



НАУЧНЫЙ
ФОРУМ
nauchforum.ru

ISSN: 2541-8394



№11(91)

**НАУЧНЫЙ ФОРУМ:
ТЕХНИЧЕСКИЕ И ФИЗИКО-
МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ**

МОСКВА, 2025



НАУЧНЫЙ ФОРУМ: ТЕХНИЧЕСКИЕ И ФИЗИКО- МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ

*Сборник статей по материалам ХСІ международной
научно-практической конференции*

№ 11 (91)
Декабрь 2025 г.

Издается с декабря 2016 года

Москва
2025

УДК 51/53+62

ББК 22+3

Н34

Председатель редакционной коллегии:

Лебедева Надежда Анатольевна – доктор философии в области культурологии, профессор философии Международной кадровой академии, член Евразийской Академии Телевидения и Радио.

Редакционная коллегия:

Мартышкин Алексей Иванович – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры «Вычислительные машины и системы» Пензенского государственного технологического университета;

Немирова Любовь Федоровна – канд. техн. наук, доц. кафедры конструирования и технологии изделий легкой промышленности, ГБОУ ВПО «Омский государственный технический университет», ООО «МИНСП»;

Старченко Ирина Борисовна – д-р техн. наук, профессор, эксперт РАН, зам. директора по учебно-научной работе, Политехнический институт (филиал) ДГТУ в г. Таганроге;

Усманов Хайрулла Сайдуллаевич – д-р техн. наук, доцент, Ташкентский институт текстильной и легкой промышленности, Республика Узбекистан, г. Ташкент.

Н34 Научный форум: Технические и физико-математические науки: сб. ст. по материалам XCI междунар. науч.-практ. конф. – № 11 (91). – М.: Изд. «МЦНО», 2025. – 86 с.

ISSN 2541-8394

Статьи, принятые к публикации, размещаются на сайте научной электронной библиотеки eLIBRARY.RU.

ББК 22+3

ISSN 2541-8394

© «МЦНО», 2025

Оглавление

Статьи на русском языке	6
Технические науки	6
Раздел 1. Технические науки	6
1.1. Безопасность деятельности человека	6
УПРАВЛЕНИЕ СОСТОЯНИЕМ ГОРНОГО МАССИВА МЕТОДОМ ПРОГНОЗА ПАРАМЕТРОВ ЗОНЫ ВОДОПРОВОДЯЩИХ ТРЕЩИН Одинцов Егор Евгеньевич	6
1.2. Информатика, вычислительная техника и управление	15
МОЗГ ДРОНА: КАК АЛГОРИТМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ЗАСТАВЛЯЮТ БПЛА ЛЕТАТЬ САМОСТОЯТЕЛЬНО Коваленко Александр Григорьевич Григоров Никита Анатольевич Бондарь Богдан Павлович	15
ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ АЛГОРИТМЫ ДЛЯ БВС: НОВЫЙ РУБЕЖ В ЭФФЕКТИВНОСТИ АВТОНОМНЫХ ПОЛЕТОВ Коваленко Александр Григорьевич Григоров Никита Анатольевич Бондарь Богдан Павлович	20
ВОССТАНОВЛЕНИЕ ПЕРВОНАЧАЛЬНЫХ ДАННЫХ ПРИ ФУНКЦИОНИРОВАНИИ СЕГМЕНТОВ ПЛАТФОРМ МЕЖДУНАРОДНОГО ИННОВАЦИОННОГО СОТРУДНИЧЕСТВА Степанова Елена Борисовна Тиренни Анастасия Юрьевна	24
КОНЦЕПЦИЯ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА АВТОТРАНСПОРТНОГО ПРЕДПРИЯТИЯ Черняков Александр Александрович Зубкова Татьяна Михайловна	30

1.3. Радиотехника и связь	38
ЛАЗЕРНАЯ СВЯЗЬ НА ДАЛЬНИЕ РАССТОЯНИЯ: ГЛУБОКИЙ АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЙ, БРОСАЮЩИХ ВЫЗОВ КОСМОСУ Григоров Никита Анатольевич	38
1.4. Строительство и архитектура	44
ОЦЕНКА НАПРЯЖЁННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ВОДОЗАЩИТНОЙ ТОЛЩИ С УЧЁТОМ РАЗУПРОЧНЕНИЯ ПОРОД Андреева Анна Владиславовна	44
ВЛИЯНИЕ СЛОИСТОСТИ ГРУНТОВОГО МАССИВА НА УСТОЙЧИВОСТЬ ЗАБОЯ ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ ТОННЕЛЕЙ МЕТРО МЕХАНИЗИРОВАННЫМИ ЩИТАМИ С ПРИГРУЗОМ ЗАБОЯ Кумов Всеволод Васильевич	49
1.5. Энергетика	56
АВТОМАТИЗАЦИЯ УПРАВЛЕНИЯ РЕЖИМОМ РАБОТЫ ЛЭП НА ОСНОВЕ РЕГУЛЯТОРА С НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКОЙ Шувалова Алёна Александровна Еременко Глеб Борисович	56
Физико-математические науки	61
Раздел 2. Механика	61
2.1. Механика деформируемого твердого тела	61
АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ ПОДХОДОВ К МОДЕЛИРОВАНИЮ ПОЛЗУЧЕСТИ ГЕОМАТЕРИАЛОВ Откупщикова Ирина Александровна	61

Раздел 3. Физика	67
3.1. Электрофизика, электрофизические установки	67
ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕКУПЕРАЦИИ ЭНЕРГИИ МАГЛЕВА	67
Кузьмин Дмитрий Александрович	
Мальцев Иван Валерьевич	
Бычков Игорь Валерьевич	
Қазақ тіліндегі мақалалар	74
Физика-математика ғылымдары	74
1-бөлім. Физика	74
1.1. Оптика	74
ОПТИКАНЫ ОҚЫТУДА ОҚУШЫЛАРДЫҢ БЕЛ-СЕНДІЛІГІН АРТТЫРУҒА АРНАЛҒАН ИНТЕРАКТИВТІ ТАП-СЫРМАЛАР	74
Бердибек Диана Бақытбекқызы	
1.2. Приборы и методы экспериментальной физики	81
ЭКСПЕРИМЕНТТІК ДӘЛЕЛДЕМЕЛЕР АРҚЫЛЫ ЭЛЕКТР ҚҰБЫЛЫСТАРЫН ТҮСІНДІРУДІҢ ТИІМДІЛІГІ	81
Сатауова Ақжүніс Талғатқызы	
Қырықбаева Әсем Ақылшақызы	

СТАТЬИ НА РУССКОМ ЯЗЫКЕ

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

РАЗДЕЛ 1.

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

1.1. БЕЗОПАСНОСТЬ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ЧЕЛОВЕКА

УПРАВЛЕНИЕ СОСТОЯНИЕМ ГОРНОГО МАССИВА МЕТОДОМ ПРОГНОЗА ПАРАМЕТРОВ ЗОНЫ ВОДОПРОВОДЯЩИХ ТРЕЩИН

Одинцов Егор Евгеньевич

аспирант,

Санкт-Петербургский горный университет

императрицы Екатерины II,

РФ, г. Санкт-Петербург

CONTROL OF THE CONDITION OF THE ROCK MASS BY PREDICTING THE PARAMETERS OF THE WATER- CONDUCTING FRACTURE ZONE

Odintsov Egor Evgenevich

PhD student,

Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University,

Russia, Saint-Petersburg

Аннотация. Горнодобывающие предприятия, ведущие отработку полезного ископаемого в сложных горно-геологических условиях регулярно сталкиваются с проблемой обеспечения геомеханической

безопасности ввиду отсутствия возможности прогнозирования распространения зоны трещинообразования над очистным пространством. На данный момент существуют прямые способы определения геометрических параметров зон водопроводящих трещин над выемочным пространством. Данные методы являются капиталоемкими инструментами, позволяющими оценить местоположение верхней границы зоны трещиноватости единомоментно, без возможности ее прогнозирования наперед. В работе предложен подход к управлению состоянием горного массива путем прогнозирования высоты зоны водопроводящих трещин, позволяющий оценить влияние горных работ на изменение геометрических параметров зон фильтрации воды, с учетом планов развития горных работ предприятия. Подход позволяет минимизировать риск техногенных аварий и обеспечить бесперебойность ведения горных работ.

Abstract. Mining enterprises operating under complex geological and geotechnical conditions routinely face the challenge of maintaining geomechanical safety due to the limited ability to predict the propagation of the water-conducting fracture zone (WCFZ) above the mined-out void. At present, only direct measurement techniques are available for determining the geometric parameters of the WCFZ. These methods are capital-intensive and provide merely a one-time identification of the upper boundary of the fractured zone, without offering any capability for forward forecasting. In this study, we propose a predictive approach for controlling the rock-mass condition by estimating the future height and extent of the WCFZ. The method enables quantitative assessment of how mining activities influence the evolution of the geometric characteristics of water-filtration pathways, taking into account the planned sequence of mine development. This predictive framework reduces the risk of technogenic geomechanical failures and ensures the safe and uninterrupted continuation of underground mining operations.

Ключевые слова: Подработка водного объекта, высота зоны техногенной трещиноватости, геомеханическая безопасность ведения горных работ.

Keywords: th undermining of a water body, height of the technogenic fracture zone, geomechanical safety of mining operations.e word; the word; the word.

Введение

На безопасность ведения горных работ на месторождениях, осложненных обильным водопритоком и наличием водных объектов в литолого-структурном разрезе месторождения, влияет большой ряд факторов. В их числе особенности геотехнологии, геодинамические и сейсмические параметры, особенности реологии, геологическое строение месторождения, организация труда и человеческий фактор [1]. Среди прочих факторов следует выделить инфильтрацию неконтролируемого водопритока через зоны трещиноватости, расположенные над очистными пространствами, генезис которых связан с особенностями техногенного воздействия от ведения горных работ. Наличие данного неконтролируемого притока воды как следствие приводит к консервации участков рудника, что влечет за собой значительный экономический ущерб [2]. Очевидно, что для управления состоянием горного массива необходимо постоянно анализировать глубину подработки водоносного горизонта. Данная глубина обусловлена высотой развития зоны водопроводящих трещин. В связи с этим, в статье предложен подход к оценке геометрических параметров зоны водопроводящих трещин по данным геомеханического мониторинга с учетом планов развития горных работ, который практически применим на месторождениях медно-никелевых руд.

Метод прогнозирования высоты зоны техногенной трещиноватости

Для наблюдения за сдвижением пород массива на руднике заложены наблюдательные станции из профильных линий реперов. Часть из них расположена на поверхности, другая часть в подрабатываемом массиве горных пород на различных горизонтах.

Установлено [3,4], что максимально возможное развитие зоны водопроводящих трещин происходит в зонах полной подработки. Для определения высоты ЗВТ необходимо определить коэффициент подработанности в месте линии разреза по простиранию для уровня (слоя) кровли очистных выработок, расположенных на глубине $H_1 = 650$ м (1)-(2):

$$N_1 = \sqrt{0.5 \cdot tg\psi_3 \cdot D_1/H_1} \quad (1)$$

$$N_1 = \sqrt{0.5 \cdot tg\psi_3 \cdot D_{D_2}/H_1} \quad (2)$$

где

Ψ_3 – угол полных сдвижений на разрезе по простиранию контура отработки;

D_1, D_2 – соответственно размер выработанного пространства на разрезе вкрест и по простиранию контура отработки.

При этом установлено [3,4], что в зоне полной подработки (при $N_1 > 1$; $N_2 > 1$) распределение максимальных вертикальных сдвижений и деформаций имеют соотношения (3)-(5) для оседаний, наклонов и кривизны:

$$\frac{\eta_1}{\eta_2} = 1 \quad (3)$$

$$\frac{i_1}{i_2} = \frac{H_2}{H_1} \quad (4)$$

$$\frac{K_1}{K_2} = \frac{H_2^2}{H_1^2} \quad (5)$$

где η_1 и η_2 – максимальные оседания соответственно на расстоянии по вертикали от контура отработки H_1 и H_2 ; i_1 , и i_2 – максимальные наклоны на том же расстоянии; K_1 , и K_2 – максимальная кривизна на тех же расстояниях.

Результаты

Степень подработки определим для направления вкрест и по простиранию по формулам (1)–(2):

$$N_1 = \sqrt{0.5 \cdot 1,428 \cdot 1716/750} = 4,1 \quad (6)$$

$$N_2 = \sqrt{0.5 \cdot 1,428 \cdot 763/750} = 0,85 \quad (7)$$

Видно, что на разрезе по простиранию зона полной подработки не достигла поверхности. При этом, в данную зону попадают реперы с 32 по 77 на разрезе вкрест простирания и с 55 по 77 на разрезе по простиранию залежи, которые относятся к наблюдательной станции на гор. -500 м. Графики, характеризующие данные натурных наблюдений за сдвижением представлены ниже (Рис.1-3).

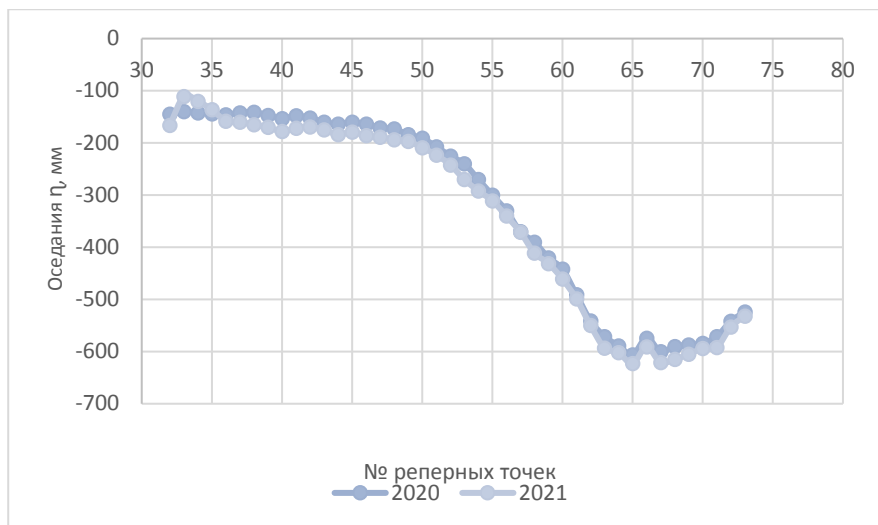


Рисунок 1. График оседаний на станции горизонт – 500 м

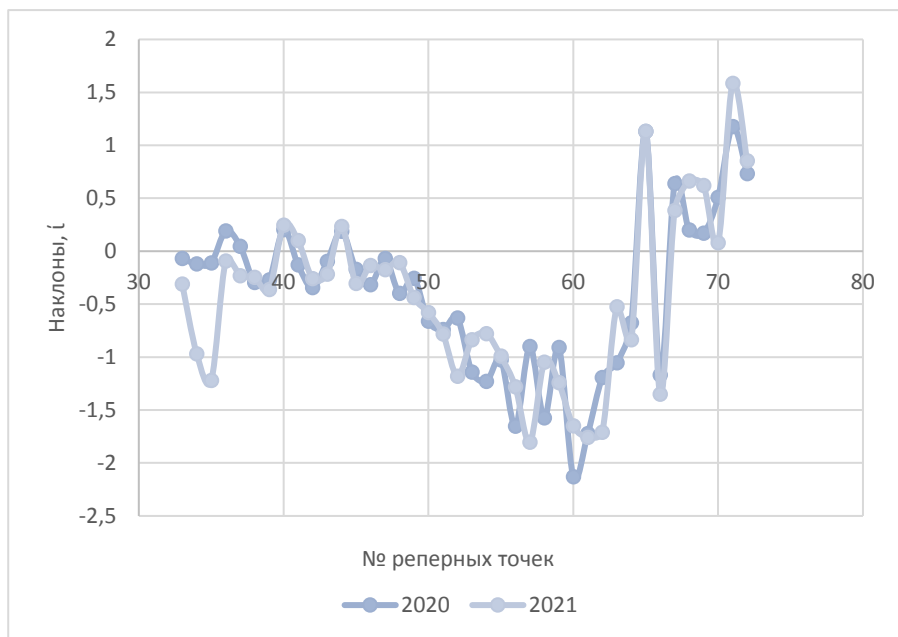


Рисунок 2. График наклонов на станции горизонт – 500 м

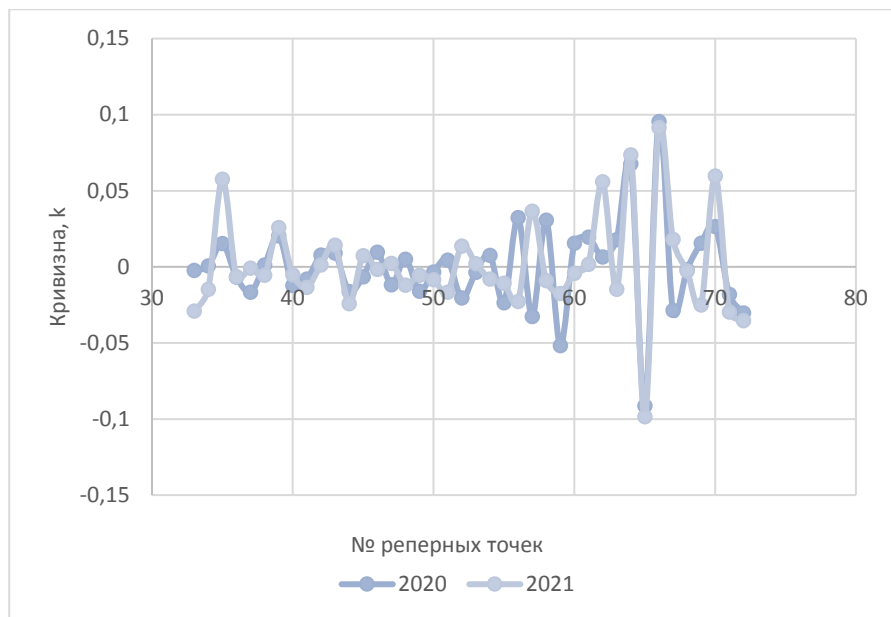


Рисунок 3. График кривизн на станции горизонт – 500 м

Выполним прогноз параметров сдвижения для уровня поверхности по приведенным данным подземной наблюдательной станции и закономерностям (3)-(5). Для расчетов примем максимальные значения параметров сдвижения для 2021 года.

Определим из (3) значение оседаний на поверхности в зоне полной подработки η_1 по данным максимальных оседаний подземной станции η_2 :

$$\eta_1 = 1 \cdot \eta_2 = 0,64 \text{ м} \quad (8)$$

При расстоянии от кровли выемочного контура до поверхности $H_1 = 651,4$ м в районе станции горизонта – 500 м и расстоянии от кровли очистного слоя до наблюдательной станции принятой $H_2 = 73,6$ м определим из (4) значение наклонов на поверхности в зоне полной подработки i_1 по данным максимальных наклонов подземной станции i_2 :

$$i_1 = \frac{H_2 \cdot i_2}{H_1} = \frac{73,6 \cdot 2,1 \cdot 10^{-3}}{651,4} = 0,2 \cdot 10^{-3}. \quad (9)$$

Определим из (5) значение кривизны на поверхности в зоне полной подработки K_1 по данным максимальных кривизн подземной станции K_2 :

$$K_1 = \frac{H_2^2 \cdot K_2}{H_1^2} = \frac{73,6 \cdot 0,1 \cdot 10^{-3}}{651,4} = 0,01 \cdot 10^{-3}, 1/\text{м}. \quad (10)$$

Расчеты показывают, что формально сдвигение и деформации поверхности отсутствуют, поскольку $i_1 < i_{\text{гр}}$ и $K_1 < K_{\text{гр}}$. Здесь $i_{\text{гр}} = 0,5 \cdot 10^{-3}$ – граничное значение наклона, $K_{\text{гр}} = 0,05 \cdot 10^{-3}$ – граничное значение кривизны, т.е. деформации в 2,5 – 5,0 раз меньше граничных значений.

Рассмотрим данный подход для расчета высоты зоны водопродвижающих трещин для горно-геологических условий месторождения медно-никелевых руд. В формуле (5) примем $H_2 = H_T$, где H_T – высота зоны водопродвижающих трещин, $K_2 = K_r$, где K_r – граничная кривизна, которая с учетом содержания пород глинистого состава в подрабатываемой толще составит $K_r = 0,8 \cdot 10^{-3} 1/\text{м}$, кривизна слоя в массиве K_1 принято исходя из максимального значения на графике $K_1 = 0,1 \cdot 10^{-3} 1/\text{м}$ (Рис. 3), $H_1 = 73,6$ м, принято расстояние от кровли контура очистных работ до местоположения наблюдательной станции. В результате высота зоны водопродвижающих трещин, образованная в результате отработки первого слоя, составит:

$$H_T = \sqrt{\frac{K_1 \cdot H_1^2}{K_r}} = \sqrt{\frac{0,1 \cdot 10^{-3} \cdot 73,6^2}{0,8 \cdot 10^{-3}}} = 26 \text{ м}. \quad (11)$$

Таким образом, значение высоты развития зоны водопродвижающих трещин для данных горно-геологических условий можно прогнозировать с учетом данных натурного наблюдения за сдвигениями массива. Предложенный подход по оценке высоты распространения зоны водопродвижающей трещиноватости позволяет определить безопасные условия ведения горных работ под водоносным горизонтом по данным геомеханического мониторинга подземной наблюдательной станции.

Обсуждение

Приведенный подход позволяет проводить оценку высоты развития зоны водопродвижающих трещин, используя закономерности распределения оседаний, наклонов и кривизны (3) – (5).

Практика показывает [5], что проблема прогнозирования развития зоны водопродвижающих трещин особенно актуальна для глубоких рудных и угольных месторождений, разрабатываемых под водными объектами или в

условиях сложной гидрогеологии. Наличие водоносных горизонтов с малой мощностью перекрывающих пород существенно повышает риски формирования гидравлической связи между выработанным пространством и поверхностными или подземными водами. Поэтому точное определение безопасной глубины разработки остаётся ключевой задачей для обеспечения геомеханической безопасности.

Данное исследование является практически применимым инструментом для оперативной оценки ситуации для месторождений полиметаллического типа и позволяет расширить опыт его применения на рудных месторождения со сложными горно-геологическими характеристиками.

Выводы

1. Установлено, что отсутствие системы оперативной оценки развития зоны трещиноватости над кровлей очистных выработок препятствует безопасному управлению кровлей массива. Предложенный способ позволяет оперативно оценить состояние кровли массива и при необходимости принять меры горной охраны рудника.

2. Ввиду того, что зона водопроводящих трещин имеет максимальное развитие в условиях полной подработки, выполнено построение данной зоны на разрезах по простиранию и вкрест простирания. Полученная зависимость высоты развития зоны водопроводящих трещин от параметров сдвижения: оседаний, наклонов и кривизн, а также от размеров зоны подработки хорошо коррелирует с существующими методами.

3. Последующее применение указанного в статье способа оценки зоны водопроводящих трещин позволит обеспечить безопасность и прогнозируемость состояния кровли массива на рудных месторождениях со сложными горно-геологическими условиями.

Список литературы:

1. Литвиненко В.С., Петров Е.И., Василевская Д.В., Яковенко А.В., Наумов И.А., Ратников М.А. Оценка роли государства в управлении минеральными ресурсами // Записки Горного института. 2023. Т. 259. С. 95-111. DOI: 10.31897/PMI.2022.100.
2. Шабаров А. Н., Куранов А. Д. Основные направления развития горнодобывающей отрасли в усложняющихся горнотехнических условиях ведения горных работ // Горный журнал. – 2023 (5). – 5-10. DOI:10.17580/gzh.2023.05.01
3. Авершин С.Г. Расчет деформаций массива горных пород под влиянием подземных разработок. – Л.: ВНИМИ. – 1960. – 87 с.

4. Гусев В. Н. Прогноз безопасных условий разработки свиты угольных пластов под водными объектами на основе геомеханики техногенных водопроводящих трещин // Записки Горного института. – 2016. – Т. 221. – С. 638–643. DOI 10.18454/PMI.2016.5.638.
5. Ren S., Cui F., Zhao S., Cao J., Bai J. et al. Investigation of the Height of Fractured Water-Conducting Zone: A Case Study // Geotechnical and Geological Engineering. 2021. Vol. 39. P. 3019–3031.

1.2. ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

МОЗГ ДРОНА: КАК АЛГОРИТМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ЗАСТАВЛЯЮТ БПЛА ЛЕТАТЬ САМОСТОЯТЕЛЬНО

Коваленко Александр Григорьевич

*канд. техн. наук,
преподаватель,
Военная академия воздушно-
космической обороны
имени маршала советского союза Г.К. Жукова,
РФ, г. Тверь*

Григорьев Никита Анатольевич

*курсант,
Военная академия воздушно-
космической обороны
имени маршала советского союза Г.К. Жукова,
РФ, г. Тверь*

Бондарь Богдан Павлович

*курсант,
Военная академия воздушно-
космической обороны
имени маршала советского союза Г.К. Жукова,
РФ, г. Тверь*

THE DRONE'S BRAIN: HOW AUTOMATIC CONTROL ALGORITHMS MAKE UAVS FLY ON THEIR OWN

Alexander Kovalenko

*Candidate of Technical Sciences,
University teacher,
Military Academy of Aerospace Defense named
after Marshal of the Soviet Union G.K. Zhukov,
Russia, Tver*

Nikita Grigorov

*Cadet,
Military Academy of Aerospace Defense named
after Marshal of the Soviet Union G.K. Zhukov,
Russia, Tver*

Bogdan Bondar

*Cadet,
Military Academy of Aerospace Defense named
after Marshal of the Soviet Union G.K. Zhukov,
Russia, Tver*

Аннотация. В статье раскрывается ключевая роль алгоритмов автоматического управления в работе беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). Рассматривается структура системы управления, от базовых ПИД-регуляторов до современных подходов с использованием нейросетей и адаптивных методов. Описаны задачи стабилизации, следования по маршруту и обхода препятствий, а также перспективы развития отрасли, включая управление роем дронов.

Abstract. The article reveals the key role of automatic control algorithms in the operation of unmanned aerial vehicles (UAVs). It examines the structure of the control system, from basic PID controllers to modern approaches using neural networks and adaptive methods. The article describes the tasks of stabilization, route following, and obstacle avoidance, as well as the prospects for the development of the industry, including the management of drone swarms.

Ключевые слова: беспилотные летательные аппараты, комплекс алгоритмов, оптимизация полёта.

Keywords: unmanned aerial vehicles, a complex of algorithms, flight optimization.

Беспилотные летательные аппараты (БПЛА) давно перестали быть просто дорогими игрушками. Сегодня они выполняют сложнейшие задачи: от картографии и мониторингования линий электропередач до доставки грузов и ведения разведки. За кажущейся легкостью их полета скрывается сложная математика и целый комплекс алгоритмов автоматического управления, которые и являются настоящим «мозгом» дрона. Именно эти алгоритмы превращают набор датчиков и моторов в интеллектуальную систему, способную ориентироваться в пространстве и выполнять команды.

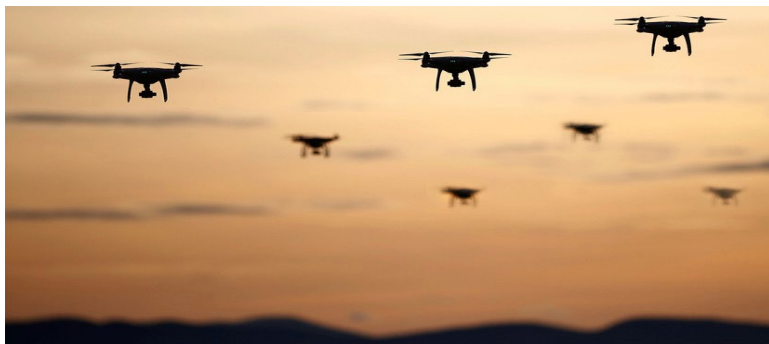


Рисунок 1. Беспилотные летательные аппараты (БПЛА)

Зачем нужна автоматизация?

Представьте, что оператору приходилось бы вручную регулировать каждое движение дрона: крен, тангаж, рыскание, высоту, учитывая при этом ветер и другие помехи. Это практически невозможно. Автоматическое управление решает ключевые задачи:

1. Стабилизация. Удержание дрона в заданном положении и ориентации, несмотря на внешние возмущения (порывы ветра).
2. Следование по маршруту. Точное перемещение между заданными точками (waypoints).
3. Выполнение миссий. Автономный взлет, посадка, облет препятствий, слежение за объектом.
4. Энергоэффективность. Оптимизация полета для максимального времени в воздухе.

Структура системы автоматического управления

Система управления БПЛА строится по классическому принципу ПИД-регулирования и состоит из нескольких контуров:

- Внутренний контур (угловой). Самый быстрый контур. Отвечает за стабилизацию углового положения дрона – крена, тангажа и рыскания. Он напрямую управляет моторами, чтобы парировать малейшие отклонения.
- Внешний контур (скоростной/позиционный). Более медленный контур. Принимает от оператора или полетного задания команды «лети вперед», «поднимись на высоту 100 м» или «держи позицию». Он преобразует эти команды в целевые углы и скорости для внутреннего контура.

Вся эта система работает на основе данных с датчиков, объединенных в инерциальную измерительную систему (IMU): акселерометров, гироскопов, а иногда и магнитометров.

Ключевые алгоритмы и методы управления

1. ПИД-регулятор: основа основ.

Пропорционально-интегрально-дифференциальный (ПИД) регулятор – это самый распространенный алгоритм в системах управления дронами. Его работа проста и гениальна: он вычисляет управляющее воздействие как сумму трех компонентов:

- Пропорциональная составляющая (P): Реагирует на текущую ошибку. Например, если дрон отклонился от заданной высоты, он начнет увеличивать тягу пропорционально этому отклонению.
- Интегральная составляющая (I): «Помнит» прошлые ошибки. Нужна для компенсации постоянных возмущений (например, постоянного ветра), которые П-регулятор не может устранить.
- Дифференциальная составляющая (D): Предсказывает будущее поведение ошибки, учитывая ее скорость изменения. Это предотвращает «раскачку» дрона и делает движение плавным.

Настройка коэффициентов ПИД-регулятора – это искусство, от которого напрямую зависит стабильность и отзывчивость дрона.

2. Нейросети и адаптивное управление.

ПИД-регулятор эффективен, но он требует точной настройки под конкретную модель дрона и не всегда хорошо справляется с резко меняющимися условиями (например, повреждением винта или сильным турбулентным потоком).

Здесь на помощь приходят более сложные алгоритмы:

- Адаптивное управление: Эти алгоритмы способны в реальном времени подстраивать свои параметры под изменяющиеся характеристики дрона или внешней среды. Например, если дрон теряет груз, адаптивный контроллер перенастроится, чтобы компенсировать изменение массы.
- Нейросетевые контроллеры: Искусственные нейронные сети можно обучить на данных полетов, чтобы они научились предсказывать оптимальное управляющее воздействие. Это особенно полезно для компенсации нелинейных эффектов и сложных атмосферных явлений, которые трудно описать классическими уравнениями.

3. Планирование траектории и обход препятствий.

Автономный полет – это не только стабилизация, но и умение строить маршрут. Алгоритмы планирования траектории, такие как RRT (Rapidly-exploring Random Tree Star)* или A*, позволяют дрону

находить оптимальный путь из точки А в точку Б в сложной среде с препятствиями.

В связке с ними работают системы компьютерного зрения и лидары, которые в реальном времени строят карту окружения (SLAM – Simultaneous Localization and Mapping) и передают данные в алгоритмы обхода препятствий.

Проблемы и будущее алгоритмов управления

Несмотря на впечатляющие успехи, разработчики сталкиваются с рядом вызовов:

- Надежность и отказоустойчивость. Алгоритмы должны гарантировать безопасный полет даже при отказе одного из датчиков или двигателей.
- Работа в условиях неопределенности. Сильный ветер, плохая видимость, магнитные помехи – все это требует от алгоритмов большой «прочности».
- Роевое (Swarm). Управление группой дронов – это новая frontier. Алгоритмы должны обеспечивать слаженные действия десятков аппаратов без взаимных столкновений.

Будущее за гибридными системами, которые комбинируют надежность классических ПИД-регуляторов с гибкостью и интеллектом нейросетей и адаптивных методов. Машинное обучение будет играть все большую роль, позволяя дронам не просто выполнять программу, а учиться на собственном опыте и адаптироваться к непредсказуемым условиям.

Алгоритмы автоматического управления – это невидимая, но абсолютно необходимая сила, стоящая за каждым автономным полетом БПЛА.

От простейшего ПИД-регулятора, стабилизирующего коптер в воздухе, до сложных нейросетей, позволяющих рою дронов строить сложные фигуры, – эти математические модели являются ключом к настоящей автономии. Именно их развитие определит, как далеко смогут зайти беспилотные технологии в ближайшие годы, открывая двери для совершенно новых применений, о которых мы пока только мечтаем.

Список литературы:

1. Sebastian Thrun, Wolfram Burgard, Dieter Fox: "Probabilistic Robotics".
2. Steven L. Brunton, J. Nathan Kutz: "Data-Driven Science and Engineering: Machine Learning, Dynamical Systems, and Control".
3. Dale R. Lennon, J. David Powell: "Aircraft Control and Simulation: Dynamics, Controls Design, and Autonomous Systems".

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ АЛГОРИТМЫ ДЛЯ БВС: НОВЫЙ РУБЕЖ В ЭФФЕКТИВНОСТИ АВТОНОМНЫХ ПОЛЕТОВ

Коваленко Александр Григорьевич

*канд. техн. наук, преподаватель,
Военная академия воздушно-космической
обороны имени маршала советского
союза Г.К. Жукова,
РФ, г. Тверь*

Григоров Никита Анатольевич

*курсант,
Военная академия воздушно-космической
обороны имени маршала советского
союза Г.К. Жукова,
РФ, г. Тверь*

Бондарь Богдан Павлович

*курсант,
Военная академия воздушно-космической
обороны имени маршала советского
союза Г.К. Жукова,
РФ, г. Тверь*

INTELLIGENT ALGORITHMS FOR UAVS: A NEW FRONTIER IN AUTONOMOUS FLIGHT EFFICIENCY

Alexander Kovalenko

*Candidate of Technical Sciences,
University teacher,
Military Academy of Aerospace Defense
named after Marshal of the Soviet Union G.K. Zhukov,
Russia, Tver*

Nikita Grigorov

*Cadet,
Military Academy of Aerospace Defense
named after Marshal of the Soviet Union G.K. Zhukov,
Russia, Tver*

Bogdan Bondar

*Cadet,
Military Academy of Aerospace Defense
named after Marshal of the Soviet Union G.K. Zhukov,
Russia, Tver*

Аннотация. Статья посвящена разработке интеллектуальных алгоритмов автоматического управления для беспилотных воздушных судов (БВС). Рассматривается переход от простого следования по маршруту к комплексным системам, включающим модули восприятия среды, адаптивного планирования траектории и координации в группе. Особое внимание уделяется практическим выгодам внедрения таких алгоритмов: повышению операционной эффективности, снижению затрат и увеличению безопасности. Также обозначены ключевые вызовы, такие как вычислительная сложность и нормативное регулирование.

Abstract. The article focuses on the development of intelligent automatic control algorithms for unmanned aerial vehicles (UAVs). It explores the transition from simple route following to complex systems that include modules for environment perception, adaptive trajectory planning, and group coordination. The article emphasizes the practical benefits of implementing such algorithms, including improved operational efficiency, reduced costs, and enhanced safety. It also highlights key challenges, such as computational complexity and regulatory considerations.

Ключевые слова: беспилотное воздушное судно, алгоритм, планирование, вызовы, системы управления.

Keywords: unmanned aerial vehicle, algorithm, planning, challenges and control systems.

Беспилотные воздушные суда (БВС) прочно вошли в арсенал современных технологий, найдя применение от логистики и сельского хозяйства до разведки и мониторинга. Однако по-настоящему революционный потенциал БВС раскрывается только с переходом от дистанционного пилотирования к продвинутой автономии. Ключ к этому переходу – создание sophisticated алгоритмов автоматического управления, способных не просто выполнять заранее заданный план, а адаптироваться к динамичной среде и принимать оптимальные решения в реальном времени.



Рисунок 1. Беспилотные воздушные суда (БВС)

От линейных сценариев к адаптивному интеллекту

Традиционные системы управления БВС часто основаны на следовании по заранее простроенному маршруту (waypoints). Такой подход уязвим: непредвиденные препятствия, изменение погодных условий или внезапное появление новых целей сводят на нет эффективность миссии.

Современный алгоритм автоматического управления – это сложный программный комплекс, построенный на нескольких ключевых модулях:

1. Восприятие и анализ окружающей среды. С помощью данных с лидаров, камер, радаров и других сенсоров алгоритм в реальном времени строит 3D-карту окружения. Используя методы компьютерного зрения и машинного обучения, он идентифицирует статические и динамические объекты, классифицируя их уровень угрозы и прогнозируя траекторию движения.

2. Планирование и перепланирование траектории. На основе карты окружения и глобальной цели миссии алгоритм вычисляет оптимальный путь. Критериями оптимальности являются не только краткость, но и безопасность, энергоэффективность и минимизация времени. При появлении новых данных (например, внезапного препятствия) система мгновенно пересчитывает маршрут, обеспечивая непрерывность выполнения задачи. Здесь используются такие методы, как алгоритмы A* (A-star), RRT* (Rapidly-exploring Random Tree) и их производные.

3. Координация в группе (роевое поведение). Максимальная эффективность достигается при работе не одиночного дрона, а целой группы – роя. Алгоритм управления роем должен решать задачи:

- Распределения ролей: автоматическое назначение целей для каждого БПЛА исходя из его местоположения и оснащения.
- Синхронизации: обеспечение согласованного движения группы.
- Самовосстановления: если один из дронов вышел из строя, его задачи автоматически перераспределяются между другими участниками группы.

Принятие решений на основе ИИ. Это «мозг» системы. Используя reinforcement learning (обучение с подкреплением) или нейросетевые модели, алгоритм обучается выбирать наилучшие действия в сложных и неоднозначных ситуациях. Например, при доставке груза в городской среде дрон должен решить: облететь здание справа или слева, учитывая ветер, наличие других дронов и ограничения по заряду батареи.

Практические выгоды от внедрения интеллектуальных алгоритмов

1. Повышение операционной эффективности. Автономные системы работают 24/7, не подвержены усталости и человеческому фактору. Это позволяет сократить время выполнения миссий на 20-40% за счет оптимизации маршрутов и группового взаимодействия.

2. Снижение затрат. Экономия на операторах, меньший износ оборудования за счет плавных и безопасных траекторий, оптимизация расхода энергии – прямые финансовые преимущества.

3. Увеличение надежности и безопасности. Алгоритм способен реагировать на угрозы быстрее человека. Это критически важно для предотвращения столкновений в воздухе, особенно в условиях плотного городского трафика (UAV Traffic Management – UTM).

4. Масштабируемость. Управление одним дроном и сотней с алгоритмической точки зрения – задача одного порядка сложности. Это открывает дорогу для масштабных проектов, таких как мониторинг протяженных объектов (трубопроводов, ЛЭП) или доставка грузов в рамках целого города.

Вызовы и будущее развитие

Несмотря на впечатляющие перспективы, создание таких алгоритмов сопряжено с вызовами:

- **Вычислительная сложность.** Реализация в реальном времени требует мощных и одновременно энергоэффективных бортовых компьютеров.

- **Безопасность и киберзащита.** Алгоритмы должны быть защищены от взлома и внешних помех.

- **Нормативно-правовая база.** Законодательство пока не поспевает за технологиями, особенно в вопросах полной автономии и принятия решений без участия человека.

Будущее развитие лежит в области создания гибридных интеллектуальных систем, где алгоритмы будут тесно взаимодействовать с человеком-оператором, который ставит стратегические задачи и осуществляет общий контроль. Дальнейшая интеграция с технологиями Интернета Вещей (IoT) и данными из облачных сервисов позволит алгоритмам учитывать еще больше контекстной информации, например, пробки на дорогах или расписание общественного транспорта для логистических дронов.

Список литературы:

1. Randal W. Beard, Timothy W. McLain. "Small Unmanned Aircraft: Theory and Practice".
2. Steven M. LaValle. "Planning Algorithms".
3. Kevin M. Lynch, Frank C. Park. "Modern Robotics: Mechanics, Planning, and Control".

ВОССТАНОВЛЕНИЕ ПЕРВОНАЧАЛЬНЫХ ДАННЫХ ПРИ ФУНКЦИОНИРОВАНИИ СЕГМЕНТОВ ПЛАТФОРМ МЕЖДУНАРОДНОГО ИННОВАЦИОННОГО СОТРУДНИЧЕСТВА

Степанова Елена Борисовна

канд. физ. – мат. наук,

доц., руководитель группы Интегрированные системы,

Национальный исследовательский

ядерный университет МИФИ,

РФ, г. Москва

Тиренни Анастасия Юрьевна

д-р хим. наук,
группа Интегрированные системы,
выпускник аспирантуры Национального
исследовательского ядерного университета МИФИ,
РФ, г. Москва

INITIAL DATA RESTORATION IN INTERNATIONAL INNOVATIVE COLLABORATION PLATFORM SEGMENTS

Stepanova Elena Borisovna

Candidate of Science,
Integrated Systems Group, associate Professor,
National Research Nuclear University
MEPHI Moscow Engineering Physics Institute,
Russia, Moscow

Tirenni Anastassia Yurievna

Doctor of Natural Sciences,
Integrated Systems Group, PhD graduates,
National Research Nuclear University
MEPHI Moscow Engineering Physics Institute,
Russia, Moscow

Аннотация. Для анализа возможности восстановить первичные, до обработки, подлинные данные, связанные с сегментами платформы инновационного взаимодействия, а также для принятия решений по поддержке функционирования выделенных сегментов платформ на основе первичных данных применен математический аппарат матричной алгебры. Разработан комплекс процессных моделей отчетов для типовых сегментов и модель консолидированного отчета в целом для платформы с визуализацией в концепции Architecture of Integrated Systems (ARIS). Показано, что ряд операций обработки данных не позволяет впоследствии восстановить первичные данные, а при обнаружении такой обработки данных невозможно сделать вывод о целесообразности продолжения интеграции сегмента.

Abstract. To analyze the possibility of restoration primary, authentic data associated with innovative interaction platform segments, as well as to use primary data in constructing decisions to support functionality of the selected platform segments, mathematical apparatus of matrix algebra was used. Consolidated report process model for complex of various platform

segments with visualization in the Architecture of Integrated Systems (ARIS) concept developed. It was shown that a number of data processing operations do not allow the subsequent primary data restoration, and when such data processing is detected, it is impossible to draw a conclusion about the feasibility to continue the segment integration.

Ключевые слова: распределенные информационные системы, инновационные проекты, платформа, моделирование, визуализация аналитических моделей, многопараметрические данные, матричная алгебра, прямая и обратная задачи, восстановление данных, международное сотрудничество.

Keywords: distributed information systems, innovative projects, platform, modeling, analytical models visualization, multi parameter data, matrix algebra, direct and inverse tasks, data restoration, and international cooperation.

Платформы распределенных международных проектов в области международного инновационного сотрудничества объединяют малые и средние бизнес-структуры, сегменты Start-up, In-sourcing, Out-sourcing, а также, как отмечалось в работе [1, с. 8], важны сегменты, поддерживающие ведение образовательных программ и научных задач в кооперации с университетами.

Тот факт, что персонал платформ являются выпускниками различных университетов и имеют разные родные языки, обуславливает интерес в первую очередь к описанию и моделированию матрицы ключевых процессов функционирования сегментов. А также к разработке аналитических моделей и наглядных визуализаций, что обсуждается как в методологических, так и в практических исследованиях [2, с. 322; 3, с.378].

Надо подчеркнуть, что для описания платформы, как информационно-аналитической среды повышенного уровня сложности, только разработки и ведение репозитория с комплексом моделей ключевых бизнес-процессов, связанных с основными целями функционирования, недостаточно.

Важно отметить, что речь идет не о повторяющихся, типовых процессах, отвечающих требованиям Workflow. А именно об описании нового инновационного продукта.

Специфика целевых платформ обуславливает тот факт, что для управления сегментами и всей платформой необходимо не только иметь среднестатистические данные по каждому сегменту, или сравнение отдельных параметров в описаниях с аналогичными в других платформенных решениях, но важно располагать детальной информацией

о первоначальных данных.

То есть не прогнозными значениями, не средними, не с поправками на различные коэффициенты, связанные с факторами представления информации, или рейтингами. Оперировать не усредненными значениями, а иметь возможность восстановить картину первоначальных данных, связанных с одним или несколькими выбранными сегментами.

Отчет о проделанной работе и/или освоенных средствах на развитие сегмента представляется в виде таблиц. Многоуровневые структурированные отчеты, которые должны быть обработаны, оператору затруднительно рассматривать в виде большого набора бинарных таблиц. Неизбежны точки повышенного риска операторов и неточной информации для управления. Поэтому был разработан комплекс процессных моделей отчета для отдельных типовых в рамках целевой функции платформы сегментов; сформирована процессная модель консолидированного отчета по деятельности нескольких различных сегментов. Комплекс процессных моделей представлен с визуализацией в концепции Architecture of Integrated Systems (ARIS). Как в активном, так и с пассивном виде модель может быть элементом рабочего стола сотрудника, позволяя иметь наглядную картину работы коллектива.

В случаях, когда сервис описывается небольшим числом ключевых бизнес-процессов, для моделирования отчета целесообразно применять дискретное описание величин, линейный оператор. Предположения модели следующие:

- предварительной обработки, такой как суммирование, фильтрование, линейные или нелинейные операции для первоначальных данных не выполнялось;
- также предварительной обработке не подвергались данные, входящие в функциональный оператор;
- имеется функциональная зависимость отчетности от первоначальных данных.

Можно показать, что в случае, если для генерации модели отчета применены мультипликативный оператор константа и аддитивный параметр константа или вектор определенной размерности, то прямая задача решается, отчетность однозначно определяется начальными данными. Восстановление первоначальных данных, то есть обратная задача, также решается при условии, что мультипликативный оператор не принимает нулевых значений и аддитивный параметр, вектор или матрица, известен. Качество и целостность данных сохраняются. Это фактически базовые бухгалтерские операции, то есть процессы WorkFlow, повторяющиеся, они не являются целью данного анализа.

Акцент в данной работе на многопараметрических данных, которые

имеются в системах повышенного уровня сложности. При генерации модели отчета мультипликативный оператор представляет собой уже не константу, а невырожденную матрицу. Прямая задача решается и отчетность однозначно определяется первоначальными данными. Обратная задача, то есть восстановление первичной структуры данных, возможна, только если для мультипликативного оператора – матрицы прямого преобразования существует обратная матрица. Отметим, что в этом случае уже проявляется условие, при котором восстановление первоначальных данных невозможно.

Теперь перейдем к случаю, когда мультипликативный оператор – матрица и эта матрица вырождена. В этом случае обратная задача невозможна, первоначальные данные не поддаются восстановлению. Применение простого и вероятностного суммирования присутствует, если использованы прогнозные алгоритмы, сравнительный анализ, элементы внутреннего и внешнего бэнч-маркинга, то есть сравнения с процессами в данной области деятельности или в смежных областях, вычислялся рейтинг и именно эти данные сохранены, они замещают первоначальные данные. При простом суммировании и прямая и обратная задачи проходят. А вот при вероятностном суммировании для обратной задачи, то есть восстановления первоначальных данных, потребуются дополнительные сведения о типе распределения данных и вероятностных коэффициентах.

Таким образом, соединение воедино выводов на основе математического аппарата матричной алгебры для различных случаев обработки данных показывает, что могут быть выделены ситуации, когда применение ряда видов обработки делает невозможным восстановление первоначальных данных. На основании анализа возможности восстановления первоначальных данных, лежащих в основе отчетов о работе сегментов, можно сформулировать набор требований к участникам процессов на платформе. Некоторые из процедур обработки данных могут быть запрещены, поскольку прошедшие нелинейную обработку данные при составлении отчета могут вызвать невозможность обратиться к исходным первоначальным данным, которые имелись до обработки информации об инновационной работе в рамках конкретного сегмента.

Такой подход позволяет сделать вывод о наличии целевого, или не в полном объеме целевого расходования средств, сформулировать рекомендации по развитию наукоемкого бизнеса, и дать обоснованные заключения о целесообразности дальнейшего финансирования подвергавшихся анализу бизнес-структур или инновационных сегментов. Если выявляется обработка данных, не позволяющая впоследствии восстановить их первоначальный вид, на такой Web-

сегмент может быть обращено требование о раскрытии документов и/или принято решение об окончании работы сегмента в составе платформы.

Разработан адаптированный для студентов специалитета и магистратуры материал. Применялся более 3 лет. Студентами проявлен интерес как к теоретической части, так и к примерам обнаружения в платформах различного назначения ситуаций, когда часть информации после составления отчета сторнировалась, а восстановить первоначальные данные уже после замещения исходной картины на отчет оказывалось невозможным.

Список литературы:

1. Нофаль А., АбуДан А.Ф.Ф., Тиренни А.Ю. Платформа интеллектуального взаимодействия как метод укрепления международного сотрудничества. / В книге: Актуальные проблемы общества, экономики и права в контексте глобальных вызовов. Сборник материалов Международной научно-практической конференции. Махачкала, 2021. С. 6-12.
2. Степанова Е.Б., АбуДан Абир Фатхи Фадел, Тиренни А.Ю. Описание и моделирование процессов обработки многопараметрических данных в международных проектах. / Труды научных конференций ГНИИ "Нацразвитие". 2019. С. 321-323.
3. Баркалов С.А., Бурков В.Н., Перевалова О.С., Аверина Т.А. Механизм принятия решения в цифровой экономике / Труды 3-й Всероссийской с международным участием научно-практической конференции «Тенденции развития интернет и цифровой экономики» (Симферополь, 2020). Симферополь-Алушта: ИП Зуева Т.В., 2020. С. 12-16.

КОНЦЕПЦИЯ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА АВТОТРАНСПОРТНОГО ПРЕДПРИЯТИЯ

Черняков Александр Александрович

аспирант,
Оренбургский государственный
университет,
РФ, г. Оренбург

Зубкова Татьяна Михайловна

д-р техн. наук, проф.,
Оренбургский
государственный университет,
РФ, г. Оренбург

CONCEPT OF A DIGITAL TWIN OF A MOTOR TRANSPORT ENTERPRISE

Chernyakov Alexander Alexandrovich

Postgraduate,
Orenburg State University,
Russia, Orenburg

Zubkova Tatiana Mikhailovna

Doctor of Technical Sciences, Professor,
Orenburg State University,
Russia, Orenburg

Аннотация. В статье представлен обзор отечественных исследований в области цифровых двойников и их применения в промышленности. На основе анализа научных публикаций обобщены ключевые определения, характеристики и структурные компоненты цифрового двойника. Особое внимание уделено возможностям использования цифровых двойников в автотранспортной отрасли. Предложена абстрактная концепция цифрового двойника автотранспортного предприятия, включающая основные уровни данных и функциональные модули. Сформулированы выводы о перспективах внедрения технологии и направлениях дальнейших исследований.

Abstract. This article presents an overview of Russian research on digital twins and their application in industry. Based on an analysis of

scientific publications, the key definitions, characteristics, and structural components of a digital twin are summarized. Particular attention is paid to the potential use of digital twins in the automotive industry. An abstract concept of a digital twin for an automotive company is proposed, including key data levels and functional modules. Conclusions are drawn regarding the prospects for implementing this technology and areas for further research.

Ключевые слова: цифровой двойник; цифровая модель; цифровизация; автотранспортное предприятие; интеллектуальные системы; мониторинг технического состояния; анализ данных; предиктивная аналитика; жизненный цикл; цифровая среда.

Keywords: digital twin; digital model; digitalization; motor transport enterprise; intelligent systems; technical condition monitoring; data analysis; predictive analytics; life cycle; digital environment.

Введение

Цифровой двойник (Digital Twin, DT) представляет собой одно из наиболее перспективных направлений в области IT-технологий, активно развиваемое в контексте цифровой трансформации предприятий и совершенствования процессов управления и принятия решений в различных отраслях экономики. Несмотря на то, что концепция цифрового двойника была предложена почти два десятилетия назад, она продолжает динамично развиваться, охватывая всё более широкий спектр областей применения и приобретая новые формы реализации. Подобная эволюция приводит к расширению трактовок и определений данного понятия, что, в свою очередь, вызывает риск размывания исходной концепции и снижает эффективность практического внедрения технологии в прикладных решениях.

Современные процессы цифровизации предполагают необходимость формирования и использования цифровых моделей, которые в научной литературе и инженерной практике обозначаются как цифровые двойники (ЦД). Такие модели представляют собой формализованный набор знаний о реальных объектах, системах и процессах [2].

Однако существующее многообразие интерпретаций и подходов к проектированию цифровых двойников актуализирует задачу уточнения их сущностных характеристик и функциональных свойств. Без четкого определения подобного рода параметров затруднено формирование архитектурных принципов и реализация эффективных механизмов внедрения данной технологической платформы в производственную и управленческую практику [1].

На современном этапе одним из ключевых проблемных аспектов исследований в области цифровых двойников является отсутствие единообразия в определении базовых понятий, компонентного состава и характеристик ЦД. Данная неопределенность порождает противоречия в теоретических исследованиях и усложняет практическую реализацию цифровых двойников на уровне предприятий и бизнес-приложений. В представленной статье, на основе анализа актуальных научных источников, предпринята попытка уточнить сущность и содержание концепции цифрового двойника, определить его архитектурную структуру, а также рассмотреть роль имитационной модели в общей архитектуре ЦД.

Основные направления использования цифрового двойника

Настоящий обзор посвящён анализу научных исследований, рассматривающих концепцию цифрового двойника и её взаимосвязь с технологиями имитационного моделирования. В рамках работы было отобрано и проанализировано 11 актуальных научных источников, опубликованных за последние четыре года. На основании собранного материала проведено исследование теоретических аспектов развития концепции цифрового двойника по следующим направлениям: определение сущности ЦД, выделение его ключевых характеристик, идентификация базовых компонентов, а также установление взаимосвязей между цифровым двойником и имитационным моделированием.

Анализ современного состояния исследований в области цифровых двойников показывает значительное разнообразие в трактовке самого понятия, а также в подходах к построению архитектуры и определению роли имитационного моделирования в структуре цифрового двойника. В нижеприведенной автором статьи таблице представлены основные направления интерпретации концепции цифрового двойника по результатам анализа наиболее цитируемых научных публикаций за 2022–2024 гг.

Таблица 1.

Основные интерпретации концепции цифрового двойника

Автор, год	Объект исследования	Определение ЦД	Основные компоненты / слои	Роль имитационного/моделирующего модуля
Гостева О.В., Пацук О.В., 2023 («Особенности применения цифровых двойников на	Российские промышленные предприятия	Цифровой двойник – технология, включающая кибер-физическую оболочку	Датчики → цифровая модель → аналитика → управление	Модель используется для прогнозирования и проектирования производственных процессов.

Автор, год	Объект исследования	Определение ЦД	Основные компоненты / слои	Роль имитационного/моделирующего модуля
российских промышленных предприятиях») [3]		предприятия с мониторингом, анализом и управлением.		
Цыганов В.Н., 2024 («Влияние цифровых двойников на улучшение производственных процессов...») [4]	Улучшение производственных процессов	ЦД – виртуальный аналог физического объекта или процесса, применяемый для повышения эффективности.	Цифровая модель, виртуализация, интеграция данных	Моделирующий компонент рассматривается как средство оценки и обоснования экономической эффективности.
Минзов А.С. и др., 2024 («Цифровые двойники в системах управления») [5]	Критические информационные инфраструктурные	ЦД – интегрированная система управления, включающая цифровую реплику физического объекта и механизм взаимодействия.	Классификация, модель взаимодействия, слои связи	Модели служат для симуляции взаимодействия физической и цифровой структур, сценарного анализа.
Боровков А.И. и др., монография 2022 («Цифровые двойники в высокотехнологичной промышленности») [1]	Высокотехнологичное производство	Цифровой двойник как часть производственной системы – виртуальная реплика с жизненным циклом объекта.	Жизненный цикл, данные, модели, сервисы, интеграции	Симуляции и модели охватывают весь жизненный цикл, используются для прогнозирования и оптимизации.
Окен К.А., 2023 («Эффективность цифрового проектирования (технология «цифровой двойник»)») [6]	Предприятия высокотехнологичных отраслей	ЦД рассматривается как технологическая платформа цифрового проектирования и моделирования предприятия	Цифровое проектирование, модель, внедрение, эффект	Моделирующий компонент рассматривается как средство цифрового проектирования и оценки выгод.

Сравнительный анализ российских публикаций показывает следующие ключевые особенности и тенденции.

Во всех рассматриваемых источниках цифровой двойник понимается как динамическая цифровая реплика физического объекта или процесса с возможностями мониторинга, анализа и управления, что согласуется с зарубежными трактовками, но с национальным акцентом на промышленность и производственные системы.

Компонентный состав обычно включает в себя: сбор данных / датчики, цифровую модель, аналитику и сервисы управления. Указание на имитационные / симуляционные модули встречается реже, однако присутствует в некоторых работах, где моделирование употребляется как инструмент проектирования и прогнозирования [4; 5].

Отмечается, что российские исследования уделяют больше внимания экономическому и внедренческому аспекту: оценке выгоды, проектированию систем, цифровой зрелости предприятий.

При этом, остаётся недостаточно чётко определена структура и границы модели цифрового двойника. Например, не всегда ясно, где заканчивается цифровая модель и начинается полноценный цифровой двойник, а также как именно реализуется симуляция и её связь с реальным объектом.

Также прослеживается пробел: формализация требований к моделям (точность, обновление, калибровка) и стандартизация архитектурных решений, которая на уровне российского промышленного применения недостаточно разработана.

Концептуальная модель цифрового двойника автотранспортного предприятия

Современные автотранспортные предприятия функционируют в условиях высокой динамики рыночных процессов, усложнения логистических цепочек и необходимости постоянного повышения эффективности использования транспортных ресурсов. В этих условиях особую актуальность приобретает создание единого цифрового контура, обеспечивающего интеграцию данных о транспортных средствах, производственных процессах и инфраструктуре. В качестве методологической основы для построения такого контура выступает концепция цифрового двойника автотранспортного предприятия (ЦД АТП).

Цифровой двойник автотранспортного предприятия может быть определён как интегрированная динамическая цифровая модель, отражающая текущее состояние, структуру, процессы и взаимосвязи всех ключевых элементов транспортной системы предприятия в реальном или близком к реальному времени. Основное назначение ЦД АТП заключается в обеспечении поддержки управленческих и производственных решений посредством анализа, прогнозирования и оптимизации процессов эксплуатации автотранспортных средств, технического обслуживания, логистики и ресурсного планирования.

С точки зрения архитектуры, цифровой двойник АТП представляет собой многоуровневую систему, включающую следующие ключевые компоненты:

1. Физический уровень – совокупность реальных объектов автотранспортного предприятия (автопарк, сервисные подразделения, инфраструктура, водители и персонал).

2. Информационно-датчиковый уровень – системы сбора данных, обеспечивающие регистрацию телеметрической информации, параметров работы транспортных средств, состояния узлов и агрегатов, показателей расхода топлива, а также данных GPS/ГЛОНАСС-навигации.

3. Цифровая модель предприятия – совокупность взаимосвязанных цифровых представлений, включающая в себя модели транспортных средств, маршрутов, логистических операций, регламентов технического обслуживания и экономических показателей.

4. Имитационно-аналитический уровень – модуль имитационного моделирования, предназначенный для воспроизведения поведения предприятия в различных сценарных условиях. Он позволяет исследовать влияние управленческих решений, проводить стресс-тестирование системы и прогнозировать последствия изменений.

5. Интеграционно-коммуникационный уровень – программно-техническая среда, обеспечивающая обмен данными между цифровыми и физическими объектами, а также взаимодействие с внешними информационными системами (ERP, WMS, TMS, ГЛОНАСС и др.).

6. Уровень управления и визуализации – интерфейсы принятия решений, панели мониторинга, аналитические отчёты и системы поддержки операторов, позволяющие проводить анализ текущего состояния предприятия и оценку эффективности реализуемых мероприятий.

В рамках данной концепции ЦД АТП выступает не просто как статическая цифровая модель, а как динамическая киберфизическая система, обеспечивающая двустороннюю связь между виртуальной и физической средами. Такая интеграция позволяет осуществлять не только мониторинг и диагностику, но и прогнозное управление, основанное на данных, поступающих в реальном времени.

Особенностью предлагаемой концепции является включение имитационного ядра в качестве обязательного элемента цифрового двойника. Имитационная модель обеспечивает возможность воспроизведения функционирования предприятия при изменении внешних условий, параметров эксплуатации или организационных решений. Это позволяет формировать различные сценарии развития событий, оценивать риски и выбирать оптимальные стратегии управления автопарком, графиками рейсов и техническим обслуживанием.

Таким образом, предложенная архитектура цифрового двойника автотранспортного предприятия обеспечивает комплексное представление об объекте управления, создаёт основу для интеллектуальной поддержки

принятия решений и способствует переходу к модели прогнозно-адаптивного управления транспортными системами.

Вывод

В результате проведённого исследования установлено, что концепция цифрового двойника представляет собой одну из ключевых технологических основ цифровой трансформации предприятий, обеспечивающую переход от традиционных методов управления к интеллектуальным, прогнозно-аналитическим моделям функционирования. Анализ современных научных источников показал отсутствие единой трактовки сущности цифрового двойника и его компонентного состава, что актуализирует необходимость систематизации подходов к его структурированию и практической реализации.

В работе предложена абстрактная концепция цифрового двойника автотранспортного предприятия, включающая многоуровневую архитектуру, объединяющую физическую инфраструктуру, информационно-датчиковую систему, цифровые модели объектов, имитационно-аналитический модуль, интеграционные компоненты и средства визуализации данных. Принципиальной особенностью предложенной модели является включение имитационного ядра, позволяющего осуществлять прогнозирование, сценарный анализ и поддержку управленческих решений в режиме, приближенном к реальному времени.

Реализация цифрового двойника автотранспортного предприятия в предложенной архитектуре создаёт предпосылки для повышения эффективности функционирования транспортных систем за счёт интеграции данных, оптимизации процессов технического обслуживания и логистики, а также перехода к адаптивным стратегиям управления. Полученные результаты могут быть использованы в дальнейшем для разработки методологии построения прототипов цифровых двойников, их верификации и внедрения в практику управления транспортными предприятиями различного масштаба.

Список литературы:

1. Борисенко А.Н. Совершенствование системы технического обслуживания и ремонта карьерных автосамосвалов в условиях холодных районов с использованием цифрового двойника автотранспортного предприятия // Архитектура, строительство, транспорт. – 2024. – №4. – С. 88–97. doi: 10.31660/2782-232X-2024-4-88-97
2. Боровков А.И. Цифровые двойники в высокотехнологичной промышленности. – СПб.: Политех-Пресс, 2022. – 492 с.

3. Гостева О.В., Пацук О.В. Особенности применения цифровых двойников на российских промышленных предприятиях // Международный научно-исследовательский журнал. – 2023. – № 8(134). DOI:10.23670/IRJ.2023.134.14. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://research-journal.org/en/archive/8-134-2023-august/10.23670/IRJ.2023.134.14> (дата обращения: 01.12.2025).
4. Григорьев С.Н., Долгов В.А., Никищечкин П.А., Долгов Н.В. Разработка структурной модели цифрового двойника производственно-логистической системы машиностроительных предприятий // Вестник МГТУ «СТАНКИН». – 2021. – № 2. – С. 43–58. DOI: 10.18698/0236-3941-2021-2-43-58. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://vestnikmach.bmstu.ru/articles/1379/1379.pdf>. (дата обращения: 26.11.2025).
5. Нигметзянова В.М., Камалеева А.Р. Использование цифрового двойника в учебном процессе технического вуза при изучении дисциплины САПЭТТМО // Мир транспорта и технологических машин. – 2024. – № 2(1). – С. 113–119. DOI:10.33979/2073-7432-2024-2-1(85)-113-119.
6. Цыганов В.Н. Влияние цифровых двойников на улучшение производственных процессов и экономическое обоснование их применения // Вопросы природопользования. – 2024. – № 3(1). – 55–63. <https://doi.org/10.25726/g4507-6844-8321-1>

1.3. РАДИОТЕХНИКА И СВЯЗЬ

ЛАЗЕРНАЯ СВЯЗЬ НА ДАЛЬНИЕ РАССТОЯНИЯ: ГЛУБОКИЙ АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЙ, БРОСАЮЩИХ ВЫЗОВ КОСМОСУ

Григорьев Никита Анатольевич

курсант,
Военная академия воздушно-космической
обороны имени маршала советского
союза Г.К. Жукова,
РФ, г. Тверь

LONG-RANGE LASER COMMUNICATION: A DEEP ANALYSIS OF SPACE-CHALLENGING TECHNOLOGIES

Nikita Grigorov

Cadet,
Military Academy of Aerospace Defense
named after Marshal of the Soviet
Union G.K. Zhukov,
Russia, Tver

Аннотация. Лазерная связь – это прорыв в коммуникациях, где свет заменяет радиоволны. Статья подробно анализирует, как эта технология преодолевает космические расстояния: от межспутниковых линков Starlink до связи с зондами в глубоком космосе. Вы узнаете о ключевых преимуществах, главных вызовах и перспективах лазерной связи, которая уже сегодня формирует «межпланетный интернет» будущего.

Abstract. Laser communication is a breakthrough in communications where light replaces radio waves. This article provides a detailed analysis of how this technology overcomes space distances, from Starlink's inter-satellite links to deep-space probes. You will learn about the key advantages, challenges, and prospects of laser communication, which is already shaping the "interplanetary internet" of the future.

Ключевые слова: инфракрасные системы, лазерная связь, диапазон, адаптивная оптика, связь.

Keywords: infrared systems, laser communication, range, adaptive optics, and communication.

В эпоху взрывного роста объема передаваемых данных традиционные радиоволны начинают достигать своих пределов. Пропускная способность, задержки и «оккупированность» частотного спектра заставляют ученых и инженеров искать альтернативы. Одной из самых перспективных технологий стала лазерная (оптическая) связь, использующая не радиоволны, а когерентный свет для передачи информации. Особенно острой является задача организации такой связи на дальние расстояния – от сотен километров между спутниками до миллионов километров в глубоком космосе.

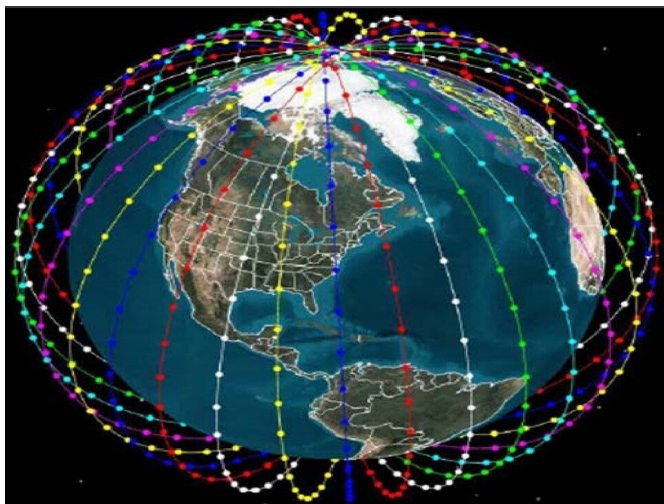


Рисунок 1. Пример

Принцип работы и ключевые преимущества

В основе лазерной связи лежит модуляция лазерного луча (обычно в инфракрасном или ближнем ИК-диапазоне). Данные кодируются в виде изменений интенсивности, фазы или поляризации света. На приемнике сверхчувствительный телескоп и детектор (например, лавинный фотодиод) улавливают эти изменения и преобразуют их обратно в электрический сигнал.

Почему лазеры для «дальняка»?

1. Экстремальная пропускная способность. Частота световых волн на несколько порядков выше, чем у радиоволн. Это открывает доступ к гигантской полосе пропускания, позволяя передавать terabytes данных в сутки, что невозможно для радиосистем сопоставимого размера и энергопотребления.

2. Высокая направленность и безопасность. Лазерный луч расходится очень слабо. Это означает минимальное рассеяние энергии, что критично для передачи сигнала на огромные расстояния без значительных потерь. Одновременно это усложняет перехват данных, так как луч должен быть точно наведен на приемник.

3. Малые размеры и вес терминалов. Оптические антенны (телескопы) для лазерной связи при той же эффективности могут быть значительно меньше, чем радиоантенны. Это ключевой фактор для космических аппаратов, где каждый грамм и сантиметр на счету.

4. Отсутствие лицензирования частот. В отличие от перегруженного радиоспектра, оптический диапазон пока не требует международного лицензирования, что ускоряет развертывание систем.

Анализ основных систем и сфер применения

Лазерную связь на дальние расстояния можно условно разделить на несколько доменов, каждый со своими уникальными вызовами и решениями.

1. Межспутниковая связь (Satellite-to-Satellite / ISL).

Это наиболее отработанное на сегодня направление, где лазерная связь коммерчески успешна.

Технология: Спутники на низкой (LEO) и геостационарной (GEO) орбитах оснащаются лазерными терминалами. Ключевая задача – точное наведение и удержание узкого луча на движущемся аппарате-партнере на фоне космической темноты.

Яркие примеры:

Созвездие Starlink (SpaceX): Использует лазерные межспутниковые линки (ISL) для создания космической оптоволоконной сети. Это позволяет передавать данные между спутниками без задержек на ретрансляцию через наземные станции, обеспечивая связь над океанами и полярными регионами.

Европейская система EDRS (European Data Relay System): «Космическая автострада данных». Спутники на GEO с лазерными терминалами принимают данные от низкоорбитальных спутников (например, спутников дистанционного зондирования Земли Sentinel) и сразу ретранслируют их на Землю, drastically сокращая задержку по сравнению с ожиданием пролета над наземной станцией.

2. Связь «Земля-космос» и «Космос-Земля» (Ground-to-Satellite / Satellite-to-Ground).

Технология: Лазерный луч, проходя через атмосферу, сталкивается с турбулентностью, облаками, аэрозолями и другими помехами, вызывающими затухание и искажение сигнала.

Решения:

Адаптивная оптика: Используется в наземных станциях. Система в реальном времени измеряет искажения волнового фронта и с помощью деформируемого зеркала корректирует их, фокусируя луч на спутнике и «собирая» приходящий сигнал.

Сеть наземных станций: Размещение терминалов в географически удаленных точках с преобладанием ясной погоды (например, в Чили, на Гавайях, в Калифорнии) увеличивает вероятность успешной сеанса связи.

Использование нескольких длин волн: Сигнал на разных длинах волн по-разному взаимодействует с атмосферой, что позволяет выбрать наиболее устойчивый канал.

Яркие примеры:

Миссия NASA LCRD (Laser Communications Relay Demonstration): Первая долговременная миссия по отработке двусторонней лазерной связи между GEO и наземными станциями. LCRD служит ретранслятором, принимая данные от других космических миссий и передавая их на Землю.

Миссия Psyche: Оснащена системой Deep Space Optical Communications (DSOC). Это первая демонстрация лазерной связи в глубоком космосе. Во время полета к астероиду Психея аппарат успешно передавал данные на Землю с расстояния в десятки миллионов километров, показав рекордную скорость для таких дистанций.

3. Связь в глубоком космосе (Deep Space).

Апофеоз сложности – связь на расстояниях в сотни миллионов и миллиарды километров.

Технология: Основная проблема – колоссальное ослабление сигнала (закон обратных квадратов). Луч расходится, и на Землю приходит лишь ничтожная часть фотонов.

Решения:

Сверхмощные лазеры: Увеличение мощности передатчика.

Сверхчувствительные детекторы: Использование детекторов на основе однофотонных счетчиков.

Огромные наземные приемные антенны: Строительство телескопов с диаметром зеркала 8-12 метров и более, специально предназначенных для приема космических лазерных сигналов (например, телескопы в обсерватории Table Mountain в Калифорнии для DSOC).

Сложные схемы модуляции: Применение методов, устойчивых к низкому отношению сигнал/шум.

Ключевые вызовы и ограничения

Несмотря на преимущества, у технологии есть серьезные «узкие места»:

1. Атмосферные помехи: Облака – непреодолимое препятствие для лазера. Дождь, туман, сильная турбулентность делают связь невозможной. Это основная причина, почему лазерная связь «Земля-космос» не может быть единственным каналом.

2. Точность наведения (Pointing, Acquisition and Tracking – PAT): На расстоянии в миллионы километров требуется удерживать луч с точностью до микрорадиан. Малейшая вибрация аппарата или ошибка в наведении – и сигнал будет потерян.

3. Задержка сигнала (для глубокого космоса): Хотя свет движется с максимальной скоростью, при связи с Марсом задержка может составлять от 4 до 20 минут в одну сторону. Это делает невозможным интерактивное управление и требует полностью автономных систем связи с интеллектуальным протоколом повторной передачи.

Будущее лазерной связи

Будущее технологии видится в создании гибридных и сетевых систем:

- Гибридные радио-оптические терминалы: Космические аппараты будут оснащаться и тем, и другим. Лазерный канал – для передачи больших данных в хороших условиях, радио – для надежного командования и связи в плохую погоду.

- Лунная и марсианская интернет-сеть: NASA и ESA планируют развернуть вокруг Луны и Марса сети спутников-ретрансляторов с лазерными линками, создав «межпланетный интернет» (Delay-Tolerant Networking).

- Квантовая связь в космосе: Китайский спутник «Мо-Цзы» уже продемонстрировал возможность квантового распределения ключей между космосом и Землей. Лазерная связь – основа для будущих абсолютно защищенных квантовых сетей.

Лазерная связь на дальние расстояния перестала быть лабораторным экспериментом и стала рабочей технологией, меняющей парадигму космических коммуникаций. Пройдя путь от мегабитных скоростей на низкой орбите до гигабитных – в глубоком космосе, она доказала свою состоятельность. Несмотря на серьезные вызовы, связанные с атмосферой и точностью наведения, ее преимущества в скорости, безопасности и компактности неоспоримы. В ближайшее десятилетие мы станем свидетелями того, как лазерные лучи опутают околоземное пространство,

протянутся к Луне и Марсу, став кровеносной системой для данных новой космической эры.

Список литературы:

1. Toyoshima, M. (2021). Recent Trends in Space Laser Communications for Small Satellites and Constellations. *Journal of Lightwave Technology*, 39(3), 693-699.
2. Hemmati, H. (Ed.). (2009). *Deep Space Optical Communications*. John Wiley & Sons.
3. Сигов, А. С. Прикладная фотоника: учебное пособие для вузов / А. С. Сигов, Ю. В. Гуляев, П. В. Воронин [и др.] ; под ред. А. С. Сигова. – Москва: Физматлит, 2005. – 592 с. – ISBN 5-9221-0584-8.

1.4. СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

ОЦЕНКА НАПРЯЖЁННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ВОДОЗАЩИТНОЙ ТОЛЩИ С УЧЁТОМ РАЗУПРОЧНЕНИЯ ПОРОД

Андреева Анна Владиславовна

аспирант,

Санкт-Петербургский горный университет

императрицы Екатерины II,

РФ, г. Санкт-Петербург

ASSESSMENT OF STRESS-STRAIN STATE OF WATER- PROOF STRATA CONSIDERING ROCK SOFTENING

Andreeva Anna Vladislavovna

Postgraduate student,

Empress Catherine II Saint Petersburg

Mining University,

Russia, Saint Petersburg

Аннотация. В статье рассматривается подход к численному прогнозу напряжённно-деформированного состояния пород водозащитной толщи глубоких калийных месторождений. Особое внимание уделено моделям деформирования, позволяющим оценивать формирование и развитие водопроводящих трещин. Показано, что учёт стадий разупрочнения материала обеспечивает более достоверный прогноз состояния массива.

Abstract. This article presents a numerical approach for predicting the stress-strain state of water-proof strata in deep potash deposits. Particular attention is paid to deformation models that enable the formation and development of water-conducting fractures to be assessed. The article demonstrates that considering the stages of material softening yields a more reliable prediction of the rock mass's state.

Ключевые слова: водозащитная толща; трещинообразование; калийные месторождения; численное моделирование; напряжённно-деформированное состояние.

Keywords: water-proof strata, fracture formation, potash deposits, numerical modelling, stress-strain state.

Введение

При разработке глубоких калийных месторождений ключевым фактором безопасности является предотвращение проникновения подземных вод в выработанное пространство. Водозащитная толща (ВЗТ) служит естественным барьером между горными выработками и вышележащими водоносными горизонтами, однако её целостность может нарушаться вследствие техногенных деформационных процессов [1].

Образование водопроводящих трещин (ВПТ) способно привести к попаданию воды в пространство горных выработок и невозможности дальнейшей их эксплуатации [2, 3]. В условиях сложного геологического строения инженерные методы прогнозирования часто оказываются недостаточно точными, поэтому в сложных горно-геологических условиях необходимо использовать методы численного моделирования [4].

Оценка напряженно-деформированного состояния ВЗТ осложняется наличием переслаивающихся пород в толще, обладающих различными деформационными и прочностными характеристиками, а также разным характером разрушения (вязкий для соляных пород и хрупкий для ангидритовых). Кроме того, соляные породы склонны к длительному деформированию [5]. Для корректного прогноза требуется такая модель поведения горных пород, которая позволяет отслеживать не только накопление пластических деформаций, но и стадии повреждения материала с последующим снижением его жёсткости.

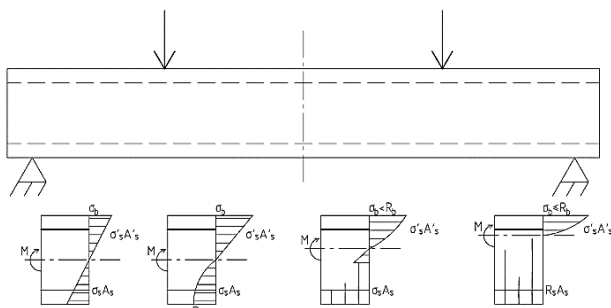


Рисунок 1. Изменение напряжённого состояния изгибаемого элемента

ВЗТ деформируется вследствие ведения горных работ под давлением пород вышележащей толщи. Расчетная схема ВЗТ в поперечном сечении напоминает изгибаемую многоопорную балку. При достижении предельных деформаций в растянутой зоне формируются трещины, последующее раскрытие которых приводит к утрате несущей способности части массива. По механизму разрушения этот процесс аналогичен трещинообразованию в железобетонных конструкциях [6].

Для корректного описания процесса трещинообразования в породах ВЗТ необходимо выбрать правильную модель материала. Упруго-пластические модели (модель Кулона–Мора) позволяют локализовать зоны пластических деформаций, однако при этом жёсткость массива остаётся постоянной. Это приводит к недооценке высоты трещин и не позволяет описывать раскрытие трещин вследствие деформирования ВЗТ [7].

Упругопластическая модель с накоплением повреждений (Concrete Damage Plasticity) учитывает полную диаграмму деформирования: уплотнение, упругий участок, пластические деформации, разупрочнение и остаточную прочность [8]. Такой подход позволяет описать постепенное снижение жёсткости и образование магистральных трещин. И именно эту модель необходимо использовать для корректного прогноза поведения пород.

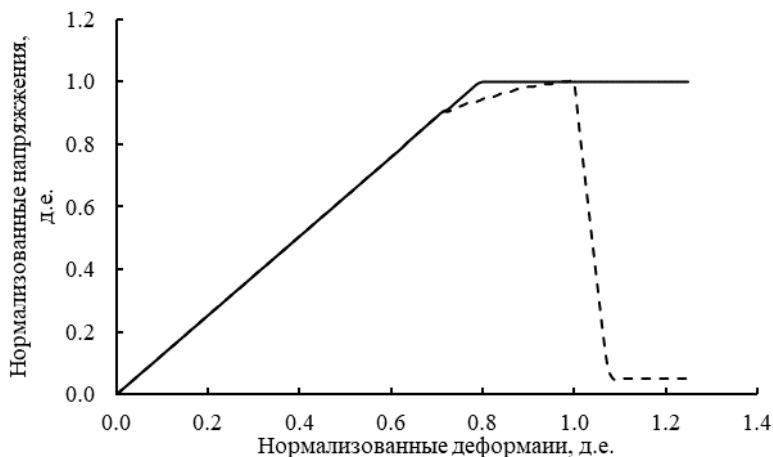


Рисунок 2. Зависимость напряжений от деформаций для упругопластической модели (сплошная линия) и упругопластической с учетом повреждений (штриховая линия)

Для сравнения различных моделей была рассмотрена балка, имитирующая отдельный слой ВЗТ. Полученные результаты показали, что при одинаковых напряжениях упругопластическая модель с разупрочнением фиксирует стадии деградации материала и рост трещины, тогда как обычная упругопластическая модель демонстрирует постоянство несущей способности после начала момента трещинообразования.

На следующем этапе работ была построена модель ВЗТ, представленной чередованием ангидрита и каменной соли на глубине 800 м. Моделировалась отработка месторождения камерной системой, с последовательной разработкой камер и оставлением между камерами участков горной породы – целиков. Разработка одной камеры велась в течение 30 дней.

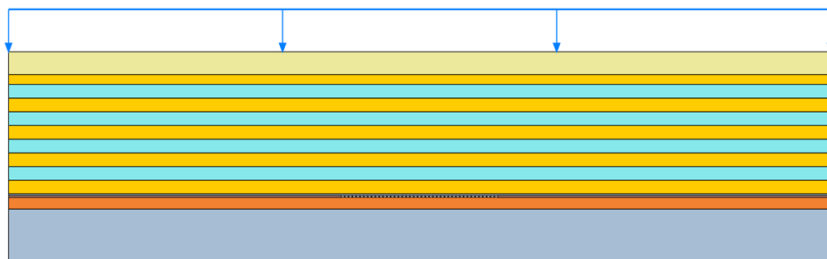


Рисунок 3. Расчетная схема модели

Модель с разупрочнением показала, что трещины в хрупких слоях могут формироваться независимо от нижележащих соляных пород, что связано с различной энергией разрушения материалов. Модель Кулона-Мора подобного эффекта не выявила.

Полученные результаты подтверждают необходимость учёта поведения пород на запредельной стадии деформирования, так как именно изменение жёсткости слоёв определяет характер развития трещин.

Таким образом, классические упругопластические модели занижают высоту трещинообразования в ВЗТ, так как не учитывают снижение модуля деформации вследствие накопления повреждений. Упругопластическая модель с разупрочнением обеспечивает более корректный прогноз, отражающий реальные стадии разрушения пород. Различие энергии разрушения хрупких и вязких слоёв приводит к формированию трещин, не связанных гидравлически с выработанным пространством.

Для повышения точности прогноза необходимо учитывать влияния длительных деформаций соляных пород на процесс

трещинообразования, а также зависимость высоты трещинообразования от состава ВЗТ, что и будет сделано в последующих работах.

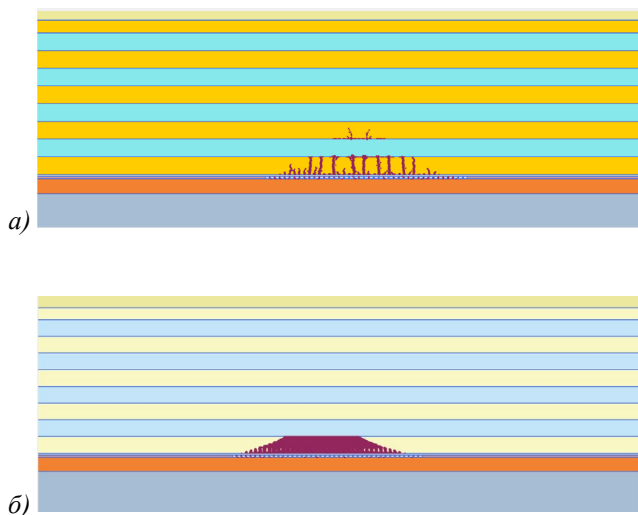


Рисунок 4. Картина трещинообразования в модели с упругопластической моделью с повреждением (а) и с упругой моделью (б) после полной отработки камер

Список литературы:

1. Baryakh A.A., Gubanova E.A. On flood protection measures for potash mines // Journal of Mining Institute. – 2019. – Vol. 240. – P. 613–620.
2. Pankov I., et al. Studying the deformation and failure of salt rocks for geomechanical assessing the stability of elements of the system for the mining at potash deposits // Perm Scientific Center Journal. – 2022. – № 3. – P. 14–24.
3. Зубов В. П., Смычник А. Д. Снижение рисков затопления калийных рудников при прорывах подземных вод в горные выработки // Записки Горного института. – 2015. – Т. 215. – С. 29–37.
4. Belyakov N. A., Belikov A. A. Prediction of the integrity of the water-protective stratum at the Verkhnekamskoye potash ore deposit // Mining Informational and Analytical Bulletin (MIAB). – 2022. – № 6–2. – P. 33–46.
5. Wang J., et al. Experimental study on creep properties of salt rock under long-period cyclic loading // International Journal of Fatigue. – 2021. – Vol. 143.

6. Unteregger D., Fuchs B., Hofstetter G. A damage plasticity model for different types of intact rock // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. – 2015. – Vol. 80. – P. 402–411.
7. Chen X. et al. Elastoplastic damage behavior of sandstone and salt rock // Rock Mechanics and Rock Engineering. – 2023. – Vol. 56, № 8. – P. 5621–5634.
8. Rakić D. M. et al. Concrete damage plasticity material model parameters... // Journal of Serbian Society for Computational Mechanics. – 2021. – Vol. 15, № 2. – P. 111–122.

ВЛИЯНИЕ СЛОИСТОСТИ ГРУНТОВОГО МАССИВА НА УСТОЙЧИВОСТЬ ЗАБОЯ ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ ТОННЕЛЕЙ МЕТРО МЕХАНИЗИРОВАННЫМИ ЩИТАМИ С ПРИГРУЗОМ ЗАБОЯ

Кумов Всеволод Васильевич

*аспирант,
Федеральное государственное
бюджетное образовательное учреждение
высшего образования Санкт-Петербургский
горный университет императрицы Екатерины II,
РФ, г. Санкт-Петербург*

Аннотация. В статье представлено исследование влияния слоистости грунтового массива на напряженно-деформированное состояние при строительстве тоннелей. Установлено, что различия в физико-механических свойствах смежных слоев могут привести к локальной концентрации напряжений на контуре выработки, что существенно усложняет расчет необходимого поддерживающего давления. В отличие от однородных условий, слоистые массивы формируют неоднородные зоны деформирования, размеры и формы которых зависят от позиции и характеристик слоев. Отмечена необходимость комплексного геотехнического анализа с использованием численного моделирования с учетом реальной геометрии массива для точного прогноза поведения массива. Для обеспечения устойчивости забоя при строительстве тоннеля критически важно использовать адаптивное управление давлением пригруза, оперативно учитывающее изменяющиеся геологические условия. Современные методы машинного обучения и искусственного интеллекта позволяют произвести их интегрирование в системы автоматического управления, что может позволить в реальном времени корректировать давление на основе данных мониторинга и оптимизировать процесс

проходки. Разработка таких интеллектуальных систем существенно повысит безопасность и эффективность строительства тоннелей в сложных слоистых грунтовых условиях.

Abstract. The paper presents a comprehensive investigation of the impact of soil stratification on the stress-strain state during tunnel excavation. It has been established that disparities in the physico-mechanical properties of adjacent strata can precipitate localized stress concentration at the excavation perimeter, thereby substantially complicating the determination of requisite support pressure. In contradistinction to homogeneous conditions, stratified soil masses engender heterogeneous deformation zones whose dimensions and geometries are contingent upon the position and characteristics of the individual layers. The necessity for integrated geotechnical analysis utilizing numerical simulation that accounts for the actual mass geometry has been emphasized, ensuring accurate prognosis of mass behavior. To guarantee excavation face stability during tunnel advancement, adaptive face support pressure management is critically imperative, dynamically accommodating the evolving geologic conditions. Contemporary machine learning and artificial intelligence methodologies enable their integration into automated control systems, facilitating real-time adjustment of face pressure on the basis of monitoring data and optimization of the advancement process. The development of such intelligent systems will substantially augment both safety and operational efficiency of tunnel construction under complex stratified soil conditions.

Ключевые слова: многослойный грунтовый массив, щит с пригрузом забоя, давление пригруза, устойчивость забоя тоннеля, численное моделирование.

Keywords: layered soil mass, shield tunneling with face pressure control, face pressure, tunnel face stability, numerical modeling.

Введение

Строительство тоннелей метро требует комплексного понимания взаимодействия механизированного проходческого оборудования с грунтовыми массивами, имеющими широкий диапазон физико-механических свойств [1-3]. Современные механизированные щиты с системой регулирования давления пригруза на забое стали стандартной технологией при сооружении перегонных тоннелей в водонасыщенных и слабых грунтовых массивах, однако до сих пор недостаточно точный учет поведения слоистых массивов в процессе строительства создаёт

существенные риски как для безопасности строительства, так и для окружающих объектов.

На сегодняшний день в определенных сложных геотехнических условиях современные исследования в недостаточной степени учитывают влияние многослойности грунтового массива на устойчивость забоя, характер перераспределения напряжений в массиве и динамику развития деформаций земной поверхности. Данное упущение может в значительной степени влиять на развитие методологий проектирования и оптимизационных режимов поддержания давления в забое тоннеля. Настоящее исследование обобщает имеющиеся недостатки и возможные пути их решения.

Влияние слоистости массива на его напряженно-деформированное состояние

Слоистость грунтового массива может в значительной степени влиять на развитие напряжений и деформаций в сравнении с однородными условиями. В однородной среде прогноз поля напряжений не представляет большого труда при проектировании тоннеля и прогнозе необходимого поддерживающего давления в его забое, однако строительство в слоистых массивах способно внести резко асимметричное распределение напряжений вследствие различия деформационных и прочностных свойств смежных слоёв. Контакты же между слоями могут создавать локальную концентрацию напряжений, обусловленную вышеупомянутыми различиями в физико-механических свойствах грунтов и существенно повышающую напряжения на контуре выработки.

Как следствие, недостаточно точно рассчитанное давление в забое тоннеля может привести к выпучиванию или разрушению забоя тоннеля внутрь выработки. Величина влияния слоистости коррелирует непосредственно с разницей в значениях характеристик слоев. Такое явление требует комплексного геотехнического анализа, нежели применения упрощённых расчетов в условиях однородности массива.

Определение положения контакта между слоями относительно геометрии тоннеля не менее важный фактор для понимания перераспределения напряжений. Учет упомянутых факторов позволит применять адаптивные схемы проходки, корректирующие технологические параметры щита в соответствии с изменяющимися в процессе строительства тоннеля стратиграфическими условиями.

Принципы регулирования давления пригруза и механизмы его воздействия

Обеспечение устойчивости забоя путём контроля давления пригруза представляет критически важный проектный параметр при щитовом строительстве [13, 14]. Базовый принцип заключается в поддержании активного силового равновесия внутри герметичной камеры щита относительно окружающего тоннель грунтового массива для предотвращения движения грунта внутрь выработки.

Существующие аналитические методы для прогноза устойчивости однородного грунтового массива позволяют рассчитывать требуемое поддерживающее давление на основе расчета веса призмы предельного состояния различной формы и размеров и гидростатического давления подземных вод. Эти классические подходы предполагают чётко определённую форму поверхностей разрушения. Применение таких методик в условиях строительства в неоднородных массивах возможно при точном учете влияния слоистости. Сложность проблемы обусловлена существованием широкого диапазона отличающихся по форме призм разрушения грунтового массива. Разрушение может как локализоваться в менее прочных слоях, не распространяясь на всё сечение забоя, так и иметь более широкую область, затрагивающую весь забой, что в значительной степени сказывается на площади оседания земной поверхности. Такие резкие отличия в формах и размерах призм разрушения грунтовых массивов могут требовать применения модифицированных методик расчёта давления, специфичных для слоистых условий.

Зона деформирования грунтового массива в слоистых массивах

Зона деформирования грунтового массива представляет собой зону, в которой произошел процесс деформирования массива относительно его ненарушенного состояния вследствие ведения строительных работ. В однородном грунте зона развивается в виде определенных форм с чётко выраженной осью над центром тоннеля, например, в виде гауссовой кривой, в то время как в слоистых массивах форма свода может подвергаться существенным искажениям (рис. 1). Например, залегающие выше более прочные слои, могут снизить скорость и степень распространения деформаций посредством образования несущей поверхности при ослаблении нижележающих слоев. Однако в противоположной ситуации может возникнуть увеличение размеров зоны деформирования.

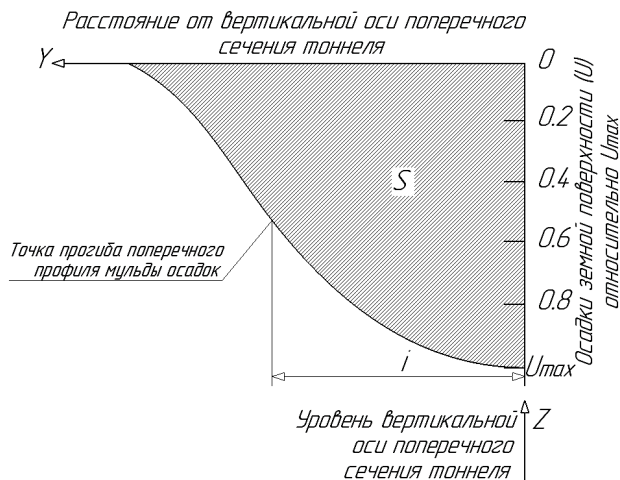


Рисунок 1. Поперечный профиль мульты осадок и описывающие её основные критерии

Точный прогноз формы и размеров зоны деформирования в слоистых грунтовых массивах возможен с учетом применения численного моделирования с учётом реальной геометрии слоёв и изменения механических характеристик [6-8].

С учетом вышеупомянутого можно с уверенностью сказать, что разработка необходимого метода требует точного геомеханического расчета и широкого диапазона верификации с учетом существующего опыта строительства тоннелей в слоистых грунтовых массивах.

Оптимизация управления давлением пригруза в условиях строительства тоннелей в слоистых массивах

Управление давлением пригруза в реальном времени требует адаптивных методов, динамично реагирующих на изменяющиеся геологические условия [9, 10].

В современные системы автоматического управления щитом необходимо интегрировать алгоритмы машинного обучения, прогнозирующие оптимальные значения поддерживающего давления на основе данных, получаемых с систем мониторинга. Такая система должна быть способна обрабатывать изменение геологических факторов, показатели работы оборудования в режиме реального времени. Формирующиеся подходы с использованием искусственного интеллекта способны существенно повысить безопасность и эффективность строительство

тоннелей в слоистых грунтовых массивах. Обучение искусственных нейронных сетей при этом необходимо провести на базе комплексных наборов данных, включающих геологические параметры, показатели оборудования, структуру грунтового массива и значения осадок земной поверхности.

Заключение

Проведённый анализ показал, что слоистость грунтового массива – один из ключевых факторов, усложняющих прогноз напряжённо-деформированного состояния тоннеля по сравнению с однородной средой. Различия в деформационных и прочностных характеристиках смежных слоёв, а также наличие контактов между ними могут привести к локальной концентрации напряжений на контуре выработки и существенно влиять на устойчивость забоя. В таких условиях использование классических расчётных схем для однородных массивов способно привести к неверному расчету требуемого давления пригруза, что приводит к повышенному риску разрушения забоя и роста деформаций земной поверхности.

Показано, что характер и степень влияния слоистости напрямую коррелируют с разницей в механических свойствах слоёв и положением контакта между ними относительно геометрии тоннеля. В результате форма и размеры зоны деформирования в слоистых массивах могут заметно отличаться от классических схем для однородных массивов.

Определение требуемого поддерживающего давления в забое в условиях слоистого массива невозможно без комплексного геомеханического анализа, включающего учёт реальной геометрии слоёв, их физико-механических характеристик и возможных вариантов формирования призм разрушения. При этом диапазон возможных форм и размеров зон деформирования в слоистых грунтах значительно шире, чем в однородной среде, что диктует необходимость разработки модифицированных методик расчёта давления пригруза, специально адаптированных к рассматриваемым условиям.

Особую значимость имеют адаптивные схемы управления давлением пригруза в реальном времени, ориентированные на работу в слоистых массивах.

Строительство тоннелей в слоистых грунтовых массивах должно основываться на интегрированном подходе, сочетающем детальное инженерно-геологическое обследование, численное геомеханическое моделирование и интеллектуальные системы управления технологическими параметрами. Разработка и верификация таких методик на базе накопленного опыта строительства в слоистых массивах способны

повысить надёжность прогноза, снизить риски аварийных ситуаций и повысить общую эффективность и безопасность строительства тоннелей.

Список литературы:

1. Komolov, V., Belikov A. Assessment of the impact of the construction of semi-buried structures on the surrounding buildings and the road system // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 918. DOI: 10.1088/1757-899X/918/1/012027.
2. Jiankang L., Yujing J. et al. The influence of geological conditions of the rock mass before the tunnel face on the forecasting efficiency of the uniaxial compression strength prediction model // Conf. Series: Earth and Environmental Science. 2021. DOI: 10.1088/1755-1315/861/4/042116.
3. Zhang W, Li H., Wu C., Ly Y. Soft computing approach for prediction of surface settlement induced by earth pressure balance shield tunneling // Underground Space. 2021. Vol. 6. P. 353-363. DOI: 10.1016/j.undsp.2019.12.003.
4. Liu X., Xu S., Huang Y. Optimal control for earth pressure balance of shield machine based on action-dependent heuristic dynamic programming // ISA Transactions. 2019. Vol. 94. P. 28-35. DOI: 10.1016/j.isatra.2019.04.007.
5. Liu X., Xu S., Shao C. Optimal control of earth pressure balance of shield tunneling machine based on dual-heuristic dynamic programming // Optimal Control Applications and Methods. 2020. Vol. 41. P. 1510-1523. DOI: 10.1002/oca.2612.
6. Karasev M. A., Posphehov G. B., Astapenko T. S., Shishkina V. S. Stress-strain behavior prediction models for weak manmade soil // MIAB. Mining Inf. Anal. Bull. 2023. Vol. 11. P.49-69. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_11_0_49.
7. Dzhemilev E.R., Shammazov I.A., Sidorkin D.I., Mastobaev B.N., Gumerov A.K. Developing technology and device for the main pipelines repair with cutting out their defective sections // Pipeline transportation of oil. 2022. Vol. 10. P. 78-82. DOI: 10.24887/0028-2448-2022-10-78-82.
8. Zhang P., Chen R., Wu H. Real-time analysis and regulation of EPB shield steering using Random Forest // Automation In Construction. 2019. Vol. 106. DOI: 10.1016/j.autcon.2019.102860.
9. Demenkov P.A., Romanova E.L., Kotikov D.A. Investigation of the formation of the stress-strain state of the support of a vertical trunk and the enclosing rock mass under conditions of unevenness of its contour // MIAB. Mining Inf. Anal. Bull. 2023. Vol. 11. P. 33-48. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_11_0_33.
10. Kovalski E. R., Kongar-Syuryun Ch. B., Petrov D. N. Challenges and prospects for several-stage stoping in potash mining // Sustainable Development of Mountain Territories. 2023. Vol. 15(2). P.349-364. DOI: 10.21177/1998-4502-2023-15-2-349-364.

1.5. ЭНЕРГЕТИКА

АВТОМАТИЗАЦИЯ УПРАВЛЕНИЯ РЕЖИМОМ РАБОТЫ ЛЭП НА ОСНОВЕ РЕГУЛЯТОРА С НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКОЙ

Шувалова Алёна Александровна

канд. техн. наук, доц.,
Югорский государственный университет,
РФ, г. Ханты-Мансийск

Еременко Глеб Борисович

бакалавр,
Югорский государственный университет,
РФ, г. Ханты-Мансийск

AUTOMATED CONTROL OF A POWER TRANSMISSION LINE OPERATING MODE BASED ON A FUZZY LOGIC CONTROLLER

Shuvalova Alyona Aleksandrovna

Candidate of Science,
Associate Professor,
Yugra state University,
Russia, Khanty-Mansiysk

Eremenko Gleb Borisovich

Bachelor,
Yugra state University,
Russia, Khanty-Mansiysk

Аннотация. В статье изложена идея использования актуализированных данных о регулирующем эффекте нагрузки при построении системы управления перетоком активной мощности по линии электропередач (ЛЭП) в режиме ее перегрузки. Система автоматизации базируется на нечетком регуляторе. Произведено математическое имитационное моделирование и доказана эффективность работы системы автоматизации.

Abstract. The article describes the idea of using actual data on the load regulating effect when building a control system for active power flow through a power line during its overload mode. The automation system is based on a fuzzy controller. Mathematical simulation modeling was performed, and the efficiency of the automation system was proven.

Ключевые слова: Автоматическое регулирование напряжения под нагрузкой, вынужденные режимы, нечёткая логика, статическая характеристика.

Keywords: Automatic Voltage Regulation, Forced Operating Conditions, Fuzzy Logic, Static Characteristic

Энергосистема России, объединяющая множество географически удаленных объектов магистральными ЛЭП, требует постоянного контроля режимных параметров со стороны диспетчерского персонала, где особую сложность представляет контроль за перегрузками на межсистемных связях. Согласно регламенту АО «СО ЕЭС», эксплуатация оборудования при нагрузке, превышающей номинальную, но ниже аварийного порога, идентифицируется как вынужденный режим. На его ликвидацию отводится 40 минут, за которые оперативный персонал совершает необходимые коммутационные операции. В этой связи разработка инструментов диспетчерского управления, снижающих перегрузки без отключения потребителей, является актуальной.

Представленное решение для снижения перегрузок опирается на использование регулирующего эффекта нагрузки, смысл которого заключается в изменении потребляемой активной мощности при изменении уровня напряжения [1]. Этот параметр численно описывается с помощью $K_{рэн}$ (коэффициента регулирующего эффекта нагрузки), определяемый на основании СХН (статической характеристики нагрузки). Имея данные о величине и знаке $K_{рэн}$, определяется направление изменения напряжения для снижения мощности: при его положительном значении снижение перетока достигается понижением напряжения, при отрицательном – повышением напряжения. Нулевое значение коэффициента говорит о невозможности воздействия на переток мощности [1].

Так как регулирующий эффект нагрузки изменяется сезонно, он не получил широкого распространения в практике оперативного управления. Несмотря на то, что данные изменения носят долгосрочный характер, их влияние должно учитываться диспетчерским персоналом, поэтому наличие актуальных значений $K_{рэн}$ необходимо для точного принятия решений. Благодаря современным методикам и средствам расчета

$K_{рэн}$, имеются предпосылки для создания автоматизированной системы управления перетоками мощности в вынужденных режимах (АСУВР)

Идея исследования состоит в применении регулирующего эффекта нагрузки для снижения перетока активной мощности по межсистемным связям при вынужденном режиме эксплуатации энергосистемы. Корректировка уровня напряжения может осуществляться изменением коэффициентов трансформации трансформатора используя автоматическое устройство регулирования напряжения под нагрузкой (АРПН)

Для реализации идеи предлагается использовать регулятор на нечеткой логике, так как при работе с устройствами АРПН регулятор на базе нечеткой логики характеризуется существенно более высоким быстродействием чем аналоги [2]. Использование нечеткой логики позволяет через систему правил, реализовать управление при большом количестве входных и выходных сигналов без построения сложного математического описания процессов регулирования.

Для унификации описания состояний системы введены всего три лингвистических терма:

- 1) S (Small) – значение ниже номинального;
- 2) N (Normal) – рабочее или нулевое значение;
- 3) B (Big) – значение выше номинального.

Такой подход минимизировал количество комбинаций при построении базы правил. База данных применяется на этапе логического вывода и разрабатывается заранее по алгоритму Мамдани [3].

Для проверки основных положений и работоспособности автоматизированной системы управления была создана имитационная модель в программном комплексе MatLAB Simulink с пакетом расширения Fuzzy Logic Toolbox рисунок 1. Она состоит из: энергодефицитной системы, системы бесконечной мощности и перегруженной линии межсистемной связи ЛЭП 220кВ. Автоматизированная система управления на рисунке обозначена как АСУВР.

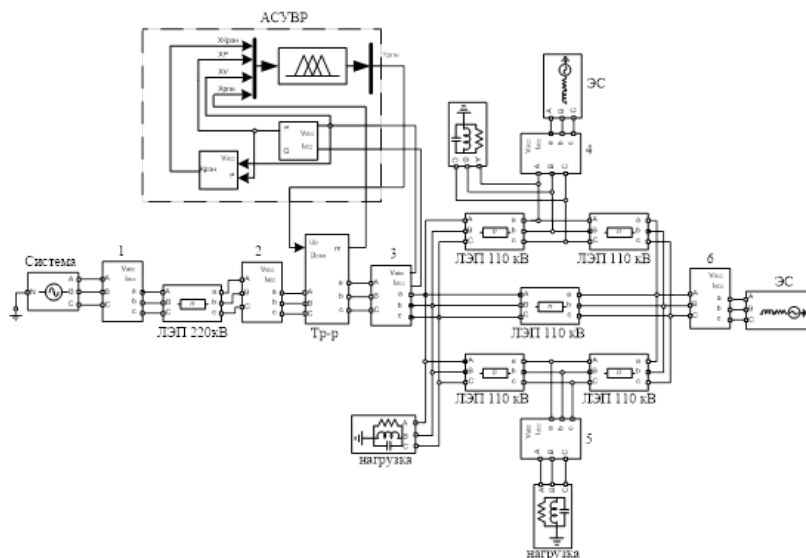


Рисунок 1. Имитационная модель работы автоматизированной системы управления

В модели допустимый переток по линии 1-2 задан 390 МВт. Имитируется резкое возрастание перетока до 413 МВт, максимальный допустимый переток составляет 425 МВт. Возникает необходимость снижения перетока с 413 МВт до номинального уровня 390 МВт, то есть на 23 МВт.

Введены временные характеристики работы РПН, такие как время работы исполнительного механизма – 10 сек. Уставка по времени блокировки работы РПН между переключениями 1,5 сек.

Проверка показала, что нечеткий регулятор выдал управляющее воздействие «вверх» для снижения напряжения на выводах трансформатора, после ряда переключений удалось вернуть номинальный уровень, что доказало работоспособность идеи.

На сегодняшний день, существуют микропроцессорные системы автоматизированной РПН, которые, помимо автоматического поддержания напряжения, могут работать по различным установленным алгоритмам и допускают установку пользовательской программы управления. Что позволяет внедрить в них разработанный алгоритм управления в режиме перегрузки.

Заключение. Выявлена возможность использования регулирующего эффекта нагрузки для построения автоматизации диспетчерского управления перетоком активной мощности по линии электропередач в режиме перегрузки. Устройство реализующее эту идею способно выдавать управляющее воздействие на автоматический регулятор напряжения под нагрузкой силового трансформатора.

Представленная в данной статье автоматизированная система управления перетоком мощности может выступать в качестве вспомогательной части системы диспетчерского управления или автоматизированной системы управления технологическим процессом.

Список литературы:

1. Петров, В. В. Разработка методики управления транспортом электроэнергии в пределах заданной пропускной способности элементов питания: специальность 05.14.02 «Электрические станции и электроэнергетические системы»: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Петров Вячеслав Валерьевич; Самарский государственный технический университет. – Красноярск, 2019. – 157 с.
2. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021681429 Российская Федерация. Система управления перетоком активной мощности по линии электропередач в режиме перегрузки: № 2021680502: заявл. 10.12.2021 :опубл. 21.12.2021 / В. И. Полищук, К. Ю. Постоянкова, А. В. Панкратов, А. А. Шувалова.
3. 3. Полищук, В. И. Интеллектуальная автоматизированная система управления перетоком активной мощности по линиям электропередач в вынужденном режиме работы / В. И. Полищук, А. А. Шувалова, А. В. Панкратов. // Современные наукоемкие технологии. – 2021. – № 9. – С. 94-99. – DOI 10.17513/snt.38822

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ

РАЗДЕЛ 2. МЕХАНИКА

2.1. МЕХАНИКА ДЕФОРМИРУЕМОГО ТВЕРДОГО ТЕЛА

АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ ПОДХОДОВ К МОДЕЛИРОВАНИЮ ПОЛЗУЧЕСТИ ГЕОМАТЕРИАЛОВ

Откупщикова Ирина Александровна

аспирант,
Санкт-Петербургский горный
университет императрицы Екатерины II,
РФ, г. Санкт-Петербург

ANALYSIS OF MODERN APPROACHES TO MODELING CREEP IN GEOMATERIALS

Otkupshchikova Irina Aleksandrovna

Postgraduate Student,
Saint Petersburg Mining
University of Empress Catherine II,
Russia, Saint Petersburg

Аннотация. Статья посвящена ползучести геоматериалов как ключевому фактору долговременной устойчивости подземных сооружений. Для каменной соли, глин, слабых углей и слабоцементированных песчаников длительная деформация определяет изменение геометрии выработок и перераспределение напряжений. Рассматриваются современные модели ползучести: с внутренними переменными, микромеханические и на основе теории повреждаемости, включая фракционные обобщения. Обсуждаются их возможности описания наследственных

эффектов, перехода к ускоренной ползучести и разрушению, а также требования к экспериментальным данным и идентификации параметров. Предложены практические критерии выбора модели в зависимости от типа породы, глубины и длительности расчётного периода.

Abstract. The paper addresses geomaterial creep as a key factor governing the long-term stability of underground structures. For rock salt, clays, weak coals and weakly cemented sandstones, time-dependent deformation controls excavation geometry and stress redistribution. Modern creep models are reviewed, including internal-variable, micromechanical and damage-mechanics formulations, along with fractional generalizations. Their ability to represent hereditary effects, the transition to accelerated creep and failure, as well as related experimental and parameter-identification requirements, is discussed. Practical criteria for model selection are outlined with respect to rock type, depth and design lifetime of underground facilities.

Ключевые слова: ползучесть; геоматериалы; реологические модели; внутренние переменные; микромеханика; повреждаемость; соляные массивы; глинистые грунты; подземные хранилища; метод конечных элементов.

Keywords: creep; geomaterials; rheological models; internal variables; micromechanics; damage mechanics; rock salt formations; clayey soils; underground storage caverns; finite element method.

Введение

Исследование ползучести геоматериалов в последние десятилетия стало одной из ключевых задач геомеханики и подземного строительства. Для таких сред, как каменная соль, слабые и глинистые породы, угли и слабоцементированные песчаники, именно длительная деформация во времени зачастую определяет предельное состояние массива и ресурс инженерных сооружений.

Нарастающие требования к долговечности и безопасности подземных объектов – хранилищ газа и CO_2 в соляных куполах, подземных хранилищ нефти и водорода, тоннелей глубокого заложения и метрополитенов в глинах – делают более точный учёт ползучести не просто научной проблемой, а практической необходимостью [1–4].

Длительная деформация горных пород приводит к изменению геометрии выработок, перераспределению напряжений, формированию зон повышенной повреждённости и, в пределе, к потере устойчивости.

Для соляных массивов это означает сужение каверн и рост нагрузок на обсадные колонны и перекрывающие комплексы; для слабых углей и

мягких сланцев – прогрессирующие смещения контура, обрушения кровли и рост затрат на поддержание выработок [1], [3], [5]. В глинистых грунтах ползучесть проявляется в форме длительных осадок и перераспределения контактных давлений, что критично для тоннелей метрополитенов, станционных комплексов и глубоких коллекторов [6], [7].

Значимость учёта реологических свойств в проектировании подчёркивается результатами как лабораторных, так и натурных наблюдений. Показано, что игнорирование ползучести приводит к систематическому занижению расчётных деформаций и, как следствие, к недооценке риска повреждения обделок тоннелей, избыточных деформаций крепи и оборудования, а также эксплуатационных ограничений для подземных хранилищ [2–4], [8]. В ряде работ отмечается, что для глубоких выработок в слабых породах вклад ползучести в общую деформацию может достигать 50–80 % за срок службы объекта, что требует перехода от сугубо упругопластических моделей к полноценному реологическому описанию [5], [9].

В этой связи актуальным является комплексный обзор как классических реологических моделей, так и современных подходов – на основе внутренних переменных, микромеханики и теории повреждаемости – с точки зрения их применимости к конкретным инженерным задачам, масштабным эффектам и возможностям идентификации параметров по экспериментальным данным.

Современные подходы к моделированию ползучести

Современные модели ползучести развиваются в нескольких взаимосвязанных направлениях: теории с внутренними переменными, микромеханические модели и модели повреждаемости (damage mechanics), нередко объединяемые в гибридные схемы [10,11]. Эти подходы направлены на более глубокое физическое обоснование параметров и на способность описывать весь спектр стадий – от затухающей до ускоренной ползучести и разрушения.

Модели с внутренними переменными рассматривают деформацию как результат эволюции некоторого набора скрытых параметров, описывающих структурное состояние материала. Это могут быть плотность микротрещин, параметры текстуры и анизотропии, плотность дислокаций, степень разуплотнения или повреждённости. Система уравнений включает, помимо стандартных конститутивных соотношений «напряжение–деформация», эволюционные уравнения для внутренних переменных, зависящие от времени, напряжённого состояния и температуры [12–14]. Такой подход позволяет описывать нелинейную

вязкопластичность и переход от квазистационарной ползучести к ускоренному разрушению.

Микромеханические концепции ползучести опираются на моделирование процессов на уровне зеренной и поровой структуры. Для соляных пород ключевую роль играют диффузионное течение, скольжение по границам зерен, рекристаллизация и давление растворения; для глин – перестройка агрегатов частиц, перемещение межслоевой воды и тиксотропные эффекты [15]. В современных работах активно используются дискретно-элементные и гибридные модели (например, Burgers–parallel bond в PFC), позволяющие воспроизводить мезомасштабную эволюцию структуры при длительном нагружении [9].

Модели повреждаемости развиваются на основе классических работ Л. М. Качанова и Ж. Леметра [18], [19] и адаптированы к задачам геомеханики. В таких моделях вводится параметр поврежденности, изменяющийся от 0 (невредимый материал) до 1 (полное разрушение). Эволюция данного параметра связывается с историей нагружения и уровнем деформаций, что позволяет описывать деградацию модуля упругости, прочности и вязких характеристик [12–14].

В последние годы активно развиваются дробно-производные (фракционные) модели ползучести, позволяющие описывать наследственные эффекты и широкие спектры времен релаксации. Предлагаются нелинейные фракционные вязкоупругие–вязкопластические модели с повреждаемостью, способные достаточно точно воспроизводить все три стадии ползучести горных пород и слабых грунтов [10–13]. Эти модели уже применяются для описания поведения пород вокруг глубоких тоннелей и выработок, а также для анализа микробиологически улучшенных грунтов и слабых аргиллитов [10], [13].

Сравнительный анализ моделей и критерии выбора

Сопоставление классических реологических моделей с микромеханическими и поврежденческими подходами показывает, что выбор модели определяется одновременно масштабом задачи, доступностью экспериментальных данных и требованиями к точности прогноза. Простые линейные и упруго-вязкопластические схемы остаются востребованными в задачах предварительной оценки, а также там, где диапазон напряжений и деформаций ограничен, а данные испытаний неполны. Фракционные и поврежденческие модели демонстрируют явные преимущества при описании ускоренной ползучести, перехода к разрушению и влияния истории нагружения, но требуют большего количества высококачественных данных и более сложных процедур идентификации параметров [5], [12–15].

Масштабные эффекты играют ключевую роль: параметры, идентифицированные по лабораторным образцам, не всегда

непосредственно переносимы на уровень массива. Для слабых и анизотропных пород (сланцы, угли, трещиноватые глины) наблюдается существенная зависимость реологических параметров от размеров области, степени нарушенности и структуры трещиноватости [3], [4], [16]. Это приводит к необходимости введения «эффективных» параметров на уровне массива или использования многоуровневых моделей, в которых микромеханические расчёты служат для калибровки макроскопических конститутивных связей [9], [23].

Практические критерии выбора модели включают: тип породы (соль, глина, мягкий уголь, песчаник), глубину заложения, длительность расчётного периода, наличие данных длительных испытаний и мониторинга, а также требования по учёту повреждаемости и многократных циклов нагружения (например, при эксплуатации хранилищ ПГ). Для соляных каверн, где важна точная оценка закрытия и устойчивости в течение десятков лет, целесообразно использовать нелинейные модели с повреждаемостью и фракционной вязкостью [1–3], [12]. Для глинистых оснований тоннелей часто достаточно комбинированных упруго-вязкопластических моделей с расширенными возможностями описания первичной ползучести, тогда как для глубоких выработок в мягких породах предпочтительны гибридные модели с явным учётом деградации прочности [5], [8], [14].

Список литературы:

1. Zhao K., Ma H., Yang C., Chen X., Liu Y., Liang X., Cai R. Damage evolution and deformation of rock salt under creep–fatigue loading // *Rock Mechanics and Rock Engineering*. – 2021. – Т. 54. – С. 825–844.
2. Fan J., Yang F., Li Z. и др. Creep constitutive model for salt rock considering loading and unloading path based on state variables // *Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources*. – 2025. – Т. 11. – Art. 30. – DOI 10.1007/s40948-025-00944-4.
3. Lohar D., Kumar A. Analyzing creep behavior of storage caverns in weak rocks // *International Journal of Geomechanics*. – 2024. – Т. 24. – № 5.
4. Барях А. А., Ударцев А. А., Паньков И. Л. К оценке длительной прочности соляных пород // *Горный информационно-аналитический бюллетень (ГИАБ)*. – 2024. – № 11. – С. 5–22.
5. Wang X., Xiang J., Xie W., Xia C., Yang J., Wei W. Experimental investigation of the long-term creep behavior of extremely soft coal rocks and novel nonlinear creep mathematical model with a nonstationary viscous coefficient // *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. – 2025. – Т. 84. – Art. 11.
6. Ren P., Wang P., Tang Y., Zhang Z. A viscoelastic–plastic constitutive model of creep in clay based on improved nonlinear elements // *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. – 2021. – Т. 58. – № 1. – С. 10–17.

7. Liu Y., Fang N., Zheng Y., Wu K., Chen R., Lu H., Vuong V. Q. Creep behavior and quantitative prediction of marine soft clay based on a nonlinear elasto-plastic–viscous element assembly model // *Journal of Marine Science and Engineering*. – 2025. – Т. 13. – № 6. – Art. 1142.
8. Li Q., Zhang L., Li W., Pan C., Xu M., Zhang S., Xu K. Creep deformation and failure mechanisms in deep soft rock: A hybrid contact model analysis // *Physics of Fluids*. – 2025. – Т. 37. – DOI 10.1063/5.0271029.
9. Gao Y.-H., Zhou Z., Zhang H., Jin S., Yang W., Meng Q.-H. Viscoelastoplastic displacement solution for deep buried circular tunnel based on a fractional derivative creep model // *Advances in Civil Engineering*. – 2021. – Т. 2021. – Art. 3664578. – DOI 10.1155/2021/3664578.
10. Li H., Zhou X., Wang T. и др. Viscoelastic–plastic response of tunnels based on a novel damage creep constitutive model // *International Journal of Non-Linear Mechanics*. – 2023. – Т. 151. – Art. 104365.
11. Wu J., Wang W., Cao Y. J. и др. A novel nonlinear fractional viscoelastic–viscoplastic damage creep model for rock-like geomaterials // *Computers and Geotechnics*. – 2023. – Т. 163. – Art. 105726.
12. Bao M., Zhou Z., Chen Z., Zhang L. Creep constitutive model for damaged soft rock based on fractional-order nonlinear theory // *Journal of Mountain Science*. – 2025. – Т. 22. – С. 2276–2290.
13. Huang J., Hu S., Li X., Guo S., Zhang C., Gao Z., Dou J., Yin D., Cheng Y. Creep model of weakly cemented soft rock considering damage and secondary development in FLAC3D // *Applied Sciences*. – 2025. – Т. 15. – № 9. – Art. 4838. – DOI 10.3390/app15094838.
14. Zhou J. X., Zhang J. W., Wang J. A. и др. Research on nonlinear damage hardening creep model of soft surrounding rock under the stress of deep coal resources mining // *Energy Reports*. – 2022. – Т. 8. – С. 1493–1507.
15. Zhao K., Ma H., Yang C., Chen X., Liu Y., Liang X., Cai R. Damage evolution and deformation of rock salt under creep–fatigue loading // *Rock Mechanics and Rock Engineering*. – 2021. – Т. 54. – С. 825–844. – DOI 10.1007/s00603-020-02342-6.
16. Морозов И. А., Паньков И. Л., Токсаров В. Н. Изучение устойчивости горных выработок в соляных породах // *Горный информационно-аналитический бюллетень (ГИАБ)*. – 2021. – № 9. – С. 36–47.
17. Агеев В. А. Обоснование параметров реологических испытаний каменной соли в режиме ступенчатого нагружения // *Горный информационно-аналитический бюллетень (ГИАБ)*. – 2021. – № 4. – С. 113–123.
18. Kachanov L. M. *Introduction to Continuum Damage Mechanics*. – Dordrecht : Martinus Nijhoff Publishers, 1986.
19. Lemaitre J. *A Course on Damage Mechanics*. – Berlin : Springer-Verlag, 1996.

РАЗДЕЛ 3. ФИЗИКА

3.1. ЭЛЕКТРОФИЗИКА, ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕКУПЕРАЦИИ ЭНЕРГИИ МАГЛЕВА

Кузьмин Дмитрий Александрович

д-р физ.-мат. наук, проф.

*Челябинский государственный университет,
РФ, г. Челябинск*

Мальцев Иван Валерьевич

канд. физ.-мат. наук, старший преподаватель

*Челябинский государственный университет,
РФ, г. Челябинск*

Бычков Игорь Валерьевич

д-р физ.-мат. наук, проф.,

*Челябинский государственный университет,
РФ, г. Челябинск*

THEORETICAL MODELING OF MAGLEVA ENERGY RECOVERY

Kuzmin Dmitry Aleksandrovich

Doctor of Sciences, Professor,

*Chelyabinsk State University,
Russia, Chelyabinsk*

Maltsev Ivan Valerievich

Candidate of Sciences,

*Associate Professor,
Chelyabinsk State University,
Russia, Chelyabinsk*

Bychkov Igor Valerievich

*Doctor of Sciences, Professor,
Chelyabinsk State University,
Russia, Chelyabinsk*

Аннотация. Представлены результаты теоретического моделирования процесса рекуперации энергии при торможении поезда на магнитной подушке (маглева). Разработана математическая модель, описывающая электромеханические процессы в цикле "разгон-торможение". На основе численного моделирования для поезда массой 50 т на перегоне 5 км оценен коэффициент полезного действия рекуперации за цикл, составивший ~45.5%. Проанализировано влияние типа электромагнитной системы (на обычных и сверхпроводящих магнитах) на энергоэффективность.

Abstract. The article presents the results of theoretical modeling of energy recovery during braking of a magnetic levitation train (maglev). A mathematical model describing the electromechanical processes in the acceleration-deceleration cycle is developed. Based on numerical simulations for a 50-ton train on a 5-km section, the energy recovery efficiency per cycle was estimated at ~45.5%. The impact of the electromagnetic system type (conventional and superconducting magnets) on energy efficiency was analyzed.

Ключевые слова: магнитная левитация, рекуперация энергии, линейный двигатель, энергоэффективность, математическое моделирование.

Keywords: magnetic levitation, energy recovery, linear motor, energy efficiency, mathematical modeling.

Работа выполнена при поддержке гранта в виде областной субсидии автономным и бюджетным учреждениям на создание региональных молодежных лабораторий, предусмотренной постановлением Правительства Челябинской области от 20.11.2022 г. № 657-П.

Введение

Развитие высокоскоростного транспорта на магнитной подушке (маглева) является одним из приоритетных направлений современной транспортной науки и техники, отвечающим требованиям экологичности и энергоэффективности. Ключевым аспектом повышения энергетической устойчивости таких систем является рекуперация кинетической энергии при торможении. Однако эффективность этого процесса

остается недостаточно изученной и количественно неопределенной, что создает значительные препятствия для оптимизации проектных решений и эксплуатационных режимов.

Систематический обзор существующей литературы показал наличие двух основных подходов к математическому моделированию энергоэффективности в системах магнитолевитационных поездов: онлайн-алгоритм оптимизации качения, использующий псевдоспектральный метод для оптимизации траектории с учетом рекуперации энергии [1], и стратегия управления переменной частотой скольжения для эффективности тяги линейного асинхронного двигателя [2]. Имеющихся данных недостаточно, чтобы определить, какая модель наиболее точно предсказывает эффективность рекуперации энергии, поскольку ни в одном из исследований не были представлены количественные показатели точности прогнозирования, такие как частота ошибок или коэффициенты корреляции. Более того, два подхода рассматривают разные аспекты энергоэффективности магнитолевитационных поездов – использование рекуперативной энергии несколькими поездами на системном уровне и оптимизацию тяги на уровне двигателей, что делает прямое сравнение точности нецелесообразным.

Подход управления переменной частотой скольжения продемонстрировал более убедительные доказательства применимости в ходе реальных испытаний магнитолевитационного поезда, показав повышение эффективности как тяги, так и общего энергопотребления, в то время как алгоритм оптимизации качения был проверен только с помощью численного моделирования. В обоих исследованиях отсутствовали четкие определения эффективности рекуперации энергии и подробные математические формулировки. Факты свидетельствуют о том, что для всестороннего прогнозирования эффективности рекуперации энергии потребуется интеграция оптимизации на уровне траектории с учетом рекуперативного торможения от соседних поездов со стратегиями управления на уровне двигателя, хотя количественные сравнения точности в современной литературе пока недоступны.

Таким образом, актуальность настоящего исследования обусловлена необходимостью разработки целостной математической модели, позволяющей дать количественную оценку КПД рекуперации энергии для маглева в рамках полного цикла «разгон-торможение». Целью данной работы является моделирование этого процесса с последующим расчетом доли энергии, возвращаемой в систему. Решение этой задачи позволит заложить основу для последующей интеграции оптимизации траектории на сетевом уровне и стратегий управления на уровне

двигателя, что является следующим шагом в создании энергетически оптимальных систем магнитолевитационного транспорта.

Материалы и методы

Постановка задачи

Рассчитаем процент энергии, возвращаемой в сеть за один цикл "разгон-торможение" на заданном перегоне. Движение поезда будем рассматривать как движение материальной точки с постоянной массой m . Профиль пути будем считать горизонтальным (игнорируем уклоны). Температура и другие внешние условия постоянны. КПД силовой электроники (инверторов, преобразователей) примем также постоянными.

Модель состоит из двух взаимосвязанных частей: механической и электрической.

Движения поезда описывается вторым законом Ньютона с учетом силы тяги $F_{traction}$ (при разгоне), силы торможения $F_{braking}$ (при рекуперации эта сила положительна и создается линейным двигателем), и силы сопротивления движению $F_{resistance}$:

$$m \cdot dv/dt = F_{traction} - F_{braking} - F_{resistance} \quad (1)$$

Сила сопротивления для поезда на магнитной подушке включает в себя аэродинамическое сопротивление $F_{air} = 0.5\rho C_d A v^2$ (ρ – плотность воздуха, C_d – коэффициент аэродинамического сопротивления, A – лобовая площадь) и сопротивление, обусловленное магнитным подвесом (вызывается вихревыми токами в полотне и другими эффектами, часто пропорциональна скорости) $F_{mag} = k_{mag} v$, где k_{mag} – коэффициент, определяемый конструкцией подвеса.

При разгоне линейный двигатель (синхронный или асинхронный) потребляет энергию из сети, преобразуя ее в механическую работу. Потребляемая мощность $P_{in} = F_{traction}v/\eta_{inv}$, где η_{inv} – КПД инвертора (преобразует постоянный ток в переменный). При торможении линейный двигатель переходит в генераторный режим. Он создает тормозную силу и преобразует кинетическую энергию поезда обратно в электрическую. Генерируемая электрическая мощность $P_{gen} = F_{braking} v \eta_{gen}$. Здесь η_{gen} – КПД системы генерации. Эта мощность возвращается в сеть или в накопители.

Энергетический баланс за цикл складывается из энергии, затраченной на разгон $E_{acc} = \int P_{in}(t) dt$ (интегрирование ведется по времени разгона), энергии, рекуперированной при торможении, $E_{rec} = \int P_{gen}(t) dt$ (интегрирование по времени торможения) и энергии, затраченной на преодоление сопротивления $E_{loss} = \int F_{resistance} v dt$. Эта энергия

безвозвратно теряется (в основном, в тепло). КПД рекуперации для цикла можно оценить как: $\eta_{cycle} = E_{rec}/(E_{acc} + E_{loss})$.

Результаты моделирования

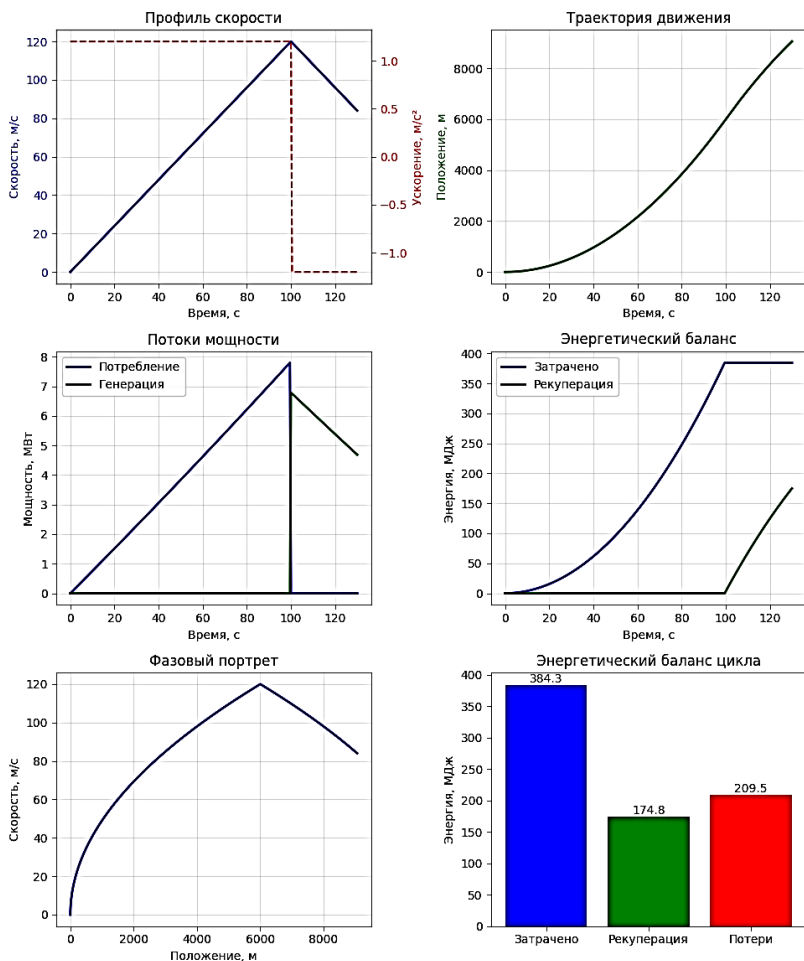


Рисунок 1. Результаты моделирования процесса рекуперации энергии магнитолевитационного поезда за один цикл

Результаты моделирования приведены на рисунке (рис. 1). Для моделирования были выбраны следующие параметры: масса 50 т, максимальная скорость 432 км/ч, длина пути 5 км. Анализ полученных данных показывает, что максимальное значение кинетической энергии достигало 360 МДж, затраченная энергия на разгон составила 384.3 МДж, рекуперация энергии во время торможения составила 174.8 МДж. Эти значения позволяют оценить КПД рекуперации $\eta_{\text{cycle}} \sim 45.5\%$.

Таким образом, разработанная модель позволяет производить оценки КПД рекуперации энергии магнитолевитационного поезда с учетом различных процессов.

Обсуждение результатов

Для полноты рассмотрения нужно учесть влияние типа электромагнитной системы. Для системы на обычных электромагнитах источник магнитного поля – это катушки с железным сердечником, питаемые бортовым источником. Для них характерны Джоулевы потери в обмотках поезда и потери в сердечнике из-за вихревых токов и гистерезиса. Как следствие, часть рекуперированной энергии сразу тратится на питание самих электромагнитов, что снижает общий КПД системы. В случае системы на сверхпроводящих магнитах источник поля – это катушки из сверхпроводящего материала (например, Nb-Ti), охлажденные до температур жидкого гелия (~ 4.2 К) или азота (для ВТСП). Для такого типа системы характерно нулевое омическое сопротивление. В установившемся режиме ток в катушках циркулирует без потерь, а значит не требуется бортовое питание для поддержания поля (только для криосистемы). Возможность создания очень сильных полей увеличивает наводимую ЭДС и тормозную силу. Однако эти особенности сопряжены и с новыми видами потерь. Дополнительная энергия должна потребляться криогенной установкой для поддержания низкой температуры. Это основной источник потерь. Также при движении в проводящих элементах пути (например, в алюминиевом полотне) мощное поле наводит сильные вихревые токи, которые сами по себе создают тормозящую силу и греют полотно. В вакуумном трубопроводе это основной источник потерь на движение с постоянной скоростью и конкурирующий механизм торможения.

Заключение

В данной работе была разработана и применена математическая модель для оценки эффективности рекуперации энергии при торможении поезда на магнитной подушке. Моделирование цикла «разгон-торможение» для поезда массой 50 т на горизонтальном участке длиной

5 км позволило оценить коэффициент полезного действия рекуперации на уровне $\sim 45,5\%$. Этот результат демонстрирует значительный потенциал систем рекуперативного торможения для повышения энергоэффективности маглева.

Основным ограничением исследования являются принятые упрощения: неизменные внешние условия, постоянные КПД преобразователей и отсутствие учёта профиля пути. Кроме того, полученная оценка эффективности в значительной степени зависит от выбранных параметров модели, таких как коэффициент магнитного сопротивления и аэродинамические характеристики.

Как показал анализ, ключевым фактором, влияющим на общий энергобаланс, является тип электромагнитной системы левитации. Системы на сверхпроводящих магнитах, хотя и требуют затрат на криогенное охлаждение, позволяют минимизировать потери в обмотках и создавать более сильные тормозные усилия, что открывает пути для дальнейшего повышения эффективности рекуперации.

Для более точных прогнозов в будущих исследованиях необходимо интегрировать оптимизацию движения на системном уровне (учёт графика движения нескольких поездов) со стратегиями управления на уровне привода, а также учитывать реальный профиль пути и переменные условия окружающей среды. Предложенная модель служит основой для таких комплексных исследований и может быть использована для сравнительного анализа различных технических решений в области энергосбережения высокоскоростного магнитолевитационного транспорта.

Список литературы:

1. Qingyang Y., Weifeng Zh. and Hongze Xu. Online Energy-Efficient Operation of Maglev Trains Considering Regenerative Energy Utilization. China Automation Congress (CAC) 2023. – PP. 6701-6706.
2. Hyunuk S., Lim J., Park S. Uk, Mok H. A study on efficiency of magnetic levitation trains using linear induction motor by slip pattern. IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE) 2019. – PP. 1635-1640.

ҚАЗАҚ ТІЛІНДЕГІ МАҚАЛАЛАР

ФИЗИКА-МАТЕМАТИКА ҒЫЛЫМДАРЫ

1-БӨЛІМ.

ФИЗИКА

1.1. ОПТИКА

ОПТИКАНЫ ОҚЫТУДА ОҚУШЫЛАРДЫҢ БЕЛСЕНДІЛІГІН АРТТЫРУҒА АРНАЛҒАН ИНТЕРАКТИВТІ ТАПСЫРМАЛАР

Бердибек Диана Бақытбекқызы

магистранты,

математика, физика және информатика факультеті,

Абай атындағы ҚазҰПУ,

Қазақстан, Алматы

Қазіргі білім беру жүйесінде оқушылардың танымдық белсенділігін арттыру мәселесі педагогикалық зерттеулердің басты бағыттарының бірі болып отыр. Әсіресе, физика пәнінің «Оптика» бөлімін оқытуда оқушылардың белсенді қатысуын қамтамасыз ететін интерактивті тапсырмаларды қолдану ерекше маңызға ие. Оптика – көрнекілікке, тәжірибеге және логикалық талдауға негізделген бөлім, сондықтан оны оқытуда визуалды және тәжірибелік интерактивті тәсілдер үлкен нәтиже береді. Оқушылардың белсенді танымдық әрекетін дамыту туралы ғылыми тұжырымдарды Лев Семенович Выготский өзінің 1934 жылы жарық көрген *«Мышление и речь»* еңбегінде негіздеді. Ғалымның пікірінше, оқу процесі оқушылардың әлеуметтік өзара әрекетіне сүйенгенде ғана нәтижелі

болады. Бұл идея интерактивті оқыту тәсілдерінің психологиялық негізін қалады. Физика пәнін оқыту әдістемесін жетілдіруде Исаак Ильич Лернер мен Михаил Николаевич Скаткин 1980 жылы ұсынған белсенді оқыту деңгейлері – репродуктивті, эвристикалық және зерттеушілік тәсілдер – қазіргі әдістемелік жүйенің іргетасы болып табылады. Олар оқушылардың белсенді оқу әрекетіне бағытталған тапсырмаларды біртіндеп күрделендіру арқылы ғылыми ойлауға жетелеудің тиімділігін көрсетті.

Интерактивті тапсырмалар – оқушылардың жеке және топтық белсенділігін арттыратын, оқу процесінде өзара әрекет пен зерттеу қызметін дамытатын әдістер жүйесі. Мұндай тапсырмалар оқушылардың тек дайын білімді меңгеруін емес, білімді өз бетімен іздену арқылы алуға бағыттайды. Білім беру философиясында Джон Дьюи 1938 жылы жазған «*Experience and Education*» еңбегінде оқу әрекетінің тиімді болуы тәжірибеге негізделген белсенді зерттеу мен практикалық әрекет арқылы ғана жүзеге асатынын дәлелдеді. Бұл көзқарас интерактивті оқытудың теориялық негізін бекітті. Бенджамин Блум 1956 жылы ұсынған «*Taxonomy of Educational Objectives*» жіктемесі бойынша, физика пәніндегі тапсырмалар оқушылардың ойлау деңгейін – білу, түсіну, қолдану, талдау, жинақтау және бағалау – сатыларымен дамытады. Оптикалық құбылыстарды түсіндіретін тапсырмаларды осы сатыларға сәйкес құру оқушылардың когнитивтік белсенділігін жүйелі арттырады[1].

Оптика тақырыптары – жарықтың таралуы, шағылуы, сынуы, линзалар және оптикалық құрылғылар – оқушылардың бақылау, тәжірибе жасау және модельдеу әрекеттері арқылы оңай меңгеріледі. Интерактивті әдістердің ішінде PhET симуляциялары, GeoGebra платформасы және виртуалды зертханалар кеңінен қолданылады.

Кесте 1.

Оптикалық құбылыстарды түсіндіруге арналған интерактивті тапсырмалар

Тақырып	Тапсырма түрі	Мақсаты	Құрал
Жарықтың түзу сызықты таралуы	Виртуалды тәжірибе	Көлеңке мен жарық бағытын бақылау	PhET симуляциясы
Жарықтың шағылуы	Экрандағы бақылау	Шағылу бұрышы мен түсу бұрышы арасындағы байланысты анықтау	GeoGebra
Жарықтың сынуы	Онлайн зертхана	Орта тығыздығына	Optics Lab

Тақырып	Тапсырма түрі	Мақсаты	Құрал
		байланысты сыну бұрышын өлшеу	
Кескін түзілуі	Конструкторлық тапсырма	Линзалардың түрін және кескін орнын анықтау	PhET, Canva

1-кестеде ұсынылған интерактивті тапсырмалар оқушылардың теориялық білімін практикалық әрекет арқылы бекітуге бағытталған. Мұндай тапсырмалар көрнекілік пен тәжірибенің үйлесімін қамтамасыз етіп, оптикалық құбылыстарды терең түсінуге мүмкіндік береді. Сонымен қатар оқушылардың зерттеу дағдылары мен сыни ойлау қабілеті дамиды, себебі олар өз бақылауларын талдап, қорытынды жасауға дағдыланады. Осындай тәсіл оқыту процесін белсенді, қызықты және нәтижелі етеді. Интерактивті құралдарды жүйелі қолдану оқушылардың пәнге деген қызығушылығын арттырып, олардың өзіндік оқу ынтасын күшейтеді. Эвристикалық тапсырмалар оқушыларды гипотеза құруға және оны тәжірибе арқылы тексеруге жетелейді. Мысалы, «Жарықтың сынуы» тақырыбында оқушылар түрлі сұйықтықтардың сыну көрсеткішін анықтап, жарықтың таралу бағытына әсер ететін факторларды салыстырады[2].

Кесте 2.

Эвристикалық сипаттағы интерактивті тапсырмалар

Тақырып	Тапсырма мазмұны	Күтілетін нәтиже	Әдіс түрі
Сыну құбылысы	Әртүрлі ортадағы сыну бұрыштарын өлшеу	Оптикалық заңдылықтарды өздігінен ашу	Тәжірибелік зерттеу
Линзалар	Кескіннің үлкеюін зерттеу	Нақты және жалған кескін ұғымын түсіну	Модельдеу
Айна	Кескіннің орналасуын болжау	Геометриялық оптиканың заңдарын қолдану	Болжам және тексеру

2-кестеде көрсетілген эвристикалық сипаттағы интерактивті тапсырмалар оқушылардың өздігінен ойлау, болжам жасау және дәлелдеу дағдыларын дамытуға бағытталған. Мұндай тапсырмалар арқылы

оқушылар дайын ақпаратты қабылдаушы емес, білімді ізденіс нәтижесінде табушы тұлғаға айналады. Эвристикалық әдіс оптикалық заңдылықтарды тәжірибе жүзінде өз бетімен ашуға жағдай жасап, оқушылардың шығармашылық және зерттеушілік белсенділігін арттырады. Сонымен бірге бұл тәсіл оқушылардың логикалық ойлауын дамытып, ғылыми қорытынды жасау мәдениетін қалыптастырады[3].

Зерттеу элементтері бар тапсырмалар оқушылардың шығармашылық және ғылыми ізденісін дамытады. Дэвид Колб 1984 жылы ұсынған тәжірибелік оқу циклі теориясы бойынша білімді меңгеру төрт сатыдан тұрады: нақты тәжірибе, бақылау және рефлексия, теориялық қорытынды және жаңа жағдайда қолдану. Бұл тәсіл оптикалық тәжірибелерге толық сәйкес келеді. Мысалы, оқушылар «Интерференция құбылысы» тақырыбында екі саңылау тәжірибесін виртуалды түрде орындап, толқындардың қабаттасу заңдылығын талдай алады.

Кесте 3.

Зерттеу және жоба бағытындағы интерактивті тапсырмалар

Тақырып	Тапсырма атауы	Негізгі әрекет	Құрал немесе платформа
Интерференция	«Жарық толқындарының қабаттасуы»	Нәтижені өлшеу және интерференциялық жолақты талдау	PhET Light Simulation
Дифракция	«Жарықтың бөгеттен айналып өтуі»	Толқындық табиғатты бақылау	Virtual Lab
Көру құралдары	«Телескопты модельдеу»	Құрылымының жұмыс принципін көрсету	Tinkercad немесе GeoGebra
Оптикалық бейнелеу	«Жарық жолын картаға түсіру»	Оптикалық жүйелерді зерттеу	Canva немесе PowerPoint

3-кестеде берілген зерттеу және жоба бағытындағы интерактивті тапсырмалар оқушыларды ғылыми ізденіс пен шығармашылық әрекетке тартуға мүмкіндік береді. Мұндай тапсырмалар орындау барысында оқушылар эксперимент жүргізіп, мәліметтерді талдайды, нәтижелерін түсіндіріп, ғылыми қорытынды жасайды. Бұл үрдіс олардың зерттеу мәдениетін қалыптастырып, физикалық құбылыстарды жүйелі түрде талдау дағдысын дамытады. Сонымен қатар жобалық жұмыс түрлері топтық өзара әрекетті, жауапкершілікті және коммуникациялық дағдыларды жетілдіреді. Осындай тапсырмаларды жүйелі енгізу

оқушылардың ғылыми ойлау қабілетін арттырып, оларды зерттеушілікке бағытталған тұлға ретінде қалыптастырады[4].

Қазақстандық педагогикалық зерттеулерде интерактивті технологиялардың тиімділігі кеңінен дәлелденген. Қанипа Омарханқызы Бекжанова 2019 жылы жүргізген зерттеуінде физика сабақтарында ақпараттық-коммуникациялық технологияларды қолдану оқушылардың пәнге деген қызығушылығын арттырып, танымдық белсенділігін күшейтетіні анықталған. Сол сияқты Алма Нұржановна Нұрғалиева 2020 жылғы еңбегінде физика сабақтарында топтық талқылау мен пікір алмасуға негізделген интерактивті әдістер оқушылардың сыни ойлау қабілетін дамытатынын және өзіндік рефлексия жасауға үйрететінін көрсетті.

Кесте 4.

Қазақстандық зерттеулер негізінде ұсынылатын интерактивті әдістер

Әдіс атауы	Мақсат	Пайдалану мысалы	Ғалым
АКТ арқылы визуализация	Пәнге қызығушылықты арттыру	Оптикалық құбылыстарды анимация түрінде көрсету	Қанипа Омарханқызы Бекжанова
Топтық жоба	Сыни ойлау мен талдау	«Жарықтың шағылуы мен сынуы» тақырыбында дебат	Алма Нұржановна Нұрғалиева
Виртуалды зертхана	Танымдық белсенділікті арттыру	Онлайн тәжірибелер жүргізу	Қанипа Омарханқызы Бекжанова
Құрастырушы тапсырма	Шығармашылық ойлау	Линзалар жүйесін жобалау	Алма Нұржановна Нұрғалиева

кестеде ұсынылған әдістер қазақстандық ғалымдардың тәжірибелік зерттеулеріне негізделіп жасалған және олар оптиканы оқытудағы интерактивті тәсілдердің тиімділігін дәлелдейді. Мұндай әдістерді қолдану арқылы оқушылардың оқу белсенділігі мен пәнге деген қызығушылығы айтарлықтай артады. Сонымен қатар интерактивті ортада топтық жоба, виртуалды зертхана немесе визуализация элементтерін пайдалану оқушылардың сыни ойлауын, шығармашылық қабілетін және өз ойын дәлелмен жеткізу дағдысын дамытады. Бұл тәсілдер мұғалімге оқушылардың жеке ерекшеліктерін ескеріп, сараланған оқыту моделін

жүзеге асыруға мүмкіндік береді. Нәтижесінде оптиканы оқыту процесі заманауи талаптарға сай, қызықты әрі тиімді сипат алады[5].

Интерактивті тапсырмалар арқылы оқушылар оптикалық құбылыстарды тек теория жүзінде ғана емес, тәжірибе және модельдеу арқылы да меңгереді. Бұл өз кезегінде олардың білімін өмірлік жағдайларда қолдануға үйретеді. Әсіресе, жарықтың таралуы, сынуы, шағылуы және линзалармен жұмыс сияқты тақырыптарда интерактивті құралдар оқушылардың зейінін шоғырландырып, оқу әрекетіне эмоционалды қызығушылық тудырады. Мұндай тәсілдер арқылы білім алушы өз ойын еркін жеткізе алады, топ ішінде пікір алмасып, өз көзқарасын дәлелдейді, яғни оқу үдерісі шынайы танымдық әрекетке айналады. Оптиканы оқытуда қолданылатын виртуалды зертханалар, симуляциялар, цифрлық конструкторлар мен жобалық жұмыстар оқушылардың ақпараттық және зерттеу мәдениетін қалыптастырады. Әр тапсырма оқушының өзіндік ойлау стилін дамытуға, тәжірибе жасауға және ғылыми заңдылықтарды өз бетімен тұжырымдауға бағытталады. Нәтижесінде оқушылар тек дайын білімді қабылдамай, оны талдап, қайта өңдеп, жаңа жағдайға бейімдеп қолдануға дағдыланады. Сонымен қатар, интерактивті тапсырмаларды жүйелі енгізу мұғалім мен оқушы арасындағы ынтымақтастық қарым-қатынасты күшейтеді. Сабақ диалогтік сипатқа ие болып, оқушылардың белсенділігі мен жауапкершілігі артады. Мұғалім тек білім беруші емес, бағыттаушы және серіктес рөлін атқарады. Ал оқушылар оқу процесінің белсенді қатысушысына айналып, бірлескен жұмыс барысында бір-бірінен үйренеді, өз пікірін қорғауды және дәлелдеуді меңгереді. Осындай әдістерді қолдану нәтижесінде оқушылардың физика пәніне деген қызығушылығы артып, олардың ғылыми дүниетанымы қалыптасады. Оқушылар тәжірибе арқылы қоршаған ортаны түсінуге, табиғат құбылыстарын ғылыми тұрғыдан түсіндіруге және өздігінен зерттеу жүргізуге үйренеді. Бұл білім алушыларды тек пәндік тұрғыдан емес, жалпы тұлғалық тұрғыдан дамытады – яғни олар сын тұрғысынан ойлайтын, дербес шешім қабылдай алатын және жаңашыл идея ұсына білетін тұлғаға айналады.

Қорытындылай келе, оптиканы оқытуда интерактивті тапсырмаларды пайдалану оқу процесін жандандырып, білім сапасын арттырады. Бұл тәсіл оқушылардың танымдық белсенділігін дамытып қана қоймай, олардың шығармашылық әлеуетін, зерттеушілік қабілетін және заманауи технологияларды пайдалану дағдыларын жетілдіреді. Осындай бағыттағы жұмыс мектеп физикасын оқытуды жаңа сапалық деңгейге көтеріп, оқушылардың ғылымға қызығушылығын арттыруға негіз болады.

Пайдаланылған әдебиеттер тізімі:

1. Сейітқалиев Қ. Физиканы оқытуда тәжірибелік әдістерді қолдану: оқу құралы. – Алматы: Білім, 2017. – 184 б.
2. Қасымова Ә. Жаратылыстану пәндерін оқытудағы инновациялық технологиялар. – Астана: Фолиант, 2019. – 210 б.
3. Мырзабаев А. Физиканы оқыту әдістемесі: теория және практика. – Алматы: Қазақ университеті, 2020. – 256 б.
4. Ахметова Г. Оқу процесінде интерактивті әдістерді қолданудың тиімділігі. – Шымкент: Педагогика, 2018. – 172 б.
5. Ермеков Н. Қазіргі заманғы физика сабақтарында оқушылардың танымдық белсенділігін арттыру жолдары. – Қарағанды: Болашақ, 2021. – 198 б.

1.2. ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ФИЗИКИ

ЭКСПЕРИМЕНТТІК ДӘЛЕЛДЕМЕЛЕР АРҚЫЛЫ ЭЛЕКТР ҚҰБЫЛЫСТАРЫН ТҮСІНДІРУДІҢ ТИІМДІЛІГІ

Сатауова Ақжүніс Талғатқызы

физика мамандығының 2 курс магистранты
педагогикалық университеті,
Абай атындағы Қазақ ұлттық,
Қазақстан, Алматы

Қырықбаева Әсем Ақылшақызы

Ғылыми жетекші,
PhD, аға оқытушы,
Абай атындағы Қазақ ұлттық,
Қазақстан, Алматы

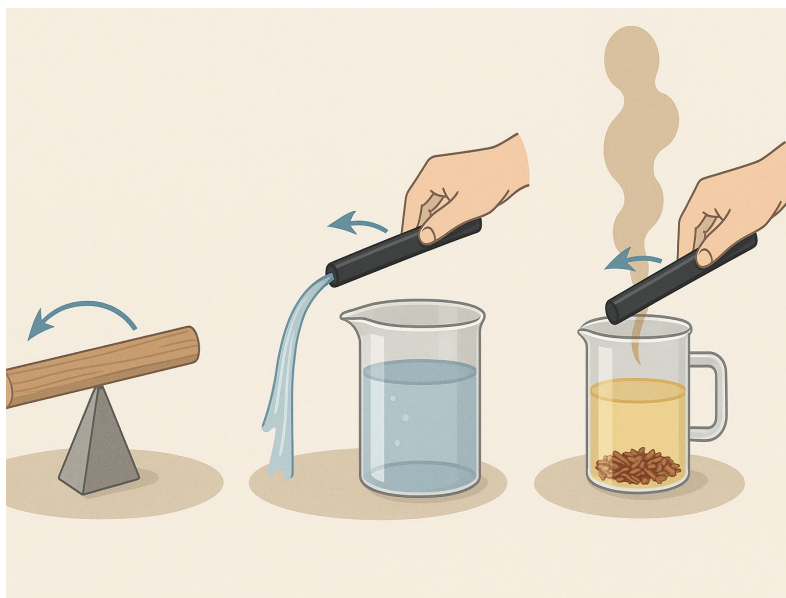
Андатпа. Бұл мақалада электр құбылыстарын түсіндіру барысында эксперименттік дәлелдемелердің маңыздылығы мен тиімділігі қарастырылады. Зерттеу барысында тәжірибелік әдістер арқылы оқушылардың теориялық білімдерін нақты тәжірибемен ұштастыру жолдары талданады. Эксперименттік тапсырмалар мен демонстрациялық тәжірибелерді қолдану оқушылардың пәнге деген қызығушылығын арттырып, физикалық ұғымдарды терең түсінуге мүмкіндік беретіні көрсетіледі. Сонымен қатар, тәжірибелер арқылы алынған нәтижелерді талдау және салыстыру оқыту сапасын арттырудағы тиімді әдіс ретінде ұсынылады.

Түйін сөздер: электр құбылыстары, эксперимент, тәжірибелік дәлелдеме, оқыту әдістемесі, тиімділік.

Қазіргі таңда физиканы оқытуда оқушылардың тек теориялық біліммен шектелмей, оны тәжірибеде қолдана алу қабілетін дамыту маңызды талаптардың бірі болып отыр. Электр құбылыстары – күрделі әрі көзге көрінбейтін үдерістер болғандықтан, оларды түсіндіруде эксперименттік дәлелдемелер шешуші рөл атқарады. Тәжірибе арқылы оқушылар электр өрісінің қасиеттерін, токтың әсерін және

өткізгіштердің ерекшеліктерін нақты бақылап, табиғи заңдылықтарды өз бетімен түсінуге мүмкіндік алады [1]. Сондықтан электр тақырыптарын оқытуда эксперименттік әдісті жүйелі және мақсатты қолдану – оқушылардың танымдық белсенділігін арттырудың, сыни ойлау мен зерттеушілік қабілеттерін дамытудың тиімді жолы болып табылады. Осы себепті электр құбылыстарын оқыту үдерісінде эксперименттік дәлелдемелерге сүйену – оқушылардың теориялық білімін тәжірибемен бекітудің тиімді жолы [2]. Енді электр құбылыстарын түсіндіруде қолдануға болатын эксперименттерге тоқталайық. Мысалы, кез келген денелердің – қатты, сұйық және газ тәрізді заттардың – электрлендірілген денелерге тартылатынын тәжірибе жүзінде дәлелдеуге болады.

Бірінші тәжірибеде (1-сурет) эбонит таяқшаны жүн немесе мехпен үйкеп электрлейміз де, оны өткір ұшына орнатылған ағаш таяқшаға жақындатамыз. Нәтижесінде ағаш таяқша эбонитке тартылып, оның соңынан бұрыла бастайды. Бұл құбылыс қатты денелердің электрлендірілген денеге тартылуын көрсетеді [3].



Сурет 1. Денелердің электрлендірілген денелерге тартылуы

Екінші тәжірибеде (1-сурет б) пластмасса ыдыстың қабырғасына бекітілген жіңішке шүмек арқылы су ағынын жібереміз. Электрлендірілген эбонит таяқшаны осы су ағынына жақындатқанда, су тамшылары мен ағынның таяқшаға қарай ауытқитынын байқаймыз. Бұл сұйық денелердің де электрлендірілген денелерге тартылатынын дәлелдейді [3].

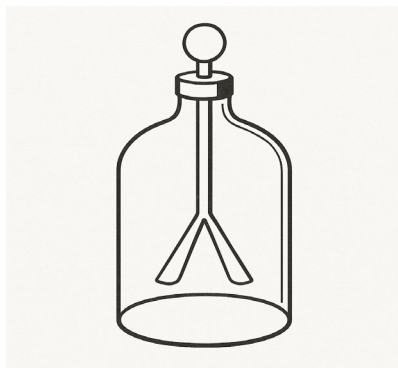
Үшінші тәжірибеде (1-сурет с) шыны ыдыстың түбіне мыс жаңқаларын салып, үстіне азот қышқылын құямыз. Реакция нәтижесінде ыдыстан қоңыр түсті азот диоксиді (NO_2) газы бөлініп шығады. Егер осы газ ағынына электрлендірілген таяқшаны жақындатсақ, газ ағыны да таяқшаға тартылатынын байқаймыз [3].

Осы тәжірибелердің барлығы катты, сұйық және газ тәрізді денелердің электрлендірілген денелерге тартылатынын айқын дәлелдейді. Мұндай эксперименттер арқылы оқушылар электр өрісінің табиғатын, зарядтардың өзара әсерін және электростатикалық күштердің бар екендігін көзбен көріп түсіне алады.

Электр құбылыстарын зерттеу барысында тек денелердің тартылуын ғана емес, сонымен бірге олардың электрлену деңгейін анықтауға мүмкіндік беретін құралдарды да көрсету маңызды. Мұндай құралдардың бірі – электроскоп.

Электроскоп – дененің электрленгенін анықтауға арналған ең қарапайым құрылғы. Тәжірибе жасау үшін мөлдір диэлектрлік (окшаулағыш) ыдыстың ішіне металл стержень орналастырылады. Оның жоғарғы ұшында кішкентай металл шарик, ал төменгі ұшында жұқа металл жапырақшалар (лепестки) бекітіледі. Егер электрлендірілген денені осы шарикке жақындатсақ, зарядтың әсерінен жапырақшалар бір-бірінен алыстай бастайды. Бұл – дененің электрленгенін дәлелдейтін айқын белгі. Электрлену күшейген сайын жапырақшалардың арақашықтығы артады, ал заряд азайғанда қайтадан жақындайды [3].

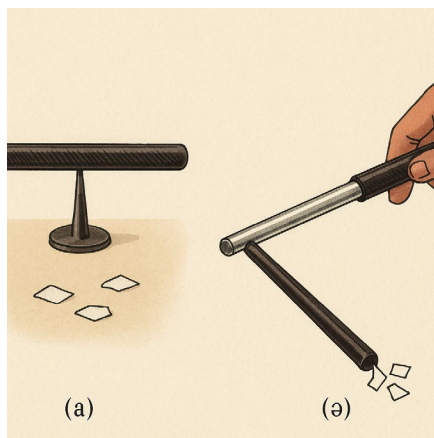
Осылайша, бұл тәжірибе электрленуді анықтайтын құрал – электроскопты (2-сурет) жасауға болатынын және оның өте әлсіз электрленуді де сезе алатынын көрсетеді. Мұндай тәжірибелер оқушылардың электростатикалық құбылыстарды түсінуін тереңдетіп, олардың ғылыми-зерттеу қызығушылығын арттырады [4].



Сурет 2. Өте әлсіз электрленуді сезетін электроскоп

Электрлендіру құбылысын зерттегенде заттардың электр өткізгіштігі бойынша екі негізгі топқа бөлінетінін көрсету маңызды: электр тоғын өткізетін заттар және тоқты өткізбейтін заттар.

Келесі тәжірибеде (3-сурет) эбонит таяқшаны электрлейміз де, оны тағы бір эбонит таяқшаның бір ұшына тигіземіз; екінші ұшында жеңіл қозғалатын заттар тұрғанымен, олардың эбонит таяқшаға тартылуы байқалмайды. Бұл эбониттің (сонымен қатар әйнек пен пластмассалардың) электр зарядын басқа денелерге өткізбеушілігін – яғни олар изолятор немесе диэлектрик екендігін дәлелдейді.



Сурет 3. Эбонит таяқшанымен тәжірибе

Екінші тәжірибеде (3-сурет) металдан жасалған стерженьнің бір ұшына эбонит таяқшаны бекітеміз. Қарапайым жағдайда металл стерженьге жақындатылған жеңіл денелер тартылмай тұрады, алайда екінші ұшын наэлектризденген эбонит таяқшамен жанасқанда жеңіл денелер стерженьдің ұшына қарай тартыла бастайды. Бұл өткізгіштік арқылы зарядтың металға өткенін және металдардың электр тогын өткізетін – яғни өткізгіштер екенін көрсетеді [3].

Осылайша жасалған қарапайым тәжірибелер көмегімен заттарды өткізгіштер мен изоляторларға бөлуге болатыны, сондай-ақ электр зарядтарының өткізгіштер бойымен қалай таралатыны көрнекі түрде дәлелденеді [1].

Қорытындылай келе, электр құбылыстарын түсіндіруде эксперименттік дәлелдемелерге сүйену – физиканы оқытудың ең тиімді әдістерінің бірі болып табылады. Тәжірибелер арқылы оқушылар электриздену құбылысының табиғатын, электр зарядының бар екенін нақты бақылау мүмкіндігіне ие болады. Осындай көрнекі тәжірибелер білім алушылардың ғылыми ойлау қабілетін дамытады, физикалық заңдылықтарды өмірмен байланыстыра түсінуге жағдай жасайды және зерттеу дағдыларын қалыптастырады.

Эксперименттік әдіс – теорияны практикамен ұштастырудың ең сенімді жолы. Сондықтан да орта мектепте электр және магнетизм та-
рауын оқыту кезінде демонстрациялық тәжірибелер мен зертханалық жұмыстарды кеңінен қолдану оқушылардың пәнге деген қызығушы-
лығын арттырып, білім сапасын едәуір жақсартады.

Пайдаланылған әдебиеттер:

1. Құдайқұлов М., Жаңабергенов Қ. Орта мектепте физиканы оқыту әдісте-
месі. – Алматы: Рауан, 1998. – 310 б.
2. Киселев Д.Ф. и др. Электричество и магнетизм. Методика решения задач:
Учебное пособие. – Москва: Физический факультет МГУ, 2010. – 332 с.
3. Майер В.В., Майер Р.В. Электричество: учебные экспериментальные дока-
зательства. – Москва: Издательская фирма «Физматлит», МАИК «
4. Halliday D., Resnick R., Walker J. Fundamentals of Physics. – 11th Edition. –
Wiley, 2018.

НАУЧНЫЙ ФОРУМ: ТЕХНИЧЕСКИЕ И ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ

*Сборник статей по материалам ХСІ международной
научно-практической конференции*

№ 11 (91)
Ноябрь 2025 г.

В авторской редакции

Подписано в печать 04.12.25. Формат бумаги 60х84/16.
Бумага офсет №1. Гарнитура Times. Печать цифровая.
Усл. печ. л. 5,38. Тираж 550 экз.

Издательство «МЦНО»
123098, г. Москва, ул. Маршала Василевского, дом 5, корпус 1, к. 74
E-mail: tech@nauchforum.ru

Отпечатано в полном соответствии с качеством предоставленного
оригинал-макета в типографии «Allprint»
630004, г. Новосибирск, Вокзальная магистраль, 1



НАУЧНЫЙ
ФОРУМ
nauchforum.ru