фазе также получается в угловых единицах.

Рассматривается ситуация с отклонением трубы при наличии расхода (рисунок 16). Из-за наличия силы Кориолиса и угла ϕ , одна сторона трубки отклоняется на расстояние a от той позиции, где она была бы при отсутствии расхода. Это расстояние – некоторая часть амплитуды A , амплитуда поддерживается неизменной и примерно равна у двух концов трубы. Также можно сказать, что точка конца трубы запаздывает (опережает) себя на это расстояние.

Связь ϕ и a определяется геометрически (угол ϕ очень мал, поэтому $\text{tg } \phi \approx \phi$):

$$\text{tg } \phi = \frac{2a}{L} \quad (6)$$

$$a = \frac{L \operatorname{tg} \phi}{2} \approx \frac{L\phi}{2} \quad (7)$$

Требуется связать a с отклонением по фазе α относительно раскачивающейся трубы без расхода. Угол α очень мал, что показано далее в экспериментальных данных, поэтому $\sin \alpha \approx \alpha$. В описываемый момент колебаний, в уравнении гармонического колебания $t = 0$, и получается следующее:

$$a = A \sin \alpha \approx A\alpha \quad (8)$$

Выражается α и подставляется a из формулы [7]:

$$\alpha = \frac{L\phi}{2A} \quad (9)$$

Выражается ϕ :

$$\phi = \frac{2A\alpha}{L} \quad (10)$$

Подставляется теперь ϕ в формулу [5]:

$$Q = \frac{A\alpha k}{L^2\omega d}. \quad (11)$$

Полученная формула [11] и связывает массовый расход непосредственно с отклонением по фазе α .

Был проведён опыт с U-образным расходомером «РВ-В-30-122-01К 1”». При нормальных условиях прокачивалась вода. Мера угла - угловые секунды. Расход измерен эталонным расходомером. Результаты представлены в таблице 1:

Был построен график, на котором также представлена линейная регрессия экспериментальных данных (рисунок 2), что позволяет оценить соответствие предложенной модели, а именно – линейность сдвига относительно расхода:

При этом следует иметь ввиду, что в формуле [11] не учитывается влияние силы Кориолиса на боковых участках отвода ввиду простоты модели, а на практике отвод представляет собой сложную кривую.

Также, был проведён опыт по проверке зависимости частоты колебаний ω от плотности жидкости:

Таблица 1 — Зависимость сдвига фаз от расхода

Расход, л/с	Сдвиг, угл. с
4,64	1388
4,22	1250
3,7	1090
3,4	1012
2,45	723
2	585
1,7	503
1,3	369
0,98	287
0	13

Таблица 2 — Зависимость частоты колебаний ω от плотности жидкости

Плотность, г/см³	Частота, Гц
2.4	128.9
2.0	132.7
1.0	145.4
0.0	162.5

Объясним такую зависимость частоты от плотности. Систему (осциллирующий отвод трубы с жидкостью) можно представить как гармонический упругий (пружинный) маятник, где собственная частота $\omega_0 = \sqrt{k/m}$, где k — коэффициент жёсткости. По этой зависимости, чем больше масса, тем меньше частота. Или же можно представить систему как зафиксированную с одной стороны (консольную) балку, там расчёты немного сложнее, но такая же зависимость частоты от плотности балки, а именно: частота пропорциональна корню из обратного значения плотности материала.

Закключение

Была представлена зависимость расхода от сдвига фаз (проявления Кориолисовой силы) (формула [11]), где, в частности, видно, что расход

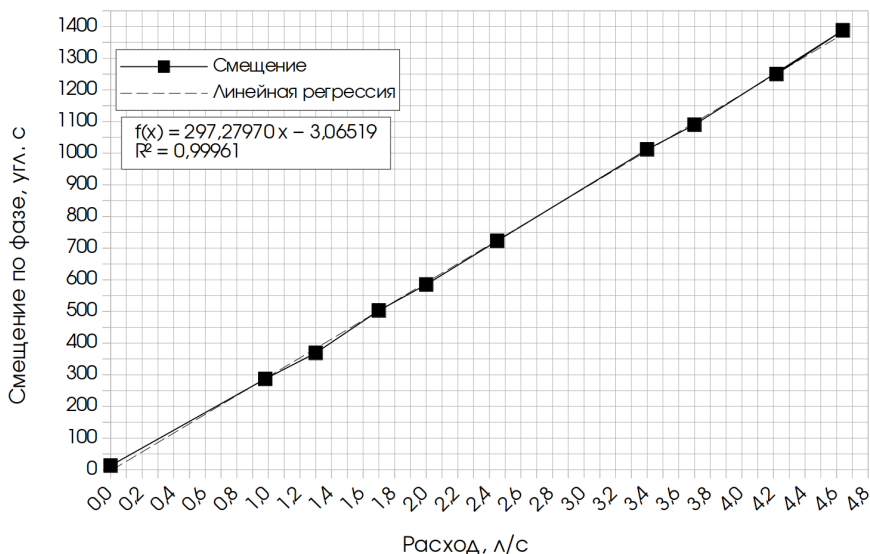


Рисунок 2 — Зависимость сдвига фаз от расхода

зависит от размеров трубы, которые изменяются от температурных воздействий и давления. Линейная зависимость сдвига фаз от расхода подтверждена опытом. Также показана на опыте и объяснена зависимость плотности жидкости и собственной частоты трубы.

Список источников

1. Юрманов В. А., Гудков К. В., Люсев А. В. Математическое моделирование кориолисова расходомера // НиКа. 2009. №. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/matematicheskoe-modelirovanie-koriolisova-rashodamera> (дата обращения: 08.11.2025).
2. Пархоменко Г. Г. Исследование моментов сил, действующих на вибрационный преобразователь массового расхода // Вестник СГ-ТУ. 2012. №1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-momentov-sil-deystvuyuschih-na-vibratsionnyy-preobrazovatel-massovogo-rashoda> (дата обращения: 08.11.2025).

OPERATION OF THE CORIOLIS FLOW METER

A.D. Shakirov

RPE Electrotech LLC, 426034 Russia, Izhevsk, Universitetskaya, 1
e-mail: *artdmshakirov@gmail.com*

Coriolis flowmeters can measure flow and density with high accuracy, but only if a number of phenomena occurring under various external factors are taken into account. This paper presents a simplified model, shows the operation of the flow meter under normal conditions, and explains the influence of external factors on the model. This may allow the development of flowmeters with better resistance to external factors.

Keywords: coriolis, flow meter, coriolis force, measurement

УДК 004.896

ДЕТЕКЦИЯ ОТКЛОНЕНИЙ ПРИ 3D ПЕЧАТИ С ПОМОЩЬЮ НЕЙРОСЕТИ

М.М. Юсупов

г. Ижевск, Россия

e-mail: mjpn15@mail.ru

В статье рассматривается метод выявления отклонений и дефектов при аддитивном производстве (3D-печати) с помощью системы технического зрения на базе нейронных сетей. Предлагается архитектура визуального мониторинга процесса печати, использующая единственную камеру, направленную на область сопла 3D-принтера, и глубокую сверточную нейронную сеть с остаточными связями и механизмами внимания для автоматического обнаружения отклонений.

Ключевые слова: аддитивное производство; 3D-печать; контроль качества; компьютерное зрение; нейронные сети; техносферная безопасность; обнаружение дефектов.

Введение

Аддитивные производственные технологии всё шире применяются в промышленности, медицине и авиакосмической отрасли. Однако стабильность качества печати остаётся серьёзной проблемой. Небольшие отклонения в процессе экструзии могут привести к образованию внешних дефектов – таких как беспорядочное напластование нитей при отрыве модели от платформы, расслоение слоёв, смещение по осям, прерывание подачи материала – а также внутренних дефектов. Появление подобных аномалий повышает риск разрушения готового изделия. Для снижения доли брака и обеспечения безопасности разрабатываются системы мониторинга процесса печати. Одним из наиболее перспективных подходов является использование камер, установленных на принтере, и алгоритмов компьютерного зрения на основе нейронных сетей, которые анализируют видеопоток в реальном времени и автоматически выявляют дефекты до завершения печати.

В рамках проекта была создана практическая система нейросетевого контроля печати, отвечающая указанным требованиям. Цель

данной статьи – обобщить опыт этого проекта, описать архитектуру и алгоритмы модели, а также привести результаты экспериментов по оценке её точности и производительности. Отдельно обсуждается значение применения таких систем для техносферной безопасности (предотвращение аварий и снижение риска за счёт исключения бракованных деталей).

Описание данных для обучения

Для обучения и проверки модели авторами проекта был сформирован обширный датасет изображений печати с различными типами дефектов. Использовались как открытые наборы данных из предыдущих исследований, так и собственные материалы. В общей сложности было привлечено 7 источников данных, на которых отмечены случаи нештатного хода печати: появление «спагетти», отлипание изделия от стола, обрывы нитей, дефекты формы и другие. Датасеты объединены в два основных набора: **CNN Dataset** – для первоначального обучения сверточной нейронной сети, и **Prototypical Network Dataset** – для последующего прототипного обучения модели few-shot. Также для оценки обобщающей способности алгоритмов были подготовлены сокращённые версии наборов и привлечён современный независимый датасет *Beyer 2024* с неисправностями без предварительной фильтрации. Такой разнообразный корпус данных позволил охватить наиболее распространённые сценарии отказов FDM-печати.

Помимо исходных изображений, применялись методы аугментации данных. Каждый кадр проходил случайные преобразования: перевод в градации серого, изменение яркости и контраста, горизонтальное отражение, масштабирование и поворот. Это увеличило разнообразие обучающих примеров и помогло снизить риск переобучения модели. Для количественной оценки качества детекции в экспериментальных сессиях использовались следующие метрики: **Accuracy** (доля верно классифицированных кадров), **Precision** и **Recall** (точность и полнота обнаружения дефектных состояний), а также интегральная метрика **F1-score**. Помимо точности распознавания фиксировался показатель производительности – **пропускная способность** (throughput), выраженная в количестве обрабатываемых изображений в секунду на заданном оборудовании. Именно реальная скорость работы определяет применимость системы в условиях непрерывного процесса печати.

Архитектура модели и методы обучения Сверточный экстрактор признаков (CNN)

В качестве базового модуля для анализа изображений был выбран облегченный сверточный классификатор на основе архитектуры **ShuffleNet v2**. Эта модель оптимизирована под вычисления на мобильных и встроенных устройствах, обеспечивая высокую скорость работы при умеренном количестве параметров. Экстрактор признаков принимает на вход кадры с камеры и преобразует их в компактное представление (вектор признаков), который далее используется для выявления аномалий.

Обучение экстрактора проводилось с учётом нескольких стратегий, чтобы найти оптимальный баланс между точностью и обобщающей способностью. Рассматривались следующие конфигурации обучения:

(1) **базовая** – все слои CNN обучаются на имеющемся датасете с применением аугментации;

(2) **с замораживанием слоёв** – замораживаются (фиксируются) параметры первых слоёв сети (начальный conv и блок Stage 2), чтобы использовать предварительно обученные низкоуровневые признаки и ускорить сходимость;

(3) **без аугментации** – обучение на исходных изображениях без дополнительных преобразований, для оценки влияния аугментации на результат. Во всех случаях использовался оптимизатор Adam, а обучение велось до сходимости на тренировочной выборке с контролем по валидационной выборке.

Базовая модель достигла точности 93,9% на обучении и 92,8% на валидации, тогда как замораживание ранних слоёв немного повысило итоговую точность (до 95% на валидации) при одновременно меньших значениях функции потерь. Отказ от аугментации дал максимально высокую точность на обучающей выборке (96%), однако не улучшил результат на валидации (94%), то есть сеть переобучилась на конкретные данные. Эти наблюдения подтверждают, что аугментация данных и частичное замораживание слоёв помогают модели лучше обобщать знания и избегать переизбыточной подгонки под тренировочный набор.



Рисунок 1 — Потери моделей CNN при разных стратегиях обучения.

Замораживание слоёв обеспечивает наименьшие потери и лучшую обобщаемость, в то время как отсутствие аугментаций приводит к переобучению.

Отдельно исследовалось влияние механизма регуляризации **Dropout** в полносвязном слое и в свёрточных блоках экстрактора. Dropout отключает случайную часть нейронов во время обучения, что препятствует избыточному подгонке весов к данным. Эксперименты показали, что при высоких коэффициентах dropout (до 50% в полносвязном слое и 2,5–5% в некоторых свёрточных слоях) точность на тренировочном наборе заметно снижалась (до 81,5%), однако точность на валидации достигала 93,6%. Напротив, при отключенном или небольшом dropout сеть показывала высокую тренировочную точность (96%), но хуже обобщала новые данные. Оптимальным оказался умеренный dropout: при снижении его доли тренировочная точность поднялась до 85%, а валидационная – до 95,2%, т.е. удалось добиться наилучшего баланса между обученностью и обобщающей способностью. Таким образом, регуляризация через dropout доказала свою эффективность в предотвращении переобучения модели на специфичных особенностях изображений.

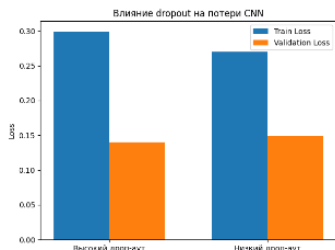


Рисунок 2 — Влияние dropout на потери CNN.

Высокий dropout снижает переобучение, уменьшая валидационные потери, несмотря на рост ошибок на обучении.

Прототипная сеть (few-shot learning)

Для расширения возможностей модели был применён подход **прототипного обучения** (prototypical network). Его суть заключается в том, что даже при наличии очень малого числа образцов каждого класса, алгоритм способен классифицировать новые данные, опираясь на расстояние до эталонных прототипов классов в пространстве признаков. В данной работе прототипная модель строилась на базе предварительно обученного экстрактора ShuffleNet v2: сначала изображения пропускались через CNN для получения векторов признаков, затем для каждого класса вычислялся центр (прототип) — среднее векторного представления нескольких известных образцов этого класса. Классификация новой ситуации сводилась к вычислению расстояний от ее признакового вектора до всех прототипов и выбору ближайшего.

В ходе экспериментов сравнивались две версии прототипной модели: с **fine-tuning экстрактора** - дообучением его весов на новых классах и **без fine-tuning** - экстрактор остается фиксированным, обучаются только прототипы. Выяснилось, что при дообучении экстрактора под конкретный набор дефектов модель превосходно запоминает именно эти классы (точность на обучающем датасете достигала 99,2%), но значительно теряет в универсальности — на других тестовых наборах её точность падала до 67-70%. Напротив, использование «замороженного» экстрактора признаков

дало более стабильные результаты: точность классификации дефектов удерживалась на уровне 92–99% на разных независимых наборах. Это подтверждает, что небольшой по размерам, но **устойчивый экстрактор с прототипной классификацией** лучше переносится на новые данные и не переобучается под конкретные условия.

В прототипной сети также проводилась настройка гиперпараметров: подбиралось оптимальное число опорных примеров (support set) для каждого класса, размер выборки запросов (query set) и коэффициент weight decay для регуляризации весов. В лучшей конфигурации прототипная модель достигала валидационной точности >99% уже к 7–10-й эпохе обучения, демонстрируя быструю сходимость и высокую обобщающую способность на малых данных.

Сравнение с существующими системами

Разработанная система была сопоставлена с популярным открытым решением **Obico Spaghetti Detective**, выполняющим обнаружение дефектов типа «спагетти» в FDM-печати. Для объективного сравнения обе модели (предлагаемая и Obico) протестированы на нескольких общих наборах данных с различными типами неисправностей. Итоговые средние показатели приведены в таблице 1.

Таблица 1 — Сравнение среднего качества детекции дефектов и скорости работы для предлагаемой модели и Obico Spaghetti Detective.

Модель	Precision	Recall	F1-score	Пропускная способность (изобр./с)
Предлагаемая (FDM)	94%	94%	0.937	15.1
Obico Spaghetti Detective	45%	40%	0.411	0.35

Метрики рассчитаны по совокупности тестовых наборов с различными неисправностями. Видно, что наша модель обеспечивает

почти вдвое более высокие Precision (точность), Recall (полнота) и F1-score (гармоническое среднее между Precision и Recall), обнаруживая значительно большую долю дефектов, при этом скорость обработки изображений примерно в 40 раз выше.

Средний **F1-score** разработанной модели составляет 0,94 при пропускной способности 15 изображений/сек, тогда как у Obico F1 всего 0,41 при 0,35 изобр./с. Иными словами, предлагаемая система выявляет значительно больше разнообразных неисправностей и делает это практически без задержек, тогда как Spaghetti Detective упускает многие типы дефектов и не успевает обрабатывать кадры в реальном времени на слабом оборудовании. Высокие значения Precision и Recall нашей модели (обе около 94%) говорят о том, что она практически не даёт ложных срабатываний и пропускает крайне малый процент реальных дефектов, тогда как у Spaghetti Detective эти показатели находятся на уровне 40–50%.

Заключение

Проект продемонстрировал, что современные методы машинного обучения позволяют реализовать эффективный контроль качества FDM 3D-печати в реальном времени на доступном аппаратном обеспечении. Разработанная система на основе компактной сверточной сети **ShuffleNet v2** и прототипного классификатора достигла высокой точности обнаружения дефектов ($F1 \approx 0,94$) при скорости >15 кадров/с. Комбинация операций аугментации данных, частичного **freeze** слоёв и регуляризации **dropout** позволила улучшить обобщающую способность модели, о чем свидетельствует рост валидационной точности с 93% до 95% и снижение функции потерь. Применение же метода **few-shot learning** (прототипной сети) обеспечило устойчивое распознавание новых типов дефектов даже при ограниченном объеме примеров, что выгодно отличает систему от традиционных CNN-классификаторов.

По сравнению с существующим решением Spaghetti Detective наша открытая модель демонстрирует значительный выигрыш и в качестве, и в производительности распознавания. Это подчёркивает огромный потенциал использования легковесных нейросетевых алгоритмов на месте для повышения безопасности и эффективности аддитивного производства. В перспективе, с развитием датчиков и более сложных

архитектур, подобные системы могут стать стандартным компонентом 3D-принтеров. Их внедрение будет способствовать снижению доли брака, предотвращению техногенных инцидентов и переходу к полностью автоматизированному, самоконтролируемому производству в духе Четвертой промышленной революции.

DEVIATION DETECTION IN 3D PRINTING USING A NEURAL NETWORK

M. M. Yusupov

Izhevsk, Russia

e-mail: *mjjn15@mail.ru*

The article considers a method for detecting deviations and defects during additive manufacturing (3D printing) using a machine vision system based on neural networks. A visual monitoring architecture is proposed, utilizing a single camera aimed at the nozzle area of the 3D printer and a deep convolutional neural network with residual connections and attention mechanisms for automatic deviation detection.

Keywords: additive manufacturing; 3D printing; quality control; computer vision; neural networks; technosphere safety; defect detection.

УДК 621.313.33:004.8:519.87

Predictive Maintenance System for an Asynchronous Motor Using Temperature-Based AI/ML Diagnostics in MATLAB

Boukhelkhal Mouloud

Institute of Civil Protection Department of Digital Engineering
Technologies Udmurt State University, Izhevsk, Russia
e-mail: *boukhelkhal.mouloud@gmail.com*

This paper presents a complete industrial-grade predictive maintenance framework for asynchronous motors using temperature monitoring and machine learning algorithms implemented in MATLAB. The method extracts thermal features and feeds them into LSTM-based models for early fault prediction.

Keywords: Predictive maintenance, asynchronous motor, machine learning, temperature monitoring, MATLAB, LSTM.

Industrial production relies heavily on asynchronous motors to drive pumps, compressors, conveyors and automated equipment, so their unexpected failure can stop entire process lines and cause major economic losses and safety risks. Traditional maintenance based on periodic inspections or fixed temperature limits often misses early degradation because it ignores thermal dynamics and historical behavior. [1]

Thanks to low-cost microcontrollers, digital temperature sensors and tools such as MATLAB, intelligent monitoring can now be implemented even on existing motors. By continuously measuring temperature and applying machine learning, abnormal heating trends can be detected in advance and maintenance can be scheduled before a critical fault occurs. This work focuses on the design and analysis of such a temperature-based predictive maintenance system for industrial asynchronous motors.

NOMENCLATURE

- T(t)** – motor surface temperature at time t
- Tamb** – ambient temperature
- ΔT – temperature rise over ambient
- τ – thermal time constant of the motor
- Ploss** – total power loss in the motor
- LSTM** – Long Short-Term Memory neural network

RF – Random Forest classifier

ML – Machine Learning

I. INTRODUCTION

Asynchronous motors are widely used in industrial operations to drive pumps, compressors, conveyors, ventilation systems, and automated machinery. Their simple design, low cost, and robustness make them ideal for continuous-duty applications, even in harsh environments. However, they remain vulnerable to electrical, mechanical, and thermal stresses that accumulate over time and can lead to serious failures if not detected early. [2]

In industry, downtime caused by motor failure is often far more costly than replacing the motor itself. A single failed pump or conveyor motor can stop entire production lines, significantly reducing output. For this reason, modern industry increasingly replaces reactive and routine preventive maintenance with predictive maintenance strategies that rely on continuous monitoring and data-driven fault prediction.

Advances in artificial intelligence and machine learning (AI/ML) have enabled a shift from simple threshold-based motor protection to fully predictive, temperature-driven diagnostics. By analyzing the shape and evolution of temperature data, ML models can detect subtle signs of degradation, identify anomalous heating patterns long before failure occurs, and accurately forecast overheating events. This turns maintenance from a reactive process into a proactive and data-driven strategy.

This work presents a complete predictive maintenance system for asynchronous motors using only temperature measurements. The system combines low-cost hardware (PT100/thermocouple with MAX31865 and Nucleo-F411RE) with MATLAB for data acquisition, preprocessing, feature engineering, and ML-based prediction. It is designed for industrial environments that require reliability, simplicity, and minimal sensor instrumentation.

The main objectives of this study are to:

- 1) develop a temperature-based monitoring architecture;
- 2) extract dynamic thermal features describing motor behavior;
- 3) apply LSTM networks to learn and predict abnormal heating;

- 4) validate the system through an industrial case study;
- 5) provide a low-cost, non-intrusive predictive maintenance solution.

Results demonstrate that temperature data alone—when properly processed and modeled—can reliably detect early motor degradation, reduce downtime, lower maintenance costs, and significantly increase operational reliability.

II. MOTOR THERMAL BEHAVIOR

The combined effects of electrical, magnetic, and mechanical losses generated during operation determine the thermal behavior of an asynchronous motor. These losses are converted into heat, causing the motor temperature to rise according to well-defined thermal dynamics. Understanding these relationships is essential for building an accurate predictive maintenance model based on temperature. [3]

A. Heat Generation in the Motor. The total power loss in an induction motor is the sum of several components:

$$P_{loss} = P_{cu} + P_{Fe} + P_{mech} + P_{stray} \quad (1)$$

Where:

- P_{cu} – copper(winding) losses
- P_{Fe} – iron(core) losses
- P_{mech} – mechanical losses
- P_{stray} – stray load losses

1.Copper Losses

Copper losses arise from current in the stator windings:

$P_{cu} = I^2 R$ As insulation ages or temperatures increase, resistance R rises, increasing heat generation.

2.Iron Losses

Iron losses consist of hysteresis and eddy-current components:

$$P_{Fe} = k_h f B^2 + k_e f^2 B^2$$

Where f = supply frequency, B = magnetic flux density. [4]

3. Mechanical Losses

Mechanical losses due to bearing friction are approximates:

$$P_{mech} \approx k_\mu \cdot \omega$$

Where ω is motor speed and k_μ is the friction coefficient.

B. Thermal Dynamics of the Motor

The motor's temperature evolution approximates a first-order thermal system:

$$C_{th} \frac{dT(t)}{dt} = P_{loss} - \frac{T(t) - T_{amb}}{R_{th}} \quad (2)$$

Where C_{th} is thermal capacitance and R_{th} is thermal resistance.

Solving yields the heating curve:

$$T(t) = T_{amb} + \Delta T_{ss}(1 - e^{-t/\tau}) \quad (3)$$

Where $\tau = R_{th}C_{th}$ is the thermal time constant.

During Cooling:

$$T(t) = T_0 \cdot e^{-t/\tau} \quad (4)$$

Changes in τ , heating slope dT/dt , or ΔT_{ss} indicate emerging faults.

Fault Indicators

- Increased $dT/dt \rightarrow$ bearing wear.
- Increased $\Delta T_{ss} \rightarrow$ overload or blocked ventilation
- Increased $\tau \rightarrow$ reduced cooling efficiency
- Oscillating temperature \rightarrow load imbalance

III. SYSTEM ARCHITECTURE

The proposed predictive maintenance system is built around a compact, low-cost hardware–software architecture designed to acquire high-quality temperature data, process it efficiently, and apply machine learning algorithms for real-time diagnostic evaluation. The overall design emphasizes simplicity, reliability, and industrial practicality, ensuring that

the system can operate continuously in demanding environments while requiring minimal instrumentation.

At the sensing layer, a PT100 platinum resistance temperature detector (RTD) or a type-K thermocouple is mounted on the outer stator frame, ideally near the drive-end bearing—one of the most thermally sensitive areas of an asynchronous motor. The PT100 sensor provides excellent accuracy, long-term stability, and robustness against industrial noise, making it suitable for continuous condition monitoring. The sensor output is interfaced with a MAX31865 RTD-to-digital converter, which performs resistance excitation, linearization, cold-junction compensation (if thermocouples are used), and high-resolution analog-to-digital conversion. This ensures that temperature readings are precise, noise-filtered, and consistent across varying ambient conditions.[5]

The digital temperature data is then transmitted to an STMicroelectronics Nucleo-F411RE microcontroller board via an SPI (Serial Peripheral Interface) link. The Nucleo board is responsible for periodic sampling, timestamping, and buffering of temperature data. Its ARM Cortex-M4 processor provides more than sufficient computational capacity for real-time acquisition, and its built-in UART-to-USB interface allows seamless transfer of data to a host computer without requiring additional communication hardware. Sampling frequencies between 0.5–2 Hz are typically used, as they adequately capture the motor's thermal dynamics without generating unnecessary data volume.

Once transmitted to the host system, MATLAB handles all downstream processing. Using MATLAB's Serial Communication Toolbox, temperature samples are logged as a continuous time series and stored in structured arrays for later analysis. The MATLAB environment forms the analytical core of the architecture, performing tasks such as data preprocessing, feature extraction, window-based segmentation, machine learning model training, and real-time classification or prediction. MATLAB's Deep Learning Toolbox enables the construction and training of LSTM-based neural networks, while its Statistics and Machine Learning Toolbox supports Random Forest, SVM, and logistic regression models.

The complete architecture can be summarized as a sequential data flow:

Temperature Sensor (PT100 / Thermocouple)

→ MAX31865 Signal Conditioning & ADC

→ Nucleo-F411RE Microcontroller (SPI + UART/USB)

→ MATLAB Data Acquisition → Signal Preprocessing & Feature Extraction

→ Machine Learning Model (LSTM / RF / SVM)

→ Real-Time Fault Prediction / Warning Output

This modular architecture ensures scalability and ease of integration. Additional sensors—such as vibration, current, or voltage probes—can be added to the microcontroller and processed alongside temperature without redesigning the entire system. The use of MATLAB also allows the trained models to be exported to embedded C code if deployment on the microcontroller is required in the future.

IV. DATA PROCESSING AND FEATURES

The accuracy and reliability of predictive maintenance models depend heavily on the quality of the acquired temperature data and the extraction of meaningful diagnostic features. Because asynchronous motor temperature evolves slowly and can be affected by noise, sensor imperfections, and environmental fluctuations, careful preprocessing is required before any machine learning (ML) algorithms can be applied. MATLAB serves as the main platform for signal conditioning, mathematical transformation, and feature computation.[6]

Raw temperature data obtained from the PT100 sensor through the MAX31865 interface and microcontroller often contains quantization noise, occasional spikes, and non-uniform sampling intervals. To ensure consistent and meaningful analysis, several preprocessing steps are applied.

MATLAB applies filtering operations to remove high-frequency fluctuations and sensor noise. A common approach is the moving average filter:

$$\tilde{T}(n) = \frac{1}{M} \sum_{k=0}^{M-1} T(n-k) \quad (5)$$

Where:

- $T(n)$ – raw temperature sample
- $\tilde{T}(n)$ – filtered temperature
- M – window size

V. ML THEORY & LSTM MODEL

Machine Learning (ML) methods enable predictive maintenance systems to recognize subtle patterns in temperature evolution and forecast abnormal motor behavior well before conventional threshold-based systems detect any anomaly. Among all ML architectures, **Long Short-Term Memory (LSTM)** neural networks are especially suitable because temperature behavior in asynchronous motors follows slow, time-dependent thermal processes influenced by load, losses, and environmental conditions.

Temperature signals collected from industrial motors are naturally sequential and exhibit temporal dependencies. Therefore, the task of identifying early-stage degradation can be modeled as a **sequence classification** or **sequence-to-value forecasting** problem.

Given a sliding window of temperature observations:

$$X = \{T(t_1), T(t_2), \dots, T(t_n)\} \quad (6)$$

LSTM networks are trained using MATLAB's Deep Learning Toolbox, which implements the **Adam optimizer**, an adaptive gradient descent algorithm.

Parameter updates:

$$\theta_{t+1} = \theta_t - \alpha \frac{\hat{m}_t}{\sqrt{\hat{v}_t} + \epsilon} \quad (7)$$

Where:

- \hat{m}_t – bias-corrected first-moment estimate of gradients
- \hat{v}_t – bias-corrected second-moment estimate
- α – learning rate

Advantages of Adam:

- fast convergence
- robustness to noisy gradients
- works well with long time-series

VI. HYBRID MODEL

While LSTM networks effectively capture long-term thermal patterns, relying on a single model can reduce interpretability and may increase sensitivity to noise in certain operating conditions. To improve reliability and robustness, a hybrid diagnostic architecture combining **LSTM sequence modeling with a Random Forest (RF) feature-based classifier** is employed.[7]

In this structure, the LSTM processes the raw temperature sequence to learn temporal dependencies and predict early abnormal heating behavior. At the same time, the Random Forest model evaluates the engineered thermal features—such as heating rate, acceleration, steady-state rise, thermal time constant, and statistical descriptors—to classify the motor’s operating state from a more interpretable, feature-driven perspective.

The decision logic is intentionally simple:

- If both LSTM and RF detect abnormal behavior → a **fault warning** is issued.
- If only one model signals risk → the system increases monitoring frequency and re-evaluates on the next window.
- If both models agree on normal behavior → operation continues without intervention

This hybrid approach reduces false alarms, improves early detection accuracy, and provides complementary insights into motor condition, combining the temporal intelligence of LSTM with the explainability of Random Forest classification.

VII. CASE STUDY & CONCLUSION

A case study was conducted on a 4 kW industrial asynchronous motor driving a centrifugal pump. Under normal operating conditions, the motor exhibited a stable temperature profile with a predictable heating curve and consistent steady-state temperature. As the test progressed, bearing wear was intentionally induced by increasing mechanical friction. This resulted in a noticeable rise in heating rate $dT/dtdT/dtdT/dt$, elevated steady-state temperature, and a longer cooling time constant—early indicators of mechanical degradation.[8]

The temperature data collected during the experiment was processed through the proposed hybrid LSTM–Random Forest diagnostic model. The LSTM successfully detected abnormal heating tendencies approximately 10 minutes before the temperature reached alarm thresholds, while the Random Forest classifier independently identified deviations in engineered features such as thermal rise and variance. The combined decision logic confirmed the presence of an evolving fault and generated an early maintenance alert.

These results demonstrate that temperature alone, when analyzed through advanced machine learning techniques, is sufficient to detect early-stage degradation in industrial asynchronous motors. The system provides a low-cost, non-intrusive alternative to more complex vibration or current-based monitoring solutions and can be easily integrated into existing industrial infrastructures. By enabling early intervention, the proposed method helps reduce unplanned downtime, extend motor lifetime, and improve overall operational reliability.

Список источников

1. C. Bishop, *Pattern Recognition and Machine Learning*. New York, NY, USA: Springer, 2006.
2. D. Hanselman and B. Littlefield, *Mastering MATLAB*. Upper Saddle River, NJ, USA: Pearson, 2017.
3. A. H. Baradaran, “Predictive maintenance of electric motors using supervised learning models: A comparative analysis,” *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, vol. XX, no. X, pp. XX–XX, 20XX.
4. M. A. Elgendy, M. E. El-Hameed, and M. A. El-Sayed, “Temperature monitoring and thermal modelling of induction motors for predictive maintenance applications,” *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. XX, no. X, pp. XX–XX, 20XX.
5. S. Nandi, H. A. Toliyat, and X. Li, “Condition monitoring and fault diagnosis of electrical motors—A review,” *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 20, no. 4, pp. 719–729, 2005.
6. P. Vas, *Parameter Estimation, Condition Monitoring, and Diagnosis of Electrical Machines*. Oxford, U.K.: Clarendon Press, 1993.

Раздел II

7. MathWorks, Deep Learning Toolbox User's Guide. Natick, MA, USA: The MathWorks Inc., 2024.
8. IEEE Standard 841-2021, IEEE Standard for Petroleum and Chemical Industry—Severe Duty Totally Enclosed Fan-Cooled (TEFC) Squirrel Cage Induction Motors—Up to and Including 370 kW (500 hp), IEEE, 2021.

УДК 681.518.5

Опыт применения технологий умного дома в МКД старой застройки

П.Г. Огородников

Удмуртский Государственный Университет, г. Ижевск, Россия

e-mail: pavel@udsu.ru

В статье приводится опыт организации системы “умный дом” в многоквартирном жилом пятиэтажном здании старой застройки. При этом используются возможности беспроводных сенсорных сетей, работающих на недорогих устройствах по протоколу Zigbee, и программное обеспечение с открытым исходным кодом для домашней автоматизации Home Assistant, установленное на локальном сервере. Рассматриваются отдельные кейсы для безопасности и комфортного проживания в МКД, а также для контроля качества услуг по содержанию общедомового имущества и коммунальных услуг.

Ключевые слова: умный дом, беспроводная сенсорная сеть, жилищно-коммунальное хозяйство, погодное регулирование, жилой многоквартирный дом, Zigbee, Home Assistant.

Введение

Можно ли сделать из старой пятиэтажки “умный дом”, который станет помощником в обеспечении комфорта и безопасности проживания, а также позволит контролировать потребление коммунальных ресурсов и экономить на платежах за ЖКУ? Сегодня технологии уже достигли такого уровня, при котором можно достаточно дешево и просто развернуть **систему беспроводных устройств и датчиков, объединенных в самоорганизующуюся сеть**. Эта система монтируется без нарушения целостности строительных конструкций здания и отделки, без переустройства инженерных сетей и не требует прокладки дополнительных кабелей. При этом она хорошо масштабируется и способна предоставить широкий набор сервисов, начиная от мониторинга для принятия обоснованных решения при управлении многоквартирным домом и осуществлении технического регулирования внутридомового

оборудования, до запуска автоматизаций и оповещения при аварийных ситуациях.

Беспроводная сенсорная сеть

Состав системы:

- 1) Локальный сервер умного дома, который выполняет функции координатора;
- 2) Роутеры, расширяющие сеть и обеспечивающие ее присутствие по всему зданию;
- 3) Конечные устройства (датчики) и реле.

Такая система в 2023/24 годы была реализована в нашем доме – четырехподъездной пятиэтажке в центре города Ижевска, и сегодня успешно работает и продолжает развиваться.

Для справки:

Наш дом 1931 года постройки, стены кирпичные, крыша скатная, имеется тепловой узел с бойлером ГВС (трубковая разводка). Общая площадь дома около 2900 кв.м. Нижние этажи с 90-х годов реконструировали под коммерцию, сейчас в доме осталось менее 30 жилых квартир. Дом находится под управлением управляющей организации, я являюсь председателем совета дома с 2021 года.

Как реализовано

В качестве сервера используется промышленный безвентиляторный компьютер на базе процессора Intel Celeron J1900, ОЗУ 8 ГБ, диск 128 ГБ. В качестве программного обеспечения установлена платформа для домашней автоматизации с открытым исходным кодом **Home Assistant** [1]. Платформа установлена как операционная система (*HAOS*), она включает ядро, функцию *Supervisor* для управления ядром и настройки сценариев автоматизации, набор необходимых плагинов для интеграции устройств (датчиков) и обращения к сервисам, например, прогнозу погоды.

Одного координатора недостаточно для покрытия сетью всего здания и для ее расширения требуется установка дополнительных устройств – роутеров. Для пятиэтажного дома оказалось вполне достаточно установки по два (на площадках 2-го и 4-го этажей). В

качестве таких устройств использованы всё те же стики SONOFF Dongle Plus-E с установленной микропрограммой, обеспечивающей их работу в режиме маршрутизатора. Каждый роутер, во-первых, расширяет радиус сети, а во-вторых, увеличивает способность подключать большее количество устройств.

В итоге получена сеть, которая работает по радиоканалу, обеспечивает покрытие по всему зданию, имеет ячеистую топологию и умеет самовосстанавливаться. Выход в Интернет такой системе в принципе не нужен, но может пригодиться, например, для рассылки уведомлений в мессенджер (например, Телеграм) или для интеграции с облачными сервисами, в частности, со службами прогноза погоды.

В настоящее время сеть связывает около 80 устройств, среди которых помимо координатора и роутеров имеются:

- 1) Бытовые датчики температуры и влажности с дисплеем – размещены в жилых помещениях, позволяют контролировать качество коммунальной услуги по отоплению.
- 2) Электронные термометры с выносным сенсором – установлены на инженерных сетях для контроля параметров теплоносителя и температуры горячей воды.
- 3) Датчики давления – установлены на инженерных сетях, позволяют контролировать гидравлические параметры систем водоснабжения и отопления.
- 4) Реле с энергомониторингом – позволяют управлять электроприборами и контролировать их энергопотребление.
- 5) Датчики задымления с автономной сиреной – позволяют вовремя обнаружить задымление и предупредить людей об опасной ситуации.
- 6) Датчики протечки – позволяют вовремя обнаружить протечку, помогают локализовать аварии на инженерных сетях и внутриквартирном оборудовании.
- 7) Датчики влажности почвы – позволяют контролировать влажность грунта в подвале, а также следить за газонами и декоративными растениями на придомовой территории.

- 8) Датчики открытия дверей – установлены на дверях в технические помещения: чердаки, подвалы, ИТП. Позволяют контролировать работу обслуживающего персонала.

Устройства, работающие по протоколу *Zigbee*, отличаются низким энергопотреблением. Датчики могут работать десятки месяцев, без замены элементов питания.

Основные кейсы

Пожарная сигнализация

Пожары в многоквартирных жилых домах старой застройки с деревянными перекрытиями обладают повышенным риском распространения огня на большие площади. Распространение пламени из одной квартиры в другую происходит крайне быстро, поэтому такие пожары, как правило, наносят наибольший ущерб. Важным условием для предотвращения пожара и предупреждения стремительного распространения огня является своевременное обнаружение признаков возгорания на самой ранней стадии.

Для этих целей рекомендуется оборудование помещений в квартирах точечными дымовыми пожарными датчиками с автономным питанием и извещателем.

Такие датчики могут быть добавлены в существующую сенсорную сеть и подключены к системе автоматизации *Home Assistant*. При обнаружении дыма в помещении сработает сирена извещателя, а в систему автоматизации поступит сигнал тревоги, с которым можно связать автоматизацию для отправки сообщения в домовую чат с помощью Телеграм-бота.

Для реализации пожарной сигнализации были приобретены и установлены в квартирах устройства *Tuya Zigbee Smoke Detector*. Это точечный датчик дыма, работающий от двух элементов питания ААА, поддерживающий беспроводное соединение по протоколу *Zigbee*, а также имеющий собственный автономный извещатель громкостью 85дБ и световую сигнализацию. Устройство имеет кнопку самопроверки и передает уведомление о низком заряде батареи. Датчик устанавливается на потолке или стене. С помощью саморезов или на двусторонний скотч 3М крепится монтажная пластина, в которую защелкивается сам прибор. При снятии прибора с монтажной пластины

в систему автоматизации поступает соответствующее сообщение, указывающее, что датчик снят с места установки.

Датчики интегрируются в *Home Assistant* с помощью интеграции *ZHA*. В карточке устройства отображаются следующие сенсоры:

- 1) Бинарный сенсор обнаружения дыма
- 2) Бинарный сенсор, указывающий что датчик закреплен на монтажной пластине
- 3) Уровень заряда батареи

С датчиками связана автоматизация, создающая сообщение для телеграм-бота при обнаружении дыма с указанием номера квартиры, в которой установлен сработавший датчик. Сообщения отправляются в домовый чат.

Контроль отопления

Правила оказания коммунальных услуг предъявляют высокие требования к отоплению в жилых помещениях многоквартирных домов. В частности, для Ижевска с 2025 года в отопительный период в жилых помещениях должна быть обеспечена нормативная температура не ниже $+18^{\circ}\text{C}$ (в угловых комнатах – $+20^{\circ}\text{C}$), допустимое превышение нормативной температуры – не более 4°C , допустимое снижение нормативной температуры в ночное время суток (от 0.00 до 5.00 часов) – не более 3°C , снижение температуры воздуха в жилом помещении в дневное время (от 5.00 до 0.00 часов) не допускается [3].

Наш дом отапливается от централизованной системы теплоснабжения по зависимой схеме с применением температурного графика 150/70 (точка излома температурного графика при спрямлении для ГВС 70°C применяется при температуре наружного воздуха -2°C . Точка срезки температурного графика 120°C применяется при температуре наружного воздуха -25°C) [4] и имеет свой элеваторный узел. Регулировка путем настройки ручного балансировочного вентиля, установленного на трубе обратной воды, при этом необходимо соблюдать тепловые и гидравлические режимы [5].

Для контроля параметров температуры теплоносителя на трубах подачи (до и после элеватора) и обратной воды в термокарманы были установлены электронные термометры *SONOFF SNZB-02LD* и

EFEKTA T1 v2 с зондом. Датчики оснащены сенсором *DS18B20*, который имеет рабочий диапазон $-55^{\circ}\text{C}\sim 125^{\circ}\text{C}$ с точностью 0.5%.

Для контроля располагаемого напора в системе отопления (что критически важно для правильной работы элеватора) были установлены два датчика давления *EFEKTA PST V1* – на подающем трубопроводе и на обратном. Датчики оснащены сенсорами *KY-I2C-3V3*, рабочий температурный диапазон которых составляет $-20^{\circ}\text{C}\sim 110^{\circ}\text{C}$, а измеряемое давление до 10 Bar. Подключение датчиков сделано через трубку Перкинса (сифонную трубку), которая защищает сенсор, охлаждая и стабилизируя теплоноситель.



Рисунок 1 — Термометр *SONOFF SNZB-02LD* в термостакане и датчик давления *EFEKTA PST V1* (подключен параллельно с манометром, через сифонную трубку) на подающем трубопроводе системы отопления

Термометр *SONOFF SNZB-02LD* в термостакане и датчик давления *EFEKTA PST V1* (подключен параллельно с манометром, через сифонную трубку) на подающем трубопроводе системы отопления

Для получения данные о температуре наружного воздуха были установлены две погодные станции, в основе которых использованы датчики *SONOFF SNZB-02P*, закрытые экраном Стивенсона. Кроме того, для более точного и надежного определения температуры наружного воздуха в *Home Assistant* были интегрированы облачные сервисы прогноза и мониторинга погоды от нескольких провайдеров: *GISMeteo*, *Яндекс.Погода* и *Народный мониторинг* (*narodmon.ru*). За температуру принимается медианная величина всех полученных значений.

Данные с датчиков обрабатываются средствами *Home Assistant* и выводятся на информационную панель

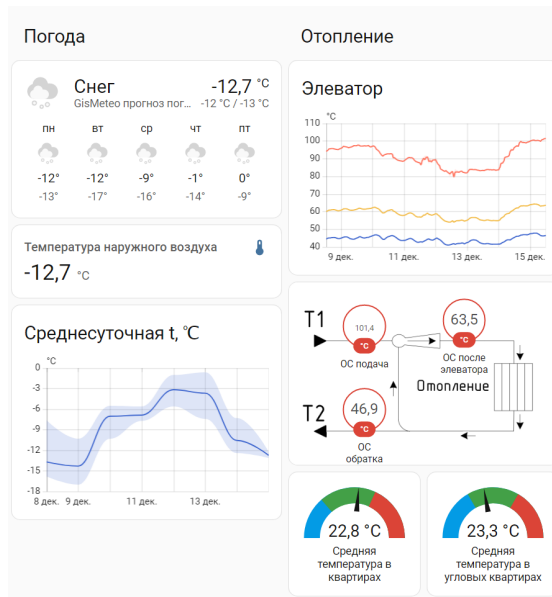


Рисунок 2 — Информационная панель в *Home Assistant* для контроля отопления

Бот для оповещения о перебоях подачи горячей воды

В многоквартирных домах с тупиковой системой ГВС актуальной задачей является своевременное оповещение потребителей о перерывах предоставления услуги горячего водоснабжения, т.к. при отсутствии в доме циркуляционного трубопровода потребитель вынужден проливать воду с остывшей внутридомовой трассы до точки водоразбора самостоятельно. И если услуга горячего водоснабжения в данный момент не предоставляется, а потребитель об этом не знает, то он может достаточно долго понапрасну лить воду в ожидании повышения ее температуры.

Для решения этой задачи был создан телеграм-бот, отправляющий сообщения в домовую чат. На бойлере ГВС в тепловом пункте установлен датчик *EFEKTA T1 v2* с зондом, измеряющий температуру теплоносителя, поступающего в теплообменник. С датчиком связана автоматизация, создающая сообщение для бота при падении температуры ниже критической отметки:

```
- id: Отсутствие_теплоносителя_homegroup_телеграм
alias: coolant_not_available_homegroup_telegram
trigger:
- platform: numeric_state
entity_id: sensor.filtered_elevator_t1_temperature
below: 41 //температура упала ниже 41°C более чем на 5 минут
for:
hours: 0
minutes: 5
seconds: 0
condition: []
action:
- service: notify.HOMEGROUP //сообщение в домовую чат
data:
message: Похоже, что в дом не поступает теплоноситель с ЦТП,
т.к. наблюдается снижение температуры воды ниже{{states
('sensor.gvs_temperature')}} °C. Вы тоже заметили, что
из кранатечет только холодная? Тогда обратитесь в <a href=
"https://tss.tplusgroup.ru/">тепловую справочную службу</a>
ПАО «Т Плюс» чтобы узнать причину и сроки перерыва
в теплоснабжении
```

В сообщении указана веб-ссылка на сервис ресурсоснабжающей организации, с помощью которого можно узнать график отключения горячей воды/тепла и узнать о проводящихся ремонтных работах, из-за которых приостановлено оказание услуг теплоснабжения по адресу клиента. При авариях на теплотрассах обычно указываются предельные сроки ремонта. Но чтобы проверить появился ли теплоноситель в системе ГВС, потребитель должен открыть свой кран в точке водоразбора и пропустить достаточное количество воды. Поэтому важно сообщить потребителю достоверную информацию о возобновлении подачи горячей воды.

Для этого при возобновлении подачи теплоносителя срабатывает автоматизация, создающая сообщение для бота при повышении температуры теплоносителя, поступающего в теплообменник до достаточных значений:

```
- id: Подача_теплоносителя_homegroup_телеграм
alias: coolant_available_homegroup_telegram
trigger:
- platform: numeric_state
entity_id: sensor.filtered_elevator_t1_temperature
above: 49 //температура поднялась выше чем 49°C
action:
- service: notify.HOMEGROUP //сообщение в домовый чат
data:
message: Похоже, что возобновлена подача теплоносителя,
наблюдается повышение температуры воды выше {{
states('sensor.gvs_temperature')}} °C
```

Таким образом жильцы, подписанные на домоф чат, получают информацию о ситуации с горячей водой в доме гораздо быстрее, чем до них доходят обычные сообщения аварийно-диспетчерских служб.

Контроль доступа в технические помещения

Правила технической эксплуатации жилого фонда предписывают, что входные двери в технические помещения, чердаки и подвалы многоквартирных домов должны быть закрыты на замок. Вход в такие помещения разрешен работникам обслуживающих организаций для выполнения работ по содержанию и ремонту размещенного там оборудования. Собственники помещений в многоквартирном доме

Раздел II

тоже заинтересованы, чтобы в технические помещения не проникали посторонние лица.

Для контроля были установлены датчики сигнализации при открывании дверей чердаков и теплового пункта. С датчиками связана автоматизация, отправляющая личные сообщения в *Telegram* председателю совета дома.



Рисунок 3 — Датчик открытия двери, установленный в помещении ИТП.

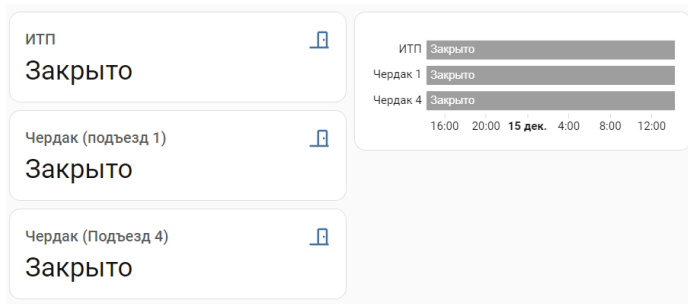


Рисунок 4 — Информационная панель в Home Assistant для контроля доступа в технические помещения

Автоматизация работы греющих кабелей

В нашем доме инженерные сети водоснабжения и отопления имеют верхнюю разводку, часть трасс проложена на чердаке здания. При этом чердак не отапливается, а трубы защищены слоем теплоизоляции. Для предотвращения промерзания трасс в сильные морозы или при отсутствии теплоносителя, трубы дополнительно защищены электрическими саморегулирующимися греющими кабелями. Для экономии потребления электроэнергии работа греющих кабелей была автоматизирована. Для этого в схему питания кабелей непосредственно после входных защитных автоматов добавлены реле, подключенные к беспроводной сенсорной сети в качестве воздействующих устройств.

В систему автоматизации *Home Assistant* добавлен сценарий, включающий греющие кабели при установлении температуры наружного воздуха ниже -15°C , и отключающий их при повышении температуры наружного воздуха выше -7°C . Пороговые значения температур были подобраны эмпирически, с учетом ретроспективного анализа данных об авариях на инженерных сетях, связанных с промерзанием трасс в доме за прошлые годы.

На информационную панель в *Home Assistant* выводится виджет, показывающий включены или выключены греющие кабели в настоящий момент. Каждое реле имеет функции энергомониторинга, показывая потребляемую мощность, напряжение в электросети, потребляемый ток и суммарное потребление электроэнергии за весь период работы устройства.

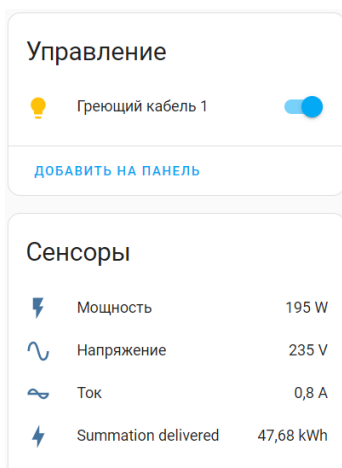


Рисунок 5 — Пример карточки устройства реле с энергомониторингом

Таким образом, можно посчитать стоимость электроэнергии, затраченной на работу греющих кабелей в доме за весь сезон. В дальнейшем эти данные, во-первых, помогают контролировать расходы КР на СОИ, а во-вторых, могут быть использованы при разработке плана мероприятий по повышению энергоэффективности и энергосбережению.

Контроль протечки воды

Аварии на внутридомовых и квартирных инженерных сетях водоснабжения влекут за собой ущерб, причиняемый протечками и затоплениями. Опыт подсказывает, что чаще всего протечки осуществляются в квартирах в местах непосредственной близости от точек водоразбора. Протечки могут возникнуть как из-за невнимательности и забывчивости жильцов квартир, оставляющих открытые краны без присмотра, так и из-за поломок сантехники и вспомогательных элементов (гибкие подводки, шланги, фитинги), которые не всегда правильно и вовремя обслуживаются. Все эти устройства находятся в зоне ответственности собственников помещений и жильцов квартир, поэтому они в первую очередь заинтересованы в снижении риска. При этом для минимизации ущерба важной

задачей является своевременное обнаружение протечек. Это решается использованием систем защиты, состоящих из датчиков протечки и воздействующих устройств, блокирующих подачу воды до устранения аварии.

Поскольку у нас в доме уже имеется развернутая сенсорная *Zigbee*-сеть и система автоматизации *Home Assistant*, то становится возможно без существенных затрат организовать контроль помещений в доме, в том числе и в квартирах, добавив в сенсорную сеть датчики, реагирующие на влагу, и настроив автоматизацию с оповещением об обнаружении протечки. Оповещение можно настроить путем отправки с помощью бота личных сообщений в Телеграм или в домовый чат. Получив сообщение об обнаружении протечки в какой-либо из квартир, жильцы или персонал обслуживающей компании могут принять меры для локализации аварии путем перекрытия подачи воды отсекающими вентилями на стояках или отводах от стояков. Также такие датчики могут быть с автономной звуковой сигнализацией, которая сработает быстрее, чем придет оповещение через телеграм-бот, но сами датчики стоят существенно дороже. К тому же если в квартире никого нет, то автономная сигнализация окажется бесполезной.

Установка воздействующих устройств, блокирующих подачу воды, возможна, но будет являться вмешательством в систему водоснабжения, что требует согласований и более значительных затрат для реализации. Кроме того, могут возникнуть сложности и дополнительные затраты, связанные с обслуживанием таких устройств.

Контроль влажности почвы

У многих многоквартирных домов имеется придомовая территория с элементами озеленения (в том числе газонами, цветниками, деревьями и кустарниками) и объектами благоустройства. В нашем дворе, например, в теплое время года принято устанавливать уличные вазоны с высаженными в них декоративными растениями. Кроме того, в подъездах на подоконники выставляются горшки с цветами. Уход за растениями жители осуществляют самостоятельно или нанимают через управляющую компанию садовника. Причем такая работа должна производиться либо регулярно с оговоренной периодичностью, либо по мере необходимости.

Важным условием ухода за газонами и растениями является своевременный полив. Для контроля влажности почвы в сенсорную сеть должны быть добавлены датчики влажности почвы.

В нашем случае были использованы следующие устройства:

- 1) **Датчик влажности почвы Flower_V2**, разработанный в лаборатории *Modcam* на базе модуля E18-MS1-PCB с чипом cc2530. Сенсор датчика использует емкостной метод измерения влажности почвы, электроды сенсора изолированы от почвы и благодаря этому не подвержены коррозии. Также в устройстве имеется возможность распайки сенсора освещенности (3528-PTSM D3528) и датчика температуры (DS18B20). В датчиках была использована улучшенная прошивка *Egony_Flower.hex*, разработанная в лаборатории *EfektaLab*. Датчики показали долгую и стабильную работу даже при использовании питания от батарейки CR2032. Но слабая мощность чипа и отсутствие усилителя сигнала не позволяли разместить датчик дальше 10-15 метров от роутера. Кроме того, возникли сложности с изготовлением корпуса датчика, способного защитить электронику от воздействия внешней среды. Поэтому датчики не могли быть использованы на газонах, но при этом использовались в цветочных горшках и подвесных вазонах, защищенных от дождя под навесом. **Еще такие датчики хорошо подходят для установки в грунт в подвале дома для контроля протечек на инженерных сетях и предотвращения затопления подвальных помещений, в частности стоками при авариях на сетях водоотведения.**
- 2) **Уличный датчик температуры и влажности почвы Zigbee TuYa QT-07S**. Датчик выполнен во влагозащищенном корпусе IP67 и использует усилитель сигнала, позволяющий установить стабильное соединение на расстоянии до 50 метров от роутера. Сенсор измеряет влажность почвы резистивным методом, а для предотвращения коррозии зонд изготовлен из нержавеющей стали. Питание датчика осуществляется от двух элементов АА. Датчики размещены в неприметных местах на газонах во дворе дома, от посторонних глаз датчик был закрыт колпаком в виде небольшого пенька, распечатанным на 3D-принтере из черного PET-G пластика.

Данные о влажности почвы выводятся на информационную панель в Home Assistant. Сопоставив их с данными о прогнозе погоды можно сделать обоснованный вывод о необходимости полива газонов, а также вазонов или цветов в горшках. Тем самым обеспечивается и своевременный уход за растениями, и бережливое отношение к коммунальным ресурсам ХВС.

В дальнейшем, при наличии смонтированной системы для полива газонов, можно реализовать автоматический полив, связав датчики с воздействующими устройствами, открывающими и закрывающими подачу воды в систему полива. При этом такая автоматизация может учитывать следующие факторы:

- 1) влажность почвы
- 2) прогноз погоды
- 3) время суток
- 4) наличие людей и животных в зоне работы распылителей воды.

Список источников

1. Home Assistant [Электронный ресурс] – URL: <https://www.home-assistant.io/> – Загл. с экрана
2. Zigbee [Электронный ресурс]: Википедия. Свободная энциклопедия. – URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Zigbee>
3. Приложения N 1 к Правилам предоставления коммунальных услуг собственникам и пользователям помещений в многоквартирных домах и жилых домов, утвержденных ПП РФ от 05.06.2011 №354, ч.15.
4. Схема теплоснабжения города Ижевска на период до 2032 г. [Электронный ресурс] Актуализированная версия. Стр.117. – URL: https://www.izh.ru/res_ru/0_hfile_60214_1.pdf
5. Федеральный закон от 23 ноября 2009 г. N 261-ФЗ "Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации ст.12, ч.8.

IMPLEMENTING SMART HOME TECHNOLOGY IN AN OLDER APARTMENT BUILDING

Pavel G. Ogorodnikov

Udmurt State University, 426034 Russia, Izhevsk, Universitetskaya, 1
e-mail: *pavel@udsu.ru*

This article describes the implementation of a smart home system in an existing five-story apartment building. The system utilizes wireless sensor networks based on affordable Zigbee-enabled devices and Home Assistant, an open-source home automation platform installed on a local server. Several use cases are examined for enhancing safety and comfort in multi-unit residential buildings, as well as monitoring the quality of building maintenance and utility services.

Keywords: smart home system, wireless sensor network, housing and communal services, climate control system, Zigbee, Home Assistant.

УДК 614.8

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПОДХОДА К ОЦЕНКЕ ПОТЕНЦИАЛЬНОГО РИСКА АВАРИЙ С ВЫБРОСОМ СЖИЖЕННОГО УГЛЕВОДОРОДНОГО ГАЗА

Т.С. Житникова, А.П. Бызов, Е.Ю. Колесников

Санкт-Петербургский Политехнический университет Петра Великого,
г. Санкт-Петербург, Россия

e-mail: *zhitnikova_ts@spbstu.ru, byzov_ap@spbstu.ru,*
kolesn_eyu@spbstu.ru

В статье рассмотрен подход к оценке потенциального риска аварий с выбросом сжиженного углеводородного газа (СУГ) и последующим образованием и дрейфом облака топливно-воздушной смеси (ТВС). Показано, что действующая нормативная методика оценки вероятности воспламенения такого облака не чувствительна к изменению временного шага и описывает процесс как стационарный. Предложено рассматривать вероятность воспламенения облака на каждом временном шаге как несовместное событие, реализующееся при отсутствии воспламенения ранее. Такой подход позволит учесть временную последовательность и повысить точность оценки риска.

Ключевые слова: сжиженный углеводородный газ, авария, топливовоздушная смесь, вероятность воспламенения; моделирование аварий; временной шаг; динамическая модель; оценка потенциального риска, промышленная безопасность; пожарная безопасность

Введение

В последние десятилетия оценка потенциального риска аварий с выбросом и распространением СУГ стала одним из важнейших направлений обеспечения пожарной и промышленной безопасности на опасных производственных объектах энергетики, химии и транспорта. В России и за рубежом неоднократно происходили крупномасштабные аварии, сопровождающиеся выбросом СУГ с последующим дрейфом в атмосфере и взрывом облаков ТВС. Риск-ориентированный подход требует совершенствования методов прогнозирования последствий подобных аварий на основе моделирования всей последовательности

аварийного процесса. Сложнейшей задачей является дальнейшее развитие физико-математических моделей распространения в атмосфере облаков тяжелых паровоздушных смесей СУГ и их воспламенения [1-2].

Актуальность

На ранних этапах моделирования дрейфа в атмосфере облаков тяжелых газов преимущественно использовались стационарные гауссовы модели, обеспечивавшие достаточно простую аппроксимацию полей приземных концентраций газа с учётом термических условий в атмосфере. Однако результаты проведённых отечественными и зарубежными авторами исследований показали низкую применимость подобных моделей в условиях сложной топографии и нестационарности процессов выброса [1-3].

Современное состояние моделирования заключается в построении многоуровневых вероятностных моделей, использовании интервальных и байесовских подходов, позволяющих учитываться не только разнообразие сценариев аварии, но и ключевые неопределённости исходных данных.

Современная количественная оценка риска аварии требует интеграции инженерных расчётов с численным моделированием аварийных сценариев. Достоверность расчётов определяется степенью валидации расчетных моделей. Особая сложность исследований в данной сфере определяется невозможностью проведения полевых экспериментов и сравнительных испытаний ввиду их опасности и дороговизны. С учетом данного обстоятельства весьма перспективным направлением является внедрение CFD (computational fluid dynamics) платформ, способных достаточно достоверно описывать нестационарное распространение (адвекцию и турбулентную диффузию) облака в атмосфере в условиях сложного рельефа местности.

Российская нормативно-методическая база в области пожарной и промышленной безопасности последовательно интегрирует результаты исследований отечественных ученых и лучшие зарубежные практики. Анализ показывает, что, несмотря на многолетние усилия научных коллективов всего мира, в данной области остаётся множество спорных и недостаточно исследованных вопросов [1-5].

Результаты

В настоящее время согласно Методике расчета потенциального пожарного риска применяется статичный подход [6], не учитывающий возможность перемещения опасного вещества за пределы территории, на которой произошел его выброс. Между тем ГОСТ Р 12.1.047-2012 (Приложение Г) возможность дрейфа облака СУГ допускает [7].

Руководства по оценке риска аварий Ростехнадзора «Методические основы анализа опасностей и оценки риска аварий на опасных производственных объектах» и методика "ТОКСИ" предполагают возможность распространения облаков ТВС в атмосфере [6-8].

Для расчета вероятности воспламенения облака ТВС будет использоваться методика, утвержденная приказом РТН N 410 от 28.11.2022 года [9] по формуле (1)

$$P_n = 1 - Q(\tau) \quad (1)$$

где $Q(\tau)$ - вероятность невоспламенения облака ТВС, которая находится из соотношения (2)

$$\ln Q(\tau) = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J F_{ih} \mu_j [(1 - \alpha_j p_j) e^{-\lambda_j p_j d_{ih}} - 1] \quad (2)$$

где i – номер элементарной площадки;

j – номер источника воспламенения, который находится на элементарной площадке;

F_{ih} – площадь i -ой элементарной площадки, га;

μ_j – плотность распределения источников воспламенения, шт/га;

α_j – доля времени активности j -го источника воспламенения;

λ_j – частота активации j -го источника зажигания, 1/мин;

p_j – физический потенциал зажигания j -го источника воспламенения;

d_{ih} – время контакта источника с парогазовым облаком, мин (согласно методике рекомендуется принимать равным 60 мин.).

Так как облако ТВС находится в движении, время, в течение которого оно находится в контакте с источником зажигания, зависит от скорости его перемещения и расстояния внутри элементарной

площадки, таким образом параметр d_{ih} будет находиться по формуле (3):

$$d_{ih} = \frac{l}{v}, \text{ мин.} \quad (3)$$

где l – расстояние, пройденное облаком в пределах элементарной площадки, м

v – скорость движения облака ТВС, м/с

Для реализации учета движения облака ТВС принимается, что облако воспламенится на текущем шаге при условии, что оно не воспламенилось на предыдущем шаге. Таким образом, начальная формула видоизменится:

$$P_{\text{ВОН}}(\alpha_n, L_n) = P_{n+1}(\alpha_{n+1}, L_{n+1}) * ((1 - P_1(\alpha_1, L_1)) \dots (1 - P_n(\alpha_{n-1}, L_{n-1}))) \quad (4)$$

где $P_{1\dots n+1}$ – вероятность воспламенения облака в точке на шаге n .

Для верификации модели были проведены расчеты вероятности воспламенения облака топливно-воздушной смеси при различных значениях шага Δt (0,1 с; 0,5 с; 1 с). Расчёты выполнялись по формуле (3) с использованием исходных параметров, принятых в соответствии с методикой, утверждённой приказом Ростехнадзора № 410 от 28.11.2022 г [9].

В таблице 1 приведены значения текущей вероятности $P_{\text{тек}}$ накопленной вероятности $P_{\text{нак}}$ воспламенения облака для каждой итерации расчёта.

Как видно из представленных данных, изменение временного шага не привело к заметному различию результатов: полученные значения вероятности воспламенения на десятом шаге для всех трёх вариантов расчётов остаются близкими.

Таблица 1

t 0,1	$P_{\text{тек}}$	$P_{\text{нак}}$	t 0,5	$P_{\text{тек}}$	$P_{\text{нак}}$	t 1	$P_{\text{тек}}$	$P_{\text{нак}}$
0,0	0,0059	0,0059	0,0	0,0059	0,0059	0,0	0,0059	0,0059
0,1	0,0058	0,0117	0,5	0,0058	0,0117	1,0	0,0058	0,0117
0,2	0,0058	0,0175	1,0	0,0058	0,0175	2,0	0,0058	0,0175
0,3	0,0057	0,0232	1,5	0,0058	0,0232	3,0	0,0058	0,0233
0,4	0,0057	0,0290	2,0	0,0057	0,0290	4,0	0,0057	0,0291
0,5	0,0057	0,0346	2,5	0,0057	0,0347	5,0	0,0057	0,0348
0,6	0,0057	0,0403	3,0	0,0057	0,0403	6,0	0,0057	0,0405
0,7	0,0056	0,0459	3,5	0,0056	0,0460	7,0	0,0056	0,0461
0,8	0,0056	0,0515	4,0	0,0056	0,0516	8,0	0,0056	0,0517
0,9	0,0055	0,0570	4,5	0,0056	0,0571	9,0	0,0056	0,0573
1,0	0,0055	0,0626	5,0	0,0055	0,0626	10,0	0,0055	0,0628

При численном расчёте по итоговой формуле было установлено, что изменение временного шага (от 0,1 с до 1,0 с) не оказывает влияния на получаемое значение вероятности воспламенения облака ТВС, что не может соответствовать действительности.

Заключение

Анализ зависимости расчётных параметров показал, что в существующей модели аварийного процесса с выбросом СУГ, заключающейся в образовании облака ТВС, его дрейфа в атмосфере и последующего взрыва вероятность воспламенения облака рассматривается как вероятность совокупности независимых повторяющихся событий, а не как вероятность ряда взаимно несовместных событий, реализующихся последовательно во времени. В результате каждый временной шаг не влияет на последующие состояния системы, что делает модель фактически стационарной и не отражающей динамику распространения и изменения облака.

Исходя из этого, мы выдвигаем гипотезу о необходимости пересмотра логики расчёта вероятности событий. Для адекватного описания физического процесса следует рассматривать вероятность воспламенения на каждом временном шаге как несовместное событие, реализуемое при условии, что воспламенение не произошло ранее.

Раздел II

Такой подход позволит учесть временную последовательность и обеспечить чувствительность результата к шагу.

В дальнейших исследованиях планируется разработка и апробация модифицированной модели, основанной на принципе несовместных вероятностей и динамической зависимости параметров процесса от времени. Это позволит повысить достоверность оценки риска аварий с дрейфом парогазовых облаков и уточнить методы оценки потенциального аварийного риска в условиях реальных сценариев аварий.

Список источников

1. Ермолаев Д. В. Промышленная безопасность // Известия ТулГУ. Экономические и юридические науки. 2011. №2-2. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/promyshlennaya-bezopasnost> (дата обращения: 12.11.2025).
2. Махутов Н. А. и др. Научные основы промышленной безопасности в многотомном издании "Безопасность России. Правовые, социально-экономические и научно-технические аспекты" // Безопасность труда в промышленности. – 2020. – №. 4. – С. 17-26.
3. Агапова Е. А., Сумской С. И. Аналитический обзор математических моделей распространения облаков тяжелых газов // Безопасность труда в промышленности. 2017. № 5. С. 23–31.
4. Архипова Н. В. Аналитический обзор аварий с пожарами и взрывами на объектах с обращением сжиженного природного газа // Вестник науки. 2023. Т. 4. № 6(63). С. 1041–1047.
5. Василькин В. М. современные методы анализа риска аварий и пожаров на объектах нефтегазовой отрасли // Вестник науки. 2025. №4 (85). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sovremennyye-metody-analiza-riska-avariy-i-pozharov-na-obektah-neftegazovoy-otrasli> (дата обращения: 04.11.2025).
6. Методика определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах (утв. Приказом МЧС России от 26.06.2024 № 533) // КонсультантПлюс : [электронный ресурс]. 2024. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_485176/ (дата обращения: 04.11.2025)
Руководство по безопасности
7. Методические основы анализа опасностей и оценки риска аварий на опасных производственных объектах (утв. Приказом Ростехнадзора от 03.11.2022 № 387) // КонсультантПлюс : [электронный ресурс]. 2022. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_433652/ (дата обращения: 04.11.2025).

Раздел II

8. ГОСТ Р 12.1.047–2012. Система стандартов безопасности труда. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов. Номенклатура показателей и методы их определения // КонсультантПлюс : [электронный ресурс]. 2012. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_140707/ (дата обращения: 04.11.2025).
9. Руководство по безопасности «Методика оценки риска аварий на технологических трубопроводах, связанных с перемещением взрывопожароопасных газов» (утв. Приказом Ростехнадзора от 28.11.2022 № 410) // КонсультантПлюс : [электронный ресурс]. 2022. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_437279/ (дата обращения: 04.11.2025).

IMPROVING THE APPROACH TO ASSESSING THE POTENTIAL RISK OF ACCIDENTS INVOLVING THE RELEASE OF LIQUEFIED HYDROCARBON GAS

T.S. Zhitnikova, A.P. Byzov, E.Yu. Kolesnikov

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg,
Russia

e-mail: *zhitnikova_ts@spbstu.ru, byzov_ap@spbstu.ru,*
kolesn_eyu@spbstu.ru

The article discusses an approach to assessing the potential risk of accidents involving the release of liquefied hydrocarbon gas (LHG) and the subsequent formation and drift of a fuel-air mixture (FAM) cloud. It is shown that the current regulatory methodology for assessing the probability of ignition of such a cloud is not sensitive to changes in the time step and describes the process as stationary. It is proposed to consider the probability of cloud ignition at each time step as an independent event that occurs in the absence of previous ignition. This approach will allow for the consideration of temporal sequence and improve the accuracy of risk assessment.

Keywords: liquefied hydrocarbon gas, accident, fuel-air mixture, probability of ignition; accident modelling; time step; dynamic model; potential risk assessment, industrial safety; fire safety

УДК 614.841.11

НОРМАТИВНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПОЖАРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ БЫСТРОВООЗВОДИМЫХ КАРКАСНЫХ ЗДАНИЙ (ЮРТ)

Г.Ш. Хасанова

г. Астана, Казахстан

e-mail: *make_hasanov@mail.ru, sivenkov01@mail.ru*

А.Б. Сивенков

ФГБУ ВНИИПО МЧС России, г. Балашиха, Россия

e-mail: *sivenkov01@mail.ru*

В статье рассмотрены нормативно-технические проблемы в области обеспечения пожарной безопасности каркасных быстровозводимых зданий (юрт). Проведен анализ объемно-планировочных и конструктивных решений юрт, степени их пожарной опасности. Приведены статистические данные о пожарах в Республике Казахстан за 2023 и 2024 годы на объектах классов функциональной опасности Ф1, Ф2, Ф3, выявлены характерные причины пожаров. Отмечается необходимость проведения работ в области нормативно-правового регулирования требований к обеспечению пожарной безопасности быстровозводимых каркасных зданий с позиций обеспечения безопасности человека в случае возникновения пожара. Определены ключевые направления для проведения исследований, в частности снижение пожарной опасности различных материалов для отделки и декоративного украшения юрт, организация процесса эвакуации людей в случае возникновения пожара, обеспечение требуемых показателей пожарной опасности и огнестойкости конструктивных элементов юрт, а также создание и применение эффективных огнезащитных технологий для материалов и конструкций рассматриваемых объектов.

Ключевые слова: юрта, быстровозводимые здания и сооружения, пожарная безопасность, пожарная опасность, огнестойкость, статистика пожаров, огнезащита, горючесть, дымообразующая способность, токсичность продуктов горения.

Введение

В современных условиях развития строительной отрасли в России и Республике Казахстан, характеризующихся высокими темпами проектирования и возведения быстровозводимых каркасных юрточных объектов из древесины, включающие как модификации традиционных юрт, так и современные виды конструкций, особую значимость приобретают вопросы снижения их пожарной опасности и величины пожарного риска. Так, пожарная опасность объекта – это состояние объекта, характеризующее возможностью возникновения и развития пожара, а также воздействия на людей и материальных ценностей опасных факторов пожара, тогда как пожарный риск – количественная характеристика возможности реализации пожарной опасности и ее последствий для людей и материальных ценностей [1, 2].

В настоящее время вследствие ограниченности исследований в части обеспечения пожарной безопасности каркасных быстровозводимых зданий (юрт) актуальность представляет всесторонний анализ и аргументация степени защиты современных каркасных быстровозводимых объектов от воздействия пожаров, установление мер, направленных на гарантированную безопасность людей.

Современная действительность показывает, что национальные юрты остаются актуальными не только в традиционных кочевых сообществах, но и находят широкое применение в современном мире в качестве туристических баз в эко-туризме, торговых и гостиничных комплексов, выставочных залов и павильонов, ресторанов и кафе и др. Так, например, 19-20 июля 2025 года в г.Астана на ипподроме «Қазанат» в рамках масштабного культурно-аграрного мероприятия - гастрономического фестиваля национальных блюд «BaïQymyz – Бапталған қымыз», посвященному традиционному напитку казахского народа – кумысу, было возведено 50 казахских национальных юрт. В первый день мероприятия посетили более 40 тысяч человек.

Размер современной юрты в зависимости от их предназначения зависит от количества секций деревянного каркаса – кереге от 4 до 12 метров в диаметре, что соответствует площади от 15 до 50 м² и более. При этом вместимость может составлять от 5 до 15 человек для стандартных юрт и до 100 и более человек в случае больших парадных юрт.

Современные градостроительные тенденции, направленные на использование инновационных методов и технологий строительства, при-

менение новых строительных материалов, разработку нестандартных проектных решений, в том числе по объединению в зданиях помещений (зон) различного назначения, нежилых помещений с помещениями, имеющих гибкое функциональное назначение, обуславливают возникновение ситуаций, при которых либо отсутствуют унифицированные требования пожарной безопасности, либо «прямое» однозначное выполнение существующих типовых требований невозможно. В этих случаях при возведении зданий требуется разработка специальных технических условий (СТУ), отражающих их специфику обеспечения пожарной безопасности и содержащих комплекс необходимых инженерно-технических и организационных мероприятий по обеспечению пожарной безопасности [3].

В соответствии с главой 2 п.59 [2] при определении класса функциональной пожарной опасности объекта защиты (здания, сооружения) следует исходить из его целевого назначения, а также характеристик основного функционального контингента (возраста, физического состояния, возможности пребывания в состоянии сна и т.п.) и количества людей. Современные каркасные быстровозводимые здания и сооружения относятся к классу Ф1, Ф2 и Ф3 по действующей классификации функциональной пожарной опасности:

Ф1 – класс функциональной пожарной опасности здания, предназначенного для постоянного проживания и временного пребывания людей: гостевые дома, этно-отели и др.;

Ф2 – класс, куда входят помещения зрелищных, разного рода культурно-просветительных учреждений: музеев, галерей, выставочные павильоны и т.п.;

Ф3 – класс функциональной пожарной опасности: здания предприятий, деятельность которых связана с обслуживанием населения: здания предприятий торговли и предприятий общественного питания: кафе, кофейни, этно-рестораны и др.

Из вышесказанного следует, что каркасные быстровозводимые объекты – юрты рассматриваются как объекты общественного назначения, которые могут относиться к разным функциональным классам, но их принадлежность к общественным объектам (классы Ф1-Ф3) зависит от конкретного назначения. Важнейшей особенностью рассматриваемых объектов является то, что в помещениях современных каркасных быстровозводимых зданий и сооружений присутствуют помещения разной

функциональной пожарной опасности, поэтому совместное их проектирование и возведение в едином объеме зданий и сооружений вызывает сложности ввиду отсутствия специальных норм [4]. Например, имеются отдельные стандарты, дающие общее представление о зданиях блочно-модульных контейнерного, сборно-разборного и неразборного типа промышленного и вспомогательного видов и предназначенные для производственных и жилищно-бытовых нужд, для строительства, сервиса и обеспечения комфортности потребителя и нормы, устанавливающие требования к объемно-планировочным и конструктивным решениям зданий и помещений, инженерному обеспечению. Так, в последние годы данные вопросы в большей степени отработаны для проектирования и возведения быстровозводимых модульных комплексов из готовых модульных конструкций, зданий контейнерного сборно-разборного типа или блочных железобетонных конструкций с последующим размещением в них больниц в период чрезвычайной ситуаций, пандемий, эпидемий и карантинных мер [5, 6]. В этой связи следует отметить, что анализ существующей нормативно-правовой базы, регламентирующей проектирование и строительство каркасных быстровозводимых объектов в виде современных юрт, показал отсутствие норм и правил, позволяющие в достаточно полном объеме обеспечить требования к обеспечению их пожарной безопасности. При этом, ранее комплексная оценка пожарной опасности таких объектов не проводилась, что является причиной фактического отсутствия научно обоснованных требований к мероприятиям, направленных на защиту людей и имущества от воздействия опасных факторов пожара.

Результаты исследования и их обсуждение

Анализ объемно-планировочных и конструктивных решений юрт свидетельствует о том, что выбор конструктивной схемы юрты и необходимость ее разделения на отдельные зоны, по сути, должен зависеть от размера юрты, ее назначения, количества одновременно пребывающих в юрте людей, наличия соответствующего технологического оборудования. Особенности обеспечения пожарной опасности объектов каркасно-войлочной архитектуры обусловлены следующими показателями:

- наличием горючей нагрузки (деревянные конструкции, текстильные ковровые и кожевенные материалы);

- постоянно или временно находящихся в помещениях здания (сооружения) большого количества людей (45 и более человек);
- наличие условий, способствующих возникновению и распространению пожара;
- возможностью частичного или полного разрушения при пожаре отдельных конструктивных элементов здания (сооружения) или всего здания;
- интенсивным распространением пламени по деревянному каркасу, состоящего из складных конструкций (кереге), деревянной двери со створками (есік), конструкций для купола (уык) и верхнего обода (шанырак), по поверхности ковровых изделий и войлоку, а также через зазоры в деревянных конструкциях, что создает большие сложности при эвакуации людей и проведении спасательных работ.

Пожарная опасность конструкций из древесины юрт обусловлена их высокой горючестью, способностью к быстрому распространению пламени, а также возможностью образования токсичного дыма и значительной теплотворной способностью. Для стальных конструктивных элементов юрт в условиях пожара характерна потеря несущей способности в течении 5-15 минут, что может привести к обрушению здания или сооружения в целом.

Ситуация в случае возникновения пожара может осложняться наличием внутри объектов большого количества отделочных декоративных материалов, обладающих высокой пожарной опасностью. Так, например, традиционные казахские ковры и ковровые изделия: постилочные ковры (текеметы, сырмаки), плетеные циновки (шымши), предназначенные для утепления стен юрты (кереге) и защиты от пыли, в процессе изготовления которых используется степной тростник - камыш (ший), переплетенный шерстяными волокнами и настенные ковры (тускиизы), изготовленные из кожи, замши, плюша, шелка и бархата, занимают значительную часть как по горизонтальной, так и по вертикальной поверхности внутреннего интерьера юрты. Большинство ковровых материалов, традиционно используемых для внешнего и внутреннего интерьера юрты, характеризуются сильной горючестью и интенсивной скоростью распространения пламени, а также высоким дымообразованием и токсичностью продуктов горения. В этой связи, актуальным остается направление создания и применения теплоогнезащиты для несущих конструктивных элементов быстровоз-

водимых каркасных зданий. При этом, для деревянных элементов актуальной остается проблема изучения эффективности средств огнезащиты применительно к различным видам древесины, используемых для изготовления каркаса юрты (ива, береза, тополь, ель, сосна) и текстильных ковровых материалов из натуральных волокон (шерсть, хлопок и джут).

Необходимо констатировать тот факт, что в настоящее время в силу специфики использования и назначения текстильных материалов не существует единого подхода к определению показателей их пожарной опасности [7]. Идентификация основных показателей, определяющих условия возникновения и распространения пожаров в современных быстровозводимых зданиях класса Ф1, Ф2 и Ф3 является главным аспектом для разработки эффективных мер по предотвращению пожаров.

Согласно статистических данных Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Казахстан [8], общее количество пожаров на объектах с функциональной пожарной опасностью Ф1, Ф2 и Ф3 увеличилось на 0,8

По данным, приведенным в таблице 1, можно сделать вывод о том, что пожары в зданиях жилого назначения, в том числе в зданиях каркасных быстровозводимых объектов (юрт) (класс Ф1), являются областью повышенного внимания, так как в них происходит наибольшее количество пожаров, что соответствует 94,3 % от общего числа пожаров, а доля погибших составляет 73,7 %. Прямой материальный ущерб от пожаров в жилом секторе составляет 58,3 % от общих потерь на пожарах. Основная доля пожаров за период 2023-2024 гг. в зданиях класса Ф1, Ф2 и Ф3 приходится на причины, связанные с нарушением техники безопасности электроприборов (4,96 и 3,67 %, соответственно). На втором месте пожары, связанные с нарушением техники безопасности при эксплуатации бытовых газовых устройств (0,73 и 0,56 %, соответственно). Нарушение правил устройства и эксплуатации печного оборудования являются третьей основной причиной пожаров (13,59 и 15,59 %, соответственно) [8]. На основании статистических данных пожаров и их последствий было выявлено, что объекты класса пожарной функциональной опасности Ф1 имеют самый высокий уровень пожарной опасности. Кроме того, предлагается использовать в качестве дополнительного

Таблица 1 — Статистика пожаров по объектам различной функциональной пожарной опасности (2023–2024 гг.)

Объект пожара (класс функциональной пожарной опасности зданий)	Показатель	2023 г.	2024 г.	Темп прироста (снижения), 2024 в % к 2023
Ф1 — здания для постоянного проживания и временного пребывания людей	Кол-во пожаров, ед.	6909	6964	+0,8
	Число погибших, чел.	244	263	+7,2
	Прямой материальный ущерб, млн. тенге	2362,12	2226,80	-6,0
Ф2 — здания зрелищных и культурно-просветительных учреждений	Кол-во пожаров, ед.	8	7	-14,2
	Число погибших, чел.	2	5	+60,0
	Прямой материальный ущерб, млн. тенге	10,5	27,56	+61,9
Ф3 — здания предприятий по обслуживанию населения	Кол-во пожаров, ед.	424	481	+11,8
	Число погибших, чел.	129	184	+31,7
	Прямой материальный ущерб, млн. тенге	663,82	19302,69	+96,5

для оценки уровня пожарной опасности эксплуатируемых зданий (сооружений) показатель «доля травмированных при пожарах людей от общего количества пострадавших людей на пожарах». Данный показатель оценивает вероятность выживания людей, оказавшихся в зоне воздействия опасных факторов пожара, приводящих к травме или гибели человека, и характеризует величину факторов пожарной опасности. Высокие значения этого показателя могут свидетельствовать о низком уровне пожарной опасности – нанесенный вред здоровью не приводит к гибели пострадавших [9].

В современных жилых быстровозводимых зданиях каркасного типа (юртах) постоянно могут находиться люди различных возрастных групп и социально-экономического положения. Это является одной из важнейших особенностей для разработки технических решений в части обеспечения пожарной безопасности рассматриваемых объектов. Следует отметить, что даже незначительное возгорание (пожар) может иметь катастрофические последствия, учитывая возможность возникновения паники, а также образования дымовых и токсичных газов при горении строительных конструкций, текстильных ковровых материалов и изделий. Основной причиной гибели людей на пожарах, согласно статистике, является отравление токсичными продуктами горения. Известно, что при горении натуральной шерсти происходит тление, сопровождаемое большим количеством дыма и продуктов неполного сгорания, среди которых присутствует высокотоксичный цианистый водород (HCN).

Сочетание сильной задымленности и токсичности воздушной среды с интенсивной скоростью тепловыделения при горении материалов и конструкций представляет значительную опасность для жизни и здоровья людей. Изучение динамики развития опасных факторов пожара внутри юртовых сооружений подтверждает возможность возникновения критических пожарных сценариев.

Так, в работе [10] авторы провели расчет температурных режимов и динамики изменения опасных факторов пожара (далее – ОФП), по результатам которого проведена оценка возможности безопасной эвакуации людей из помещения юрты. Проведенный расчет показал, что люди не успевают эвакуироваться из помещения юрты до достижения критических значений ОФП. Результаты численного моделирования свидетельствуют о том, что характер

распространения ОФП в помещении юрты, а также наличие только одного выхода способствуют созданию реальной опасности для людей. Характеристики горючей нагрузки обуславливают интенсивное снижение содержания кислорода в юрте, а также снижение видимости в дыму и повышение температуры выше предельно допустимых значений. Фактически, в силу интенсивной динамики развития пожара, использование одного выхода приводит к скоплению людей и не позволяет всем посетителям эвакуироваться до наступления предельно допустимых значений опасных факторов пожара. В условиях же наличия большого количества людей также формируется возможность более негативного развития событий – возникновение паники [10]. В этой связи, приоритетными являются организационно-технические решения, направленные на безопасную эвакуацию и спасение людей в случае возникновения пожара.

Заключение

Анализ основных проблемных вопросов обеспечения пожарной безопасности современных быстровозводимых каркасных зданий (юрт), имеющих различное функциональное назначение, свидетельствует о необходимости реализации комплекса организационно-технических противопожарных мероприятий. Главной особенностью для таких объектов является использование в них горючих материалов, характеризующихся быстрым распространением пламени по деревянному каркасу и ковровым покрытиям, а также высоким дымообразованием и токсичностью продуктов горения натуральных и синтетических ковровых изделий. Применяемые в отделке и декоративном интерьере ковровые материалы могут достаточно легко возгораться и способствовать образованию и развитию опасных факторов пожара.

Представленные аналитические исследования статистических данных пожаров в зданиях с функциональной пожарной опасностью класса Ф1, Ф2 и Ф3 и их последствий показали, что большинство пожаров происходит в жилом секторе (класс Ф1), который включает, например, гостевые дома в виде юрт и другие помещения для проживания людей, что ведет к значительным человеческим и материальным потерям, а основными причинами возгораний являются пожары, связанные с нарушением техники безопасности при работе с электроприборами. В зданиях класса Ф1, Ф2 и Ф3, особенно в

местах массового пребывания людей, пожары представляют особую опасность из-за риска распространения огня, дыма и других опасных факторов, а также из-за потенциально большего числа пострадавших и возникновения паники.

Результаты проведенного анализа позволяют сделать выводы относительно направлений дальнейших исследований:

- высокая потенциальная опасность массового пребывания людей в юртах, недостаточная проработка особенностей организации процесса эвакуации из помещений рассматриваемых объектов не позволяют эффективно и гарантированно обеспечить безопасность людей в случае возникновения пожара [11].

- ограниченность данных о поведении строительных материалов и конструкций в условиях пожара, используемых для строительства быстровозводимых зданий и сооружений с массовым пребыванием людей, не позволяет объективно оценить пожарную обстановку и степень угрозы жизни и здоровью людей в случае возникновения пожара.

- создание и применение огнезащитных средств (антипирены, покрытия, конструктивная огнезащита) для материалов и конструкций юрт должны базироваться на возможности комплексного снижения показателей пожарной опасности, а для конструкций на повышение пределов огнестойкости. В настоящее время малоизученным остается вопрос снижения дымообразующей способности и токсичности продуктов горения материалов при использовании различной огнезащиты.

Вместе с этим, необходимо акцентировать внимание в целом на необходимость совершенствования системы нормативно-правового регулирования в области обеспечения пожарной безопасности объектов каркасно-войлочной архитектуры.

Список источников

1. Трусова Т.С., Конорев Д.В. Пожарный риск как мера возможности реализации пожарной опасности // Пожарная безопасность: проблемы и перспективы. – 2018. – Т. 1, № 9. – С. 899–902.
2. Об утверждении технического регламента «Общие требования к пожарной безопасности». Приказ Министра по чрезвычайным ситуациям Республики Казахстан от 17 августа 2021 года № 405. URL: <https://adilet.zan.kz/rus/docs/V2100024045> (дата обращения: 13.10.2025).
3. Ларченко В.А. Некоторые проблемы оценки пожарной безопасности общественных зданий с учётом расчёта пожарного риска // Материалы международной научно-технической конференции «Системы безопасности». – 2020. – № 29. – С. 79–83.
4. Сивенков А.Б., Хасанова Г.Ш. Научные проблемы нормирования и оценки пожарной безопасности уникальных быстровозводимых объектов культурно-исторического значения // Ройтмановские чтения. – Москва: АГПС МЧС России, 2019. – С. 113–116.
5. СТ РК 3190-2018 Здания блочно-модульные. Технические условия. – Астана, 2020. – 52 с.
6. СН РК 3.02-39-2020 Временные нормы для проектирования быстровозводимых модульных больниц. – Нур-Султан, 2020. – 20 с.
7. Спиридонова В.Г., Циркина О.Г., Салихова А.Х., Чуприна О.С. Анализ методов испытаний по определению классификационных показателей пожарной опасности текстильных материалов и проблемные вопросы их применения // Современные проблемы гражданской защиты. – 2025. – № 1(54). – С. 109–123.
8. Официальный сайт Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Казахстан. URL: <https://www.gov.kz/memleket/entities/emer/documents/details/778899?lang=ru> (дата обращения: 12.10.2025).
9. Харин В.В., Порошин А.А., Удавцова Е.Ю. и др. Соотношение числа травмированных и погибших как показатель опасности последствий пожаров // Актуальные проблемы пожарной безопасности. – 2019. – С. 568–571.

10. Сивенков А.Б., Хасанова Г.Ш. Моделирование динамики развития опасных факторов пожара быстровозводимых объектов культурно-исторического значения // Вестник Кокшетауского технического института. – 2018. – № 2(30). – С. 49–57.
11. Куликов С.В. Проблемы пожарной безопасности быстровозводимых объектов с массовым пребыванием людей // Актуальные вопросы пожаротушения. – Иваново: Иван. пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, 2021. – С. 255–258.

REGULATORY AND TECHNICAL PROBLEMS OF ENSURING FIRE SAFETY OF PREFABRICATED FRAME BUILDINGS (YURTS)

G.Sh. Khasanova

Astana, Kazakhstan

e-mail: *make_hasanov@mail.ru*

A.B. Sivenkov

All-Russian Research Institute for Fire Protection of EMERCOM of Russia, Balashikha, Russia

e-mail: *sivenkov01@mail.ru*

The article addresses the regulatory and technical challenges related to ensuring fire safety in frame-type prefabricated buildings (yurts). A comprehensive analysis is conducted of the spatial-planning and structural solutions of yurts, as well as the degree of their fire hazard. Statistical data on fire incidents in the Republic of Kazakhstan for 2023 and 2024 are presented for facilities classified under functional fire hazard categories F1, F2, and F3, with typical causes of fires identified. The study emphasizes the necessity of advancing regulatory and legal frameworks governing fire safety requirements for prefabricated frame buildings, prioritizing the protection of human life in the event of a fire. Key research directions are defined, including the reduction of fire hazards associated with finishing and decorative materials used in yurts, the organization of safe evacuation procedures, the assurance of required fire safety and fire resistance performance of structural elements, and the development and implementation of effective fire protection technologies for the materials and structures of such facilities.

Keywords: yurt, prefabricated buildings and structures, fire safety, fire hazard, fire resistance, fire statistics, fire protection, combustibility, smoke formation, toxicity of combustion products

УДК 614.842

К ВОПРОСУ О СНИЖЕНИИ ВРЕМЕНИ РЕАГИРОВАНИЯ НА ВЫЗОВЫ В ПОЖАРНО-СПАСАТЕЛЬНЫХ ГАРНИЗОНАХ

О.Ф. Гизетдинов

Центр управления в кризисных ситуациях Главного управления МЧС
России по Удмуртской Республике, г. Ижевск, Россия
e-mail: gizetdinovoleg@ya.ru

И.М. Янников

Ижевский государственный технический университет имени М.Т.
Калашникова, г. Ижевск, Россия

В статье рассматриваются проблемные вопросы, возникающие в пожарно-спасательных гарнизонах при реагировании на вызовы. Предлагаются мероприятия по снижению времени реагирования за счёт автоматизации процесса принятия решения на привлечение сил и средств.

Ключевые слова: Пожарно-спасательный гарнизон, этапы реагирования на вызовы, центральный пункт пожарной связи (ЦППС), автоматизация процесса принятия решений.

Введение

Проблемы реагирования на вызовы пожарно-спасательных подразделений включают в себя трудности на всех этапах от приёма вызова до ликвидации пожара или чрезвычайной ситуации [2]. Наиболее актуальными на этапе приёма и обработки вызова являются недостоверная и неполная информация о происшествии. На этапе следования к месту вызова – сложная дорожная обстановка, вызванная плохим состоянием дорог, метеоусловиями и заторами (пробками) прежде всего в "часы пик". На этапе прибытия и развёртывания сил - большое влияние на оперативность действий может оказать недоступность объекта вследствие перекрытия подъездов. Каждый из вышеперечисленных факторов оказывает негативное воздействие на время начала тушения и ведения спасательных работ.

Более того уже непосредственно на этапе локализации и ликвидации пожара (источника чрезвычайной ситуации) и ведения спасательных работ негативными факторами, влияющими на своевременность и эффективность боевых действий, могут быть: необходимость проведения разведки и аварийно-спасательных работ, что скажется на нехватке времени на спасение вследствие ухудшения обстановки. Кроме того, на конечном результате могут сказаться нехватка спецоборудования и неподготовленность личного состава для проведения необходимых аварийно-спасательных работ, а также недостаточная отработка вопросов взаимодействия с другими службами.

Указанные проблемные вопросы, возникающие на различных этапах реагирования в той или иной мере, отмечают многие исследователи, занимающиеся данной тематикой [2-5]. При этом многими из них подчёркивается, что сокращение численности погибших удаётся достигнуть, в том числе и за счёт уменьшения времени прибытия первого подразделения к месту пожара.

Для решения главной цели по снижению времени реагирования в складывающихся условиях реальной обстановки необходимо провести анализ всех вышеупомянутых этапов реагирования с целью выявления наиболее перспективного, с точки зрения сокращения временных затрат, элемента.

На этапе приёма и обработки вызова анализу безусловно должна подвергнуться работа диспетчера вызова диспетчером центрального пункта пожарной связи (далее - ЦППС). Алгоритм его действий включает в себя время приема от заявителя информации о пожаре (происшествии), время принятия решения на направление к месту сил и средств, предусмотренных расписанием выезда, время передачи команды (сигнала) на направление сил и средств подразделений к месту вызова).

При этом необходимо отметить, что существует два вида (потока) поступающей информации [6]: формализованный и стихийный. К первому относятся процедура приёма сообщений от заявителей, которая в достаточной степени стандартизована (обязательные сведения в себя включают адрес места пожара (происшествия), наличие опасности для жизни и здоровья людей, сведения о объекте пожара (происшествия)). Ко второму – разнохарактерные сведения и указания, поступающие к диспетчеру от различных источников

(оперативная информация, устные обращения, ответы, служебные записки и пр. поступающие по различным каналам связи).

Если на время приема сообщения от заявителя по большому счету повлиять достаточно сложно, то на процессы обработки поступившей информации и принятие решения на отправку сил и средств вполне возможно, прежде всего за счёт создания автоматизированной информационной системы поддержки принятия решений. Основой данной системы безусловно должна стать информационная база данных действующая в реальном режиме времени.

Поскольку, как отмечалось выше, при всем своём многообразии факторы, влияющие на время реагирования, группируются по следующим составляющим обстановку элементам: имеющиеся силы и средства, обстановка на пожаре, взаимодействующие структуры, местность, время года и суток, гидрометеоусловия [7]. Таким образом эти данные и должны входить в базу данных разрабатываемой системы.

В настоящее время диспетчеру ЦППС при принятии решения на привлечение сил и средств необходимо учитывать требования ряда документов, прежде всего расписания выездов. Расписание выездов на населенный пункт – оперативный документ, устанавливающий порядок привлечения сил и средств пожарной охраны для тушения пожара и проведения аварийно-спасательных работ (далее АСР). По своему содержанию документ объемный, сложный для восприятия, который имеет большое количество разделов и приложений. Он определяет порядок привлечения сил и средств пожарно-спасательного гарнизона исходя из мест дислокации подразделений на территории, входящей в состав гарнизона и сопоставления адреса пожара. Им же регламентируется так называемый «ранг пожара», то есть кратное увеличение количества привлекаемых сил и средств в случае усложнения обстановки на месте пожара (проведения АСР).

Предлагаемая автоматизированная система поддержки принятия решения диспетчером ЦППС должна минимизировать человеческий фактор при принятии решения, исключив при этом возможные ошибки диспетчера в чтении карты районов выезда с определением мест дислокации привлекаемых подразделений, мест вызова, выбору оптимального маршрута следования, соответствия принятого решения данным строевой записки. Кроме того, она должна учитывать не

только фактический состав сил и средств подразделениях на данный момент времени, но и время года, суток, реальную дорожную обстановку.

Для разработки данной СППР диспетчера ЦППС предполагается автоматизировать алгоритм его действий с последующей проверкой результатов путём проведения хронометража различных этапов действий. По результатам этих экспериментов можно будет не только судить, на сколько удалось минимизировать время обработки вызова, но и сделать вывод о степени прикрытии территории г. Ижевска с точки зрения достаточности ресурсов с учетом требований п. 1 ст. 76 Федерального закона «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности» [8] по времени прибытия первого пожарно-спасательного подразделения к месту вызова.

Список источников

1. Проблемы реагирования на вызовы пожарно-спасательных подразделений. Обзор ИИ [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.google.com/search> (дата обращения 6.11.2025).
2. Порошин А. А., Харин В. В., Бобринев Е. В. и др. Оценка параметров оперативного реагирования пожарно-спасательных подразделений в зависимости от времени суток / А. А. Порошин, В. В. Харин, Е. В. Бобринев, Е. Ю. Удавцова, А. А. Кондашов // Технологии техносферной безопасности. – 2021. – Вып. 3 (93). – С. 126–136.
3. Ищенко А. Д., Шевцов М. В., Дирляйн Ю. Я. и др. О некоторых современных проблемах функционирования пожарно-спасательных гарнизонов при реагировании на пожары и чрезвычайные ситуации / А. Д. Ищенко, М. В. Шевцов, Ю. Я. Дирляйн и др. – Научно-издательский центр «Аспект» [Электронный ресурс]. – URL: <https://na-journal.ru/> (дата обращения 6.11.2025).
4. Фурин К. А., Крудышев А. Л., Фасахутдинов Я. А. Анализ влияния оперативности подразделений МЧС на количество погибших в Кунгурском пожарно-спасательном гарнизоне Пермского края // Актуальные проблемы обеспечения безопасности в Российской Федерации: сборник материалов Дней науки с международным

- участием (1–4 июня 2021 г.). – Екатеринбург: Уральский институт ГПС МЧС России, 2021. – Ч. 1. – С. 196–200.
5. Харин В. В., Бобринёв Е. В., Удавцова Е. Ю. и др. Показатели оперативного реагирования подразделений пожарной охраны Московской области // Современные проблемы гражданской защиты. – 2021. – № 4 (41). – С. 4–47.
 6. Смирнов В. А., Наумов А. В. Особенности информационного обеспечения руководителя тушения пожара // Актуальные проблемы обеспечения пожарной безопасности и чрезвычайных ситуаций: сб. мат. Всеросс. науч.-практ. конф., 26 апреля 2019 г., г. Железногорск. – Сиб. пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, 2019. – С. 613–616.
 7. Тербнев В. В. Тактика тушения пожаров. Часть 1. Основы тушения пожаров: учеб. пособие. – М.: КУРС: ИНФРА-М, 2018. – 256 с.
 8. Федеральный закон от 22.07.2008 № 123-ФЗ «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности».

ON THE ISSUE OF REDUCING THE RESPONSE TIME TO CALLS IN FIRE AND RESCUE GARRISONS

O.F. Gizetdinov

Crisis Management Center of the Main Directorate of the Ministry of
Emergency Situations of Russia for the Udmurt Republic, Izhevsk, Russia
e-mail: *gizetdinovoleg@ya.ru*

I.M. Yannikov

Izhevsk State Technical University named after M.T. Kalashnikov,
Izhevsk, Russia

The article discusses problematic issues that arise in fire and rescue garrisons when responding to challenges. Measures are proposed to reduce response time by automating the decision-making process to attract forces and resources.

Keywords: Fire and rescue garrison, stages of response to calls, central point of fire communication (CPPS), automation of the decision-making process.

Научное издание

Ответственность за достоверность информации,
точность фактов, цифр и цитат, а так же за то, что в материалах
нет данных, не подлежащих открытой информации,
несут авторы. При перепечатке материалов ссылка
на Труды конференции «Безопасность в техносфере»
обязательна

БЕЗОПАСНОСТЬ В ТЕХНОСФЕРЕ
Труды XVIII Международной научно-практической
конференции (25 ноября 2025 г.)
Выпуск 18

Научный редактор
Колодкин Владимир Михайлович

Печатается в авторской редакции.
Компьютерная верстка: А.А. Акеев

Подписано в печать 29.12.2025. Формат 60x84¹/₁₆.
Усл. печ. л. 12,5. Уч.-изд. л. 11,4.
Тираж 27 экз. Заказ № 1951.

Издательский центр «Удмуртский университет»
426034, Ижевск, ул. Ломоносова, 4Б, каб. 021
Тел./факс: + 7 (3412) 916-364, E-mail: editorial@udsu.ru

Типография Издательского центра
«Удмуртский университет»
426034, Ижевск, ул. Университетская, 1, корп. 2.
Тел. +7 (3412) 68-57-18, 91-73-05