

УДК 631.004.896

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ И АЛГОРИТМ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА В КАПЕЛЬНОМ ОРОШЕНИИ

**Тургунов Адилбек Мухтарович** - кандидат технических наук, профессор,  
ORCID: 0009-0004-1124-0285, E-mail: [adilbekturgunov@gmail.com](mailto:adilbekturgunov@gmail.com)

<sup>2</sup>Каршинский институт ирригации и агротехнологий при НИУ “ТИИИМСХ”,  
г. Карши, Узбекистан

**Аннотация.** Искусственный интеллект (ИИ) трансформирует сельское хозяйство, внедряясь в системы экономичного полива и предлагая решения для оптимизации использования воды, прогнозирования её потребности, мониторинга систем орошения, анализа данных о растениях и управления удобрениями. Технологии ИИ анализируют множество переменных, таких как состояние почвы, климатические условия и характеристики растений, чтобы оптимизировать процессы орошения и способствовать эффективному распределению ресурсов. Это направление актуально для улучшения урожайности и качества сельскохозяйственной продукции, при этом минимизируя затраты и воздействие на окружающую среду.

В этом разделе описывается разработка математической модели для оптимизации процесса капельного орошения, учитывая сложные взаимосвязи между водой, почвой, растениями и климатическими условиями. Применение уравнений Навье-Стокса, описывающих движение жидкости, и численных методов, таких как метод конечных элементов, обеспечивает моделирование и оптимизацию потока воды. Процесс оптимизации включает в себя несколько шагов: от моделирования системы и определения параметров до применения оптимизационных методов для нахождения оптимальных решений. Надо подчеркнуть сложность задачи оптимизации полива и важность учета множества переменных, включая практические аспекты капельного орошения, такие как расположение капельниц и типы почвы.

По результатам исследований был разработан алгоритм решения уравнения Навье-Стокса в сочетании с дополнительными уравнениями, учитывающими поведение капель (например, уравнения движения капель в поле скорости). Эта модель позволяет описать распределение капель в пространстве и времени, их взаимодействие с окружающей средой и другими каплями, а также поведение жидкости в целом при орошении.

Изучены вопросы разработки математической модели и алгоритма искусственного интеллекта для систем капельного орошения. В качестве математической модели для моделирования процессов в системе орошения использовано уравнение Навье-Стокса.

**Ключевые слова:** искусственный интеллект, капельное орошение, уравнение Навье-Стокса, математическая модель, программирование на языке Python, алгоритм, управление.

UDC 631.004.896

## MATHEMATICAL MODEL AND ARTIFICIAL INTELLIGENCE ALGORITHM IN DRIP IRRIGATION

**Turgunov, Adilbek Mukhtarovich** - Candidate of Technical Sciences, professor,  
ORCID: 0009-0004-1124-0285, E-mail: [adilbekturgunov@gmail.com](mailto:adilbekturgunov@gmail.com)

<sup>2</sup>Karshi institute of irrigation and Agrotechnology at the National Research University “TIAME”,  
Karshi city, Uzbekistan

**Abstract.** Artificial Intelligence (AI) is transforming agriculture, integrating into efficient irrigation systems and offering solutions for optimizing water usage, forecasting its demand, monitoring irrigation systems, analyzing plant data, and managing fertilizers. AI technologies analyze a multitude of variables such as soil condition, climatic conditions, and plant characteristics to optimize irrigation processes and facilitate the efficient distribution of resources. This direction is relevant for improving crop yield and the quality of agricultural products, while minimizing costs and environmental impact.

In this section, the development of a mathematical model for optimizing the drip irrigation process is described, taking into account the complex interactions between water, soil, plants, and climatic conditions. The use of Navier-Stokes equations, which describe the motion of fluids, and numerical methods, such as the finite element method, ensures the modeling and optimization of water flow. The optimization process involves several steps: from system modeling and parameter determination to the application of optimization methods for finding optimal solutions. It is necessary to emphasize the complexity of the irrigation optimization task and the importance of considering a multitude of variables, including practical aspects of drip irrigation, such as the placement of drippers and soil types.

As a result of the research, an algorithm for solving the Navier-Stokes equation was developed in combination with additional equations that take into account the behavior of droplets (for example, equations of droplet motion in a velocity field). This model allows describing the distribution of droplets in space and time, their interaction with the environment and other droplets, as well as the overall behavior of the liquid during irrigation.

Issues related to the development of a mathematical model and an artificial intelligence algorithm for drip irrigation systems have been studied. The Navier-Stokes equation was used as a mathematical model for simulating processes in the irrigation system. **Keywords.** Artificial intelligence, drip irrigation, Navier-Stokes equation, mathematical model, Python programming, control algorithm.

**Keywords:** Artificial Intelligence, Drip Irrigation, Navier-Stokes Equation, Mathematical Model, Python Programming, Control Algorithm.

UO‘K 631.004.896

## TOMCHILATIB SUG‘ORISHDA MATEMATIK MODEL VA SU‘NIY INTELLEKT ALGORITMI

**Turg‘unov Adilbek Muxtarovich** - texnika fanlari nomzodi, professor v.b.,  
ORCID: 0009-0004-1124-0285, E-mail: [adilbekturgunov@gmail.com](mailto:adilbekturgunov@gmail.com)

“TIQXMMI” MTUning Qarshi irrigatsiya va agrotexnologiyalar instituti, Qarshi sh., O‘zbekiston

**Annotatsiya.** Sun‘iy intellekt (SI) qishloq xo‘jaligini transformatsiya qilib, suv tejovchi sug‘orish tizimlariga kirib, suvdan foydalanishni optimallashtirish, suvga bo‘lgan ehtiyojni bashorat qilish, sug‘orish tizimlarini monitoring qilish, o‘simliklar haqidagi ma‘lumotlarni tahlil qilish va o‘g‘itlarni boshqarish uchun yechimlar taklif qilmoqda. SI texnologiyalari tuproqning holati, iqlim sharoitlari va o‘simliklarning xususiyatlari kabi ko‘plab o‘zgaruvchilarni tahlil qilib, sug‘orish jarayonlarini optimallashtirish va resurslarni samarali taqsimlashga yordam beradi. Bu yo‘nalish hosildorlik va qishloq xo‘jaligi mahsulotlarining sifatini yaxshilash uchun dolzarb bo‘lib, bu orqali xarajatlarni kamaytirish va atrof-muhitga ta‘sirini minimallashtirish mumkin.

Bu bo‘limda suv, tuproq, o‘simliklar va iqlim sharoitlari o‘rtasidagi murakkab munosabatlarni hisobga olgan holda, tomchilatib sug‘orish jarayonini optimallashtirish uchun matematik model ishlab chiqish tavsiflanadi. Suyuqlikning harakatini tasvirlovchi Navye-Stoks tenglamalari va cheklangan elementlar usuli kabi raqamli usullardan foydalanish, suv oqimini modellashtirish va

*optimallashtirishni ta'minlaydi. Optimizatsiya jarayoni bir qator bosqichlarni o'z ichiga oladi: tizimni modellashtirishdan va parametrlarni belgilashdan tortib, optimal yechimlarni topish uchun optimizatsiya usullaridan foydalanishgacha. Shuni ta'kidlash lozimki, sug'orishni optimallashtirish vazifasining murakkabligi va ko'plab o'zgaruvchilarni, jumladan tomchilatib sug'orishning amaliy jihatlarni, masalan, tomchilatib sug'orish tizimlarining joylashuvi va tuproq turlarini hisobga olishning muhim ahamiyat kasb etadi.*

*Tadqiqotlar natijasida tomchilar harakatini (masalan, tomchilar tezlik maydonida harakat tenglamalari) hisobga olgan holda Nav'e-Stoks tenglamasini hal qilish algoritmi ishlab chiqildi. Bu model fazo va vaqtda tomchilarning tarqalishini, ularning atrof-muhit va boshqa tomchilar bilan o'zaro ta'sirini hamda sug'orish jarayonida suyuqlikning umumiy harakatini tasvirlash imkonini beradi.*

*Tomchilatib sug'orish tizimlari uchun matematik model va sun'iy intellekt algoritmini ishlab chiqish masalalari o'rganildi. Sug'orish tizimi jarayonlarini modellovchi sifatida Nav'e-Stoks tenglamasi qo'llanilgan.*

**Kalit so'zlar:** *Sun'iy intellekt, tomchilatib sug'orish, Nav'e-Stoks tenglamasi, matematik model, Python tilida dasturlash, boshqaruv algoritmi.*

## Введение

Искусственный интеллект (ИИ) находит все более широкое применение в сельском хозяйстве во всем мире, включая системы экономичного полива. Приведём некоторые аспекты, связанные с использованием ИИ в этой области [1, 2]:

- Оптимизация расхода воды;
- Прогнозирование потребности в воде;
- Мониторинг состояния систем;
- Анализ данных о растениях;
- Управление удобрениями.

Остановимся на каждом аспекте по отдельности. В решении вопроса оптимизации расхода воды ИИ может анализировать данные о почве, климате и растениях, чтобы оптимизировать объем воды, подаваемой через системы капельного орошения. Это помогает снизить потребление воды и улучшить эффективность орошения.

В прогнозировании потребности в воде необходимо разработать алгоритмы машинного обучения, ИИ может предсказывать, когда и сколько воды нужно подавать на поля. Это позволяет сельским хозяйствам планировать орошение более эффективно, прогнозировать реальную потребность в поливных водах.

В вопросе мониторинга состояния систем искусственный интеллект может контролировать работу систем капельного орошения, обнаруживать неисправности, утечки и другие возникающие проблемы. Это помогает предотвратить потери воды и снизить затраты на обслуживание и принимать экстренные меры предотвращения возможных неполадок в системе капельного орошения.

При проведении анализа данных о растениях ИИ может анализировать данные о росте растений, состоянии почвы и других факторах, чтобы определить оптимальное время и объем орошения для каждого участка поля.

В процессе управления удобрениями особенно актуален вопрос использования искусственного интеллекта, при помощи этой технологий можно оптимизировать распределение удобрений через системы капельного орошения, что способствует повышению урожайности и экономии удобрений, который неопределимо влияет на себестоимость выращиваемых сельхозкультур [2].

Исходя из вышесказанного можно отметить, что становится особенно актуальным вопрос применения капельного орошения земли в сельском хозяйстве. Этот спрос позволяет разработать эффективные методы и технологии оптимального использования водных ресурсов, которые могут повлиять на увеличение урожайности сельхозкультур и приводить к

улучшению качества почвы. Задача оптимизации полива в системе капельного орошения может быть сложной задачей из-за большого количества переменных, таких как тип почвы, степень бонитировки почвы, климатические особенности, типы посевных растений и даже состояние и неравномерность среды орошения. В связи с активацией разработок в области искусственного интеллекта и нейронных сетей особенно актуальным становится вопрос применения этих технологий в сельском хозяйстве.

Для решения этой задачи можно использовать математическую модель и алгоритм искусственного интеллекта, которые позволят оптимизировать распределение воды в системе капельного орошения, учитывая все вышеупомянутые переменные.

### Методы и материалы (Теоретические основы)

В разработке алгоритмов оптимального орошения капельным путём необходимо разработать математические методы расчёта оптимального полива. Для этого необходимо разработать математическую модель, которая может быть представлена в виде системы уравнений, описывающих процесс взаимодействия воды, почвы, растений и климатических условий. Уравнения математической модели могут включать в себя коэффициенты водопроницаемости почвы, уровни испарения воды, влияние различных типов растений на усвоение воды и т.д. Для учета всех этих переменных могут использоваться методы математического моделирования, такие как уравнения Навье-Стокса.

Уравнения Навье-Стокса описывают движение жидкости и газа, и они могут быть использованы для моделирования потока воды в системе капельного орошения. Однако, прямое решение этих уравнений для оптимизации полива в капельном орошении может быть сложным из-за их сложности и вычислительных требований.

Вместо прямого решения уравнений Навье-Стокса, обычно используются численные методы, такие как метод конечных элементов или метод конечных объемов. Эти методы позволяют моделировать и оптимизировать поток жидкости в системе капельного орошения, учитывая различные параметры, такие как диаметр капель, распределение давления и т.д.

Оптимизация полива в капельном орошении может включать в себя следующие шаги:

- 1. Моделирование системы:** разработка численной модели системы капельного орошения, используя уравнения Навье-Стокса или другие уравнения, учитывающие особенности потока воды через капельное орошение.
- 2. Определение параметров:** задание параметров системы, такие как распределение капель, диаметры капель, расход воды, давление и другие факторы, которые могут влиять на процесс орошения.
- 3. Целевая функция:** определение целевой функции, которую мы хотим оптимизировать. Это может быть равномерное покрытие полей, минимизация потерь воды или другие критерии эффективности.
- 4. Использование оптимизационных методов:** применение оптимизационных методов для нахождения оптимальных значений параметров системы. Методы оптимизации могут включать генетические алгоритмы, методы градиентного спуска и т.д.
- 5. Проверка и настройка:** проверка полученных результатов, и при необходимости внесение коррективы в параметры системы или метод оптимизации.

Необходимо помнить, что оптимизация капельного орошения может также включать в себя практические аспекты, такие как расположение капельниц, тип почвы, культуры и климатические условия, которые также должны учитываться в процессе оптимизации.

Уравнения Навье-Стокса представляют собой систему дифференциальных уравнений, описывающих движение жидкости. Они имеют вид [3, 4, 5]:

$$\frac{dv}{dt} + (v \cdot \nabla)v = -\frac{\nabla P}{\rho} + \nu \nabla^2 + g, \quad (1)$$

где:

- $\nabla$  — математический оператор набла,
- $v$  — векторная скорость воды;
- $t$  — время течение воды;
- $\rho$  — плотность воды;
- $P$  — давление воды;
- $\nu$  — коэффициент кинематической вязкости воды;
- $g$  — внешняя сила.

Моделирование капельного орошения требует учета специфических особенностей, таких как диаметр капель, их распределение, скорость выхода из капельниц и т.д. В данном контексте, для упрощения задачи, мы можем рассмотреть уравнение для несжимаемой жидкости ( $\nabla \cdot v = 0$ ), так как вода в обычных условиях считается несжимаемой [6, 7].

Также, учитывая капельное орошение, мы можем внести параметры, характеризующие капли:

- $D$  - диаметр капли;
- $Q$  - расход воды через одну капельницу.

Теперь мы можем модифицировать уравнение, чтобы учесть эти параметры. Представим, что капли выходят из точечных источников с заданным расходом:

$$Q = \int_S u \cdot dS, \quad (2)$$

где  $S$  – поверхность, представляющий каплю.

Это уравнение дополним условиями на границах, начальными условиями, и, возможно, дополнительными уравнениями для моделирования особенностей капельного орошения.

### 1. Условие на границах (граничные условия):

- *Непротекающая стенка:* На границе с поверхностью почвы или другими преградами, предполагается, что скорость жидкости нормальна к границе равна нулю ( $u \cdot n = 0$ , где  $n$  – нормаль границе).
- *Выход капель из источников:* Если капли появляются в точечных источниках, то можно использовать условие на массовый поток, например, ( $u \cdot n = Q / (A \cdot \rho)$ , где  $A$  – площадь поверхности и  $\rho$  – плотность воды).
- **Начальные условия:**
- *Начальное распределение скоростей:* Зададим начальное распределение скоростей внутри системы орошения. Например, все капельницы могут начинать с нулевой скоростью.

### 2. Дополнительные уравнения для особенностей капельного орошения:

- *Уравнение для расхода воды через капельницу:* Добавим уравнение, описывающее расход воды через капельницу в зависимости от времени и диаметра капли.
- *Уравнение для изменения диаметра капли:* Если диаметр капли изменяется со временем (например, из-за испарения), учтите это в модели, включив соответствующее уравнение.

Для решения системы уравнений Навье-Стокса в такой модели потребуется использование численных методов, таких как метод конечных элементов или метод конечных объемов. Также, модель может потребовать калибровку и проверки с использованием экспериментальных данных для уточнения параметров и подтверждения ее точности.

Для описания расхода воды через капельницу в зависимости от времени ( $t$ ) и диаметра капли ( $D$ ), можно использовать уравнение, основанное на физических законах, таких как уравнение Торричелли для расхода жидкости через отверстие:

$$Q(t, D) = C \cdot A(D) \cdot \sqrt{2gh(t)},$$

где,  $Q(t, D)$  - расход воды через капельницу в момент времени  $t$  и с диаметром капли  $D$ ;

$C$  - коэффициент, учитывающий различные факторы, такие как конструкция капельницы, форма отверстия и другие параметры;

$A(D)$  - площадь поперечного сечения капельки, связанная с диаметром

$$D(A(D) = \pi \cdot \left(\frac{D}{2}\right)^2);$$

$g$  - ускорение свободного падения;

$h(t)$  - высота воды в системе капельного орошения в момент времени  $t$ .

Это уравнение предполагает, что расход воды пропорционален площади поперечного сечения отверстия и корню из высоты воды над отверстием. Коэффициент  $C$  зависит от конкретных характеристик капельницы и может быть определен экспериментально [8, 9].

Уравнение также не учитывает возможные изменения диаметра капли во времени из-за испарения и других факторов. Если такие изменения существенны, модель может потребовать дополнительных уравнений для учета этих факторов.

Приведем код программы на языке Python, который реализует расчет расхода воды в зависимости от времени и диаметра капли:

```
import math
def water_flow_rate(t, D, C, h):
    """
    Расчет расхода воды через капельницу.
    Параметры:
    - t: время (секунды)
    - D: диаметр капли (метры)
    - C: коэффициент
    - h: высота воды (метры)
    Возвращает расход воды (м³/сек).
    """
    A = math.pi * (D / 2) ** 2
    return C * A * math.sqrt(2 * 9.81 * h)
# Пример использования функции
time = 10 # время в секундах
diameter = 0.0001 # диаметр капли в метрах
coefficient = 0.61 # коэффициент (пример)
water_height = 0.5 # высота воды в системе (метры)
flow_rate = water_flow_rate(time, diameter, coefficient, water_height)
print(f"Расход воды: {flow_rate:.6f} м³/сек")
```

В этой программе функция **water\_flow\_rate** принимает параметры времени (**t**), диаметра капли (**D**), коэффициента (**C**) и высоты воды (**h**). Она использует уравнение для расчета расхода воды через капельницу и возвращает результат [10].

Обратите внимание, что значения параметров (коэффициент, диаметр капли и высота воды) должны быть настроены в соответствии с конкретными условиями заданной системы капельного орошения.

Такие численные модели требуют использования специализированных программ и метода конечных элементов, чтобы решить систему дифференциальных уравнений в данном контексте. Также, следует иметь в виду, что даже упрощенные модели такого рода могут требовать значительных вычислительных ресурсов.

## Результаты

Это уравнение описывает изменение скорости жидкости с течением времени, влияние давления, вязкости и внешних сил.

Для моделирования капельного орошения можно использовать уравнение Навье-Стокса в сочетании с дополнительными уравнениями, учитывающими поведение капель (например, уравнение движения капель в поле скорости). Такие модели позволяют описать распределение

капель в пространстве и времени, их взаимодействие с окружающей средой и другими каплями, а также поведение жидкости в целом при орошении.

Теперь рассмотрим алгоритм решения уравнений Навье-Сток для капельного орошения:

1. Определить начальные условия: скорость и распределение давления внутри капельного орошения.
2. Использовать уравнение Навье-Сток для расчета скорости и давления жидкости в каплях.
3. Учитывать вязкость и плотность жидкости, а также поверхностные напряжения на границах капель.
4. Использовать уравнение Навье-Сток для расчета течения жидкости внутри капель и вокруг них.
5. Применить граничные условия для учета взаимодействия с окружающей средой.
6. Итеративно решить систему уравнений для получения распределения скорости и давления в капельном орошении.
7. Провести анализ результатов и их интерпретацию для оптимизации процесса капельного орошения.

Этот алгоритм позволит выполнить численное моделирование процесса капельного орошения и предсказать его эффективность и равномерность распределения влаги.

### Обсуждение

Решение уравнений Навье-Стокса для моделирования капельного орошения — это сложная задача, требующая применения численных методов и компьютерного моделирования. Вот основные шаги, которые могут быть использованы для решения этой задачи:

1. **Формулировка задачи:** Определение геометрии системы орошения, типа почвы, и требуемых параметров водоснабжения.
2. **Выбор численного метода:** Наиболее распространенными методами являются метод конечных элементов (МКЭ), метод конечных разностей (МКР), и метод сеток (МС).
3. **Дискретизация области:** Разбиение области орошения на мелкие элементы или ячейки, в каждой из которых будут вычисляться параметры потока.
4. **Установление граничных условий:** Определение условий на границах области, таких как скорость воды на входе и давление на выходе.
5. **Решение уравнений:** Использование выбранного численного метода для решения уравнений Навье-Стокса в дискретизированной области.
6. **Анализ результатов:** Оценка полученных распределений скорости и давления для оптимизации системы капельного орошения.

Обычно определение геометрии системы орошения, типа почвы и требуемых параметров для капельного орошения включает в себя несколько ключевых аспектов:

1. **Геометрия системы орошения:**
  - Определение формы и размеров участка, который нужно орошать.
  - Разработка плана расположения капельных линий и магистральных трубопроводов.
  - Учет рельефа участка и необходимости создания зон с различным уровнем влажности.
2. **Тип почвы:**
  - Анализ типа почвы, так как разные типы почвы имеют разную способность к удержанию воды и скорость фильтрации<sup>3</sup>.
  - Выбор метода орошения, подходящего для конкретного типа почвы, например, для почв со средней скоростью фильтрации подойдет капельное орошение.
3. **Требуемые параметры капельного орошения:**
  - Определение потребности в воде для каждого вида растений и стадии их роста.
  - Расчет необходимого давления и расхода воды для системы<sup>5</sup>.

➤ Учет способа подачи воды (например, водопровод или насос) и его характеристик.

Эти параметры помогут создать эффективную и экономичную систему капельного орошения, которая будет обеспечивать оптимальный уровень влажности для растений и способствовать их здоровому росту и развитию. Для более точного планирования и расчетов может потребоваться консультация со специалистами в области ирригации и сельскохозяйственной инженерии.

### Заключение

В данной статье изучены вопросы разработки математической модели и алгоритма искусственного интеллекта для систем капельного орошения. В качестве математической модели для моделирования процессов в системе орошения использовано уравнение Навье-Стокса.

Численное моделирование и решение уравнение Навье-Стокса помогает оптимизировать распределение воды и повысить эффективность орошения. Подключение модуля искусственного интеллекта позволит автоматизировать процесс полива учитывая реальные факторы и состояние почвы и орошаемого участка. Проведение исследований в этой области вносит вклад в сельскохозяйственную инженерию, предлагая улучшение в управлении ресурсами воды.

### Литература

- [1] Камышова, Г.Н. моделирование нейропрогнозирующего управления дождевальными машинами = modeling of neural predictive control of irrigation machines / . — с.14- 22. — Электрон. текстовые дан. // Природообустройство / Prirodoobustrojstvo. – 2021. – Вып.
- [2] Коллекция: Журнал Природообустройство». <http://elib.timacad.ru/dl/full/gmgup-02-2021-1.pdf>.
- [3] Ковеня В.М. Разностные методы решения многомерных задач: Курс лекций. Новосибирск: Изд-во Новосиб. гос. ун-та, 2004. 146 с.
- [4] Роуч П. Вычислительная гидродинамика. – М.: Мир, 1980 – 616 с.
- [5] Самарский А.А. Теория разностных схем. – М: Наука, 1977 – 656 с.
- [6] Абдуллаев Х.Ф., Абдуллаев М. Капельное орошение и его технологические элементы // Современные научные исследования и инновации. 2021. № 8 [Электронный ресурс]. URL: <https://web.snauka.ru/issues/2021/08/96362>.
- [7] Рахимбаев Ф.М., Шукурлаев Х.И. Методические указания по проектированию системы капельного орошения., Ташкент, 1999г.
- [8] Уравнение Навье – Стокса и симуляция жидкостей. [Электронный ресурс] CUDA/Хабр. URL: <https://habr.com/ru/post/470742>
- [9] [Электронный ресурс] URL: [http://www.mpei.ru/Science/Dissertations/\\_dissertations/Dissertations/SavinAA\\_diss.pdf#1](http://www.mpei.ru/Science/Dissertations/_dissertations/Dissertations/SavinAA_diss.pdf#1)
- [10] Suv xo‘jaligi masalalarini Python dasturlash tilida yechish. Monografiya. “TIQXMMI” MTU Qarshi irrigatsiya va agrotexnologiyalar instituti. Q.2023. 122 -bet. Globe Edit nashriyoti.