



S

CIENCE FOR MODERN MAN

WISSENSCHAFT FÜR DEN
MODERNEN MENSCHEN

MONOGRAPH
BOOK 26 PART 2

'2024



Lukin V.V., Kryvenko L.S., Krylik L.V., Antonenko A.V., Korobeinikova T.I. et al.

WISSENSCHAFT FÜR DEN MODERNEN MENSCHEN
INFORMATIK, KYBERNETIK UND AUTOMATISIERUNG, SICHERHEITSSYSTEME,
PHYSIK UND MATHEMATIK

SCIENCE FOR MODERN MAN

COMPUTER SCIENCE, CYBERNETICS AND AUTOMATION, SECURITY SYSTEMS,
PHYSICS AND MATHEMATICS

Monographic series «European Science»

Book 26. Part 2.

In internationalen wissenschaftlich-geometrischen Datenbanken enthalten
Included in International scientometric databases

MONOGRAPHIE
MONOGRAPH

Authors:

Krylik L.V. (1), Antonenko A.V. (2), Buchenko I.A. (2), Korotkov S.S. (2),
Balvak A.A. (2), Tsvyk O.S. (2), Tverdokhleba A.O. (2),
Korotin D.S. (2), Ziniar D.A. (2), Solobaiev S.G. (2), Mishkur Y.V. (2),
Danevych O.V. (2), Chupakhin M.S. (2), Lukin V.V. (3), Kryvenko S.S. (3),
Kryvenko L.S. (3), Krylova O.V. (3), Korobeinikova T.I. (4),
Budarin V. (5)

Reviewers:

Zabolotna Nataliia, Doctor of Sciences, Professor of the Department of Biomedical Engineering and Optical-Electronic Systems, Vinnytsia National Technical University (1)
Shutko V.N., Professor, Doctor of Technical Science, National Aviation University (3)

Wissenschaft für den modernen Menschen: Informatik, Kybernetik und Automatisierung, Sicherheitssysteme, Physik und Mathematik. Monografische Reihe «Europäische Wissenschaft». Buch 26. Teil 2. 2024.

Science for modern man: Computer science, cybernetics and automation, Security systems, Physics and mathematics. Monographic series «European Science». Book 26. Part 2. 2024.

ISBN 978-3-98924-032-2

Published by:

ScientificWorld-NetAkhatAV

Lußstr. 13

76227 Karlsruhe, Germany

e-mail: editor@promonograph.org

site: <https://desymp.promonograph.org>

Copyright © Authors, 2024

Copyright © Drawing up & Design. ScientificWorld-NetAkhatAV, 2024

*ÜBER DIE AUTOREN / ABOUT THE AUTHORS*

1. *Krylik Lyudmila Viktorivna*, Candidate of Technical Sciences, associate professor, Vinnytsia National Technical University - *Chapter 1*
2. *Antonenko Artem Vasylovych*, Candidate of Technical Sciences, associate professor, National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine - *Chapter 2 (co-authored)*
3. *Buchenko Ihor Anatoliyovych*, State University information and communication technologies - *Chapter 2 (co-authored)*
4. *Korotkov Serhii Stanislavovych*, State University information and communication technologies - *Chapter 2 (co-authored)*
5. *Balvak Andrii Anatolijovych*, State University information and communication technologies - *Chapter 2 (co-authored)*
6. *Tsvyk Oleksandr Serhiyovych*, State University information and communication technologies - *Chapter 2 (co-authored)*
7. *Tverdokhlebskiy Arsenii Oleksandrovich*, State University information and communication technologies - *Chapter 2 (co-authored)*
8. *Korotin Denys Serhiyovych*, State University information and communication technologies - *Chapter 2 (co-authored)*
9. *Ziniar Denys Arkadiiovych*, State University information and communication technologies - *Chapter 2 (co-authored)*
10. *Solobaiev Serhii Gennadiyovych*, State University information and communication technologies - *Chapter 2 (co-authored)*
11. *Mishkur Yurii Valentynovych*, State University information and communication technologies - *Chapter 2 (co-authored)*
12. *Danevych Oleksii Volodymyrovych*, State University information and communication technologies - *Chapter 2 (co-authored)*
13. *Chupakhin Mykyta Sergiyovich*, State University information and communication technologies - *Chapter 2 (co-authored)*
14. *Lukin Volodymyr Vasilyovych*, Doctor of Technical Sciences, Professor, National Aerospace University “Kharkiv Aviation Institute” - *Chapter 3 (co-authored)*
15. *Kryvenko Sergii Stanislavovych*, Candidate of Technical Sciences, senior researcher, National Aerospace University “Kharkiv Aviation Institute” - *Chapter 3 (co-authored)*
16. *Kryvenko Liudmyla Stanislavivna*, Doctor of Medical Sciences, Professor, Kharkiv National Medical University - *Chapter 3 (co-authored)*
17. *Krylova Olha Volodymyrivna*, Candidate of Medical Sciences, Kharkiv National Medical University - *Chapter 3 (co-authored)*



18. *Korobeinikova T.I.*, Candidate of Technical Sciences, associate professor, National University “Lviv Polytechnic” - *Chapter 4*
19. *Budarin Vitalii*, Candidate of Technical Sciences, associate professor, National University " Odessa Polytechnic" - *Chapter 5*



Inhalt / Content

CHAPTER 1

PRACTICAL APPLICATION OF DISPERSION AND REGRESSION ANALYSIS FOR ASSESSING THE INFLUENCE OF FACTORS ON THE SENSITIVITY OF THE CAPACITIVE HUMIDITY SENSOR

Introduction	7
1.1. Basic aspects of experiment planning in scientific and research practice ...	8
1.2. Peculiarities of processing experimental data using dispersion and regression analyzes of the influence of factors on the model response	15
1.3. Determination of the qualitative and quantitative influence of factors on the sensitivity of the capacitive humidity sensor with the single-layer structure	20
1.4. Determination of the qualitative and quantitative influence of factors on the sensitivity of the capacitive humidity sensor with the two-layer structure	26
1.5. Application of a fractional factorial experiment for quantitative assessment of the influence of factors on the sensitivity of the capacitive humidity sensor with the two-layer structure	34
Conclusions	41

CHAPTER 2

IMPLEMENTATION OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN THE DEVELOPMENT AND MODERNIZATION OF WEBSITES

Introduction	44
2.1. Basic concepts of artificial intelligence	45
2.2. Principles of artificial intelligence integration in web development	53
2.3. Analysis of tools and platforms that use artificial intelligence in web development	61
2.4. Examples of successful projects and case studies.....	66
2.5. Potential benefits and challenges of integrating artificial intelligence into web development	70
Conclusions	74

CHAPTER 3

SOME ASPECTS OF DENTAL IMAGES COMPRESSION WITHOUT VISUALLY PERCEIVED LOSSES

Introduction	76
3.1. The main ideas of our approach	77
3.2. Analysis of the obtained results	78
Conclusions	83



CHAPTER 4

MODERN SOLUTIONS FOR ASSEMBLING AND REASSEMBLING DOCUMENTS IN A SPECIALIZED DOCUMENT MANAGEMENT SYSTEM

Introduction	84
4.1. Analysis of modern document management systems	85
4.1.1. <i>Manual approach to document management systems</i>	85
4.1.2. <i>Overview of modern electronic document management systems</i>	88
4.1.3. <i>Analysis of advantages and disadvantages of modern electronic document management systems</i>	94
4.1.4. <i>Statement of tasks and justification of the choice of technologies</i>	97
4.2. Operation of a specialized automated document management system....	100
4.2.1. <i>Technological chain of a specialized automated document management system</i>	101
4.2.2. <i>Assembly and reassembly processes</i>	105
4.2.3. <i>Compliance of the development with the basic principles of electronic document management systems</i>	108
4.2.4. <i>Analytical description of assembly and reassembly procedures</i>	110
Conclusions	114

CHAPTER 5

EXACT EQUATIONS OF MOTION OF TURBULENT LIQUID FLOW

Introduction	115
5.1. Non-Newtonian fluid.....	116
5.2. Newtonian fluid.....	120
5.3. Stokes liquid.....	130
Conclusions	139

References	142
------------------	-----

**KAPITEL 1 / CHAPTER 1¹****PRACTICAL APPLICATION OF DISPERSION AND REGRESSION ANALYSIS FOR ASSESSING THE INFLUENCE OF FACTORS ON THE SENSITIVITY OF THE CAPACITIVE HUMIDITY SENSOR****DOI: 10.30890/2709-2313.2024-26-00-003****Вступ**

Сучасне виробництво потребує точного та якісного виконання технології виробництва і широкого застосування автоматизації виробничих процесів. Ефективність засобів технічної діагностики, приладів контролю, систем перевірки якості продукції, контролю параметрів довкілля тощо, передусім, залежить від якості первинних перетворювачів, які є основними чутливими органами вимірювальної апаратури. Важливою різновидністю яких є сенсори вологості. Від конструктивного рішення вологочутливих елементів, принципу їх дії та технології виготовлення суттєво залежить технічний рівень сенсорних систем [1–7]. Якість управління яких значно зростає при застосуванні математичної статистики як інструменту дослідницької роботи. Розроблення нових вологочутливих елементів або вдосконалення існуючих потребує проведення великої кількості експериментальних досліджень. При проведенні експерименту одержують безліч даних, які потрібно структурувати та інтерпретувати для використання під час прийняття ефективних рішень стосовно структури та параметрів як вологочутливих елементів, так і вимірювальних систем. Для того, щоб правильно інтерпретувати отримані вихідні дані, потрібно планувати проведення експериментів. В теорії планування експерименту виділяють тактичне та стратегічне планування. Тактичне планування допомагає визначити умови проведення одного експерименту, а стратегічне планування – серії експериментів. Стратегічне планування факторних експериментів передбачає застосування як регресійного аналізу, так і дисперсійного аналізу. Саме проблематика цих питань розглядається в цьому розділі [8–20].

¹*Authors: Krylik Lyudmila Viktorivna*



1.1. Основні аспекти планування експерименту в науковій та дослідній практиці

В наукових дослідженнях вагоме значення належить експерименту, який проводиться або на виробництві, або в лабораторіях, або на дослідних ділянках тощо. Важливим є питання, наскільки ефективно він проводиться.

Для виконання експерименту спочатку потрібно вибрати об'єкт дослідження та визначати програму дій, яку називають плануванням експерименту. Взагалі метою будь-якого експерименту є цілеспрямований вплив на об'єкт дослідження для отримання достовірної інформації. Існують такі різновиди експерименту: фізичний, психологічний та модельний. Натепер з фізичними моделями все більшого поширення отримали абстрактні математичні моделі. Планування експерименту безпосередньо пов'язане з розробкою та дослідженням математичної моделі об'єкта дослідження.

Для формулювання задачі планування експерименту потрібно вибрати тип моделі досліджуваного об'єкту. Нині перевага надається моделі «чорної скриньки», яку доцільно застосувати у випадку складного досліджуваного об'єкту та множині факторів впливу з яких потрібно вибрати значущі фактори впливу на досліджуваний об'єкт.

Схематично модель «чорної скриньки» подана на рисунку 1.

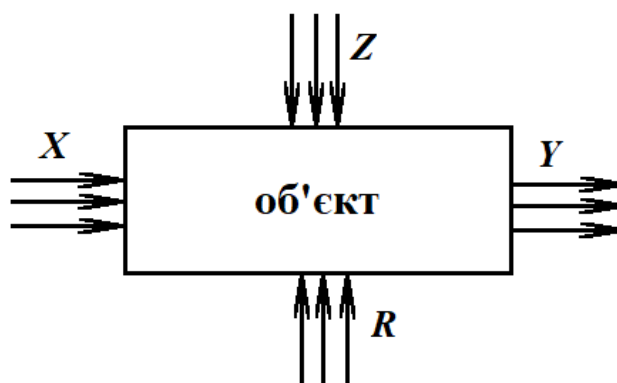


Рисунок 1 – Схема «чорної скриньки»

Входами «чорної скриньки» є вектор незалежних змінних X (фактори впливу), виходами — вектор параметрів Y , що характеризують об'єкт



дослідження (відгук моделі). У технічній літературі зустрічаються інші назви цього параметра, а саме: критерій оптимізації, цільова функція, вихід «чорної скриньки». На об'єкт дослідження також діють некеровані фактори Z , які є незалежними змінними (їх можна тільки виміряти), а також – вектор неконтрольованих факторів R , який впливає на об'єкт дослідження, але не підлягає вимірюванню [20–22].

Зауважимо, модель «чорної скриньки» сприяє побудові математичної моделі досліджуваного об'єкта. Математичною моделлю є рівняння, яке показує зв'язок параметра оптимізації з факторами:

$$y = f(X_1, X_2, \dots, X_n) + \varepsilon,$$

де y – відгук об'єкта дослідження;

X_i – фактори впливу на об'єкт дослідження;

ε – випадкова похибка.

Наступним етапом є вибір *параметрів оптимізації* (критеріїв оптимізації). Вибір параметра оптимізації є одним із головних етапів роботи на стадії попереднього вивчення об'єкта дослідження. Оскільки від коректного вибору параметра оптимізації (функції цілі) залежить коректне формулювання задачі дослідження.

Параметр оптимізації є реакцією (відгуком) впливу факторів, які визначають поведінку об'єкта дослідження і мають кількісне значення.

Зазвичай реальні об'єкти і процеси мають складну природу. Ця обставина вимагає одночасного врахування багатьох параметрів, тобто будь-який об'єкт може характеризуватись або сукупністю параметрів, або підмножиною цієї сукупності, або єдиним параметром оптимізації. В останньому випадку інші характеристики процесу слугують обмеженнями і не мають статусу параметра оптимізації [20–22].

Після того як обрано *об'єкт дослідження* та *критерій оптимізації*, потрібно розглянути всі *фактори впливу* на процес дослідження. Факторами в теорії планування експериментів називають вхідні змінні, вплив яких досліджується на вихідну змінну, тобто на *відгук моделі*.



Фактори впливу мають задовольняти таким вимогам: керованість, тобто обране потрібне значення фактора можна підтримувати постійним протягом експерименту; висока точність вимірювання, яка визначається діапазоном зміни факторів; однозначність; сумісність, тобто всі їхні комбінації здійсненні та безпечні; незалежність, тобто можливість встановлення фактора на будь-якому рівні незалежно від рівнів інших факторів. За своєю природою фактори поділяються на кількісні та якісні. До кількісних відносяться ті фактори, які можна вимірювати, зважувати тощо. Кількісний фактор може неперервно змінюватись в заданому інтервалі. Фактори, які не характеризуються цифровими значеннями називаються *якісними*.

Фактори мають область визначення, яка може бути безперервною або дискретною. Зазвичай значення факторів приймаються дискретними, це пов'язано з рівнями факторів. *Рівнями* називають кількісні або якісні значення фактора, при яких можливе проведення експерименту.

Крім того, фактори мають різні значення за величиною. Потрібно зважити на те, що значення факторів в плануванні експерименту виражають у кодованих величинах. Тому потрібно перейти від натуральних значень вхідних факторів до кодованих (рисунок 2).

При виборі області визначення факторів особливу увагу приділяють вибору нульової точки, тобто нульового (основного) рівня. Вибір нульової точки еквівалентний визначенню вихідного стану об'єкта дослідження. Оптимізація пов'язана з покращенням стану об'єкта порівняно зі станом у нульовій точці. Пошук раціональних рішень прискорюється тоді, коли ця точка знаходиться в області оптимуму або якомога ближче до неї.

Після встановлення нульової точки вибирають інтервали варіювання факторів. Це пов'язано з визначенням таких значень факторів, які в кодованих величинах відповідають $+1$ та -1 . Інтервали варіювання вибирають з урахуванням того, що значення факторів, які відповідають рівням $+1$ і -1 мають суттєво відрізнитись від значення нульового рівня. Тому у всіх випадках величина інтервалу варіювання має бути більше подвоєної квадратичної

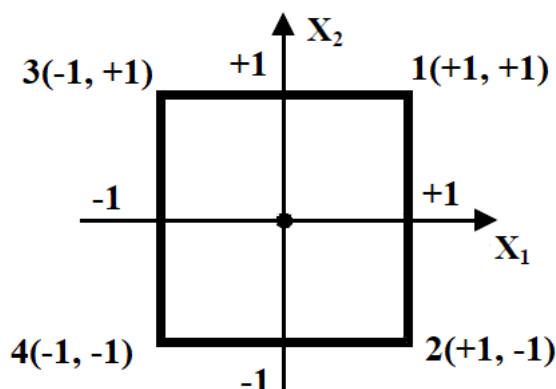


Рисунок 2 – Розташування експериментальних точок у факторному просторі для двох факторів в кодованих величинах

помилки фіксування цього фактора. Крім того, небажано надмірно збільшувати величини інтервалів варіювання, це може призвести до зниження ефективності пошуку оптимуму. Дуже малий інтервал варіювання зменшує область експерименту, це уповільнює пошук оптимуму.

При виборі інтервалу варіювання доцільно враховувати число рівнів варіювання факторів. Потрібно зауважити, що обсяг експерименту та ефективність оптимізації залежать від кількості рівнів факторів, а також від кількості факторів [20–22]:

$$N = q^k,$$

де N – кількість дослідів;

q – кількість рівнів факторів;

k – кількість факторів.

На першому етапі роботи використовують два рівня фактора, тобто верхній та нижній рівні, які в кодованих координатах позначаються як +1 та -1. Це відповідає припущенню про лінійну залежність відгуку моделі від факторів.

Для побудови моделей другого порядку така кількість рівнів недостатня. Збільшення числа рівнів фактора підвищує чутливість експерименту, але одночасно зростає кількість дослідів.



Реальні об'єкти складні за своєю природою. Наприклад, для двох факторів кількість експериментів дорівнює $2^2 = 4$, для трьох факторів кількість експериментів – $2^3 = 8$. Для системи з чотирма факторами на чотирьох рівнях потрібно провести 256 експериментів, а для дев'яти факторів на трьох рівнях – 729 експериментів. Однак неможливо виконати всі експерименти, щоб вирішити поставлену задачу.

В цьому випадку доцільно застосувати планування експерименту. Теорія планування експерименту займається проблемами одержання найбільшої кількості інформації про реальний об'єкт при мінімальних затратах як комп'ютерного часу так і часу дослідника. А спеціальні засоби планування експериментів дозволяють скласти ефективний план проведення експериментів, що забезпечує збір потрібної інформації для отримання обґрунтованих висновків при мінімальних затратах. До найпоширеніших методів планування експерименту відносять повний факторний експеримент (ПФЕ) та дробовий факторний експеримент (ДФЕ) першого порядку [20–23].

Крім того, плани експериментів поділяють на однофакторні та багатофакторні. На відмінну від *однофакторних* планів експериментів, які досліджують тільки вплив одного фактора на відгук моделі, *багатофакторні* плани експериментів будують з урахуванням сумісного впливу факторів на відгук моделі. Такі плани дозволяють досліджувати вплив як кожного фактора, так і вплив взаємодій різних факторів. Тобто, застосування багатофакторних планів сприяє детальному аналізу проведеного експерименту, а саме дає змогу визначити значення використовуваних факторів, а також їх вплив на характеристики та поведінку досліджуваного об'єкта, процесу.

Взагалі план експерименту вказує розташування дослідних точок в n -вимірному просторі незалежних змінних. Найчастіше план експерименту задається в вигляді матриці планування – прямокутної таблиці, кожний рядок якої відповідає умовам певного дослідження, а стовпці – значенням однієї з незалежних змінних в різних дослідженнях.



Розглянемо розроблення плану експерименту якщо є два фактора впливу ($k = 2$) на об'єкт дослідження і кожний фактор має два рівня ($q = 2$). Кількість рядків матриці планування дорівнює кількості стовпців і дорівнює 2^k . Перший стовпець матриці відповідає фіктивній змінній x_0 і всі значення його дорівнюють $+1$. Наступний стовпець відповідає фактору x_1 , його заповнюють з чергуванням значень -1 і $+1$. Наступні за ним стовпці заповнюють, змінюючи кількість змін знаків вдвічі. Після цього заповнюють стовпці, що відповідають взаємодіям факторів, помножуючи стовпці заданих факторів. В n -му стовпці наводяться одержані в досліді значення залежної змінної (таблиця 1). За матрицею планування проводиться серія експериментів. Кожний рядок матриці планування відповідає окремому експерименту, проведеному при відповідних значеннях факторів.

Таблиця 1 – Матриця планування ПФЕ

2^2	x_0	x_1	x_2	x_1x_2	y
1	+	-	-	+	y_0
2	+	+	-	-	y_1
3	+	-	+	-	y_2
4	+	+	+	+	y_3

Кожному стовпцю матриці планування відповідає доданок рівняння регресії, яке побудоване за результатами експериментів. Наприклад, плану факторного експерименту типу 2^2 відповідає рівняння регресії вигляду:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_1x_2,$$

а для плану факторного експерименту типу 2^3 рівняння регресії має такий вигляд:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_1x_2 + b_5x_1x_3 + b_6x_2x_3 + b_7x_1x_2x_3.$$

З наведених прикладів видно, що збільшення кількості факторів сприяє збільшенню розміру матриці планування та обсягу експерименту, а також збільшується кількість доданків в рівнянні регресії, що описують взаємодії факторів. Однак, експериментатора цікавлять тільки доданки, які описують



фактори впливу та ігноруються доданки рівняння регресії, що описують складні взаємодії факторів. За таких умов часто застосовуються *дробові факторні плани*, для яких характерне змішування статистичних оцінок.

Зазвичай експерименти є багатофакторними та сприяють оптимізації якості матеріалів, пошуку оптимальних умов проведення технологічних процесів, розробці найбільш раціональних конструкцій обладнання тощо. Системи, які є об'єктом таких досліджень складні за своєю природою, їх важко теоретично дослідити в прийнятні терміни. Тому, незважаючи на значний обсяг виконаних науково-дослідних робіт, через відсутність реальної можливості досить повно вивчити значну кількість об'єктів дослідження, багато рішень приймаються на підставі інформації, що має випадковий характер і не відповідає оптимальним. Отже, виникає потреба пошуку методів, які дозволять вести дослідницьку роботу прискореними темпами та забезпечують прийняття рішень, близьких до оптимальних. Проблематику цих питань вирішують статистичні методи планування експерименту, запропоновані в двадцятих роках англійським статистиком Рональдом Фішером. Рональд Фішер уперше показав доцільність одночасного варіювання всіма факторами на противагу широко поширеному однофакторному експерименту [20–22].

Застосування методів математичної статистики сприяє систематизації, обробці та аналізу результатів явищ, які спостерігаються. Статистичні моделі широко використовують для діагностики стану об'єктів дослідження, при вивченні причинно-наслідкового механізму та динаміки досліджуваних явищ і процесів, моніторингу кон'юнктури ринку, при прогнозуванні та прийнятті різного кола рішень. До найважливіших розділів математичної статистики відносять: статистичні ряди розподілу, оцінювання параметрів розподілу, закони розподілу вибірових характеристик, дисперсійний, регресійний, кореляційно-регресійний аналіз тощо.

Регресійний аналіз є вагомим інструментом у прийнятті ефективних рішень для вирішення різного кола завдань, а саме, він сприяє кількісному оцінюванню впливу факторів на відгук моделі, тобто забезпечує оптимізацію параметрів



фактора. Дисперсійний аналіз забезпечує якісне оцінювання впливу факторів на відгук моделі, тобто сприяє визначенню значущих факторів моделі. Ефективність яких зростає при застосуванні експериментів за багатфакторними планами. Нині методи математичної статистики широко застосовуються в різних сферах діяльності людини [9–19].

Практичне застосування дисперсійного та регресійного аналізів розглянуто в цьому розділі.

1.2. Особливості обробки експериментальних даних за допомогою дисперсійного та регресійного аналізів впливу факторів на відгук моделі

Регресійний аналіз та дисперсійний аналіз є сукупністю статистичних методів. Нині цей різновид статистичних методів широко застосовується в різноманітних галузях промислової індустрії [8–19]. Регресійний аналіз кількісно здійснює оцінювання впливу фактора на відгук моделі, тобто забезпечує оптимізацію параметрів фактора [9–15, 20]. Дисперсійний аналіз спрямований на визначення якісного впливу фактора на відгук моделі на рівні «впливає» або «не впливає», тобто дисперсійний аналіз сприяє визначенню значущих факторів моделі [11, 16–20]. Крім того, щоб проаналізувати експеримент всебічно і зробити статистично ґрунтовні висновки або знайти оптимальні рішення, доцільно застосовувати експерименти за багатфакторними планами з урахуванням сумісного впливу факторів [9–20].

Розглянемо це детальніше.

Основна ідея *дисперсійного аналізу* полягає в порівнянні факторної дисперсії, яка обумовлена впливом фактора та залишкової дисперсії, що обумовлена впливом випадкових причин. Якщо різниця між цими дисперсіями значна, то фактор здійснює вплив на відгук моделі y .



Для цього розраховують значення факторної дисперсії $S_{\text{факт}}$, залишкової дисперсії $S_{\text{залиш}}$ за такими формулами [20]:

$$S_{\text{факт}} = p \cdot \sum_{j=1}^2 (\bar{y}_j - \bar{y})^2, \quad (1)$$

$$S_{\text{залиш}} = \sum_{i=1}^p (y_{i1} - \bar{y}_1)^2 + \sum_{i=1}^p (y_{i2} - \bar{y}_2)^2 \quad (2)$$

де y_j – спостереження відгуку моделі в j -ому експерименті;

y_{i1}, y_{i2} – i -е спостереження відгуку моделі нижнього та верхнього рівня факторів.

Середні значення спостережень обчислюються за такими формулами [20]:

$$\bar{y}_j = \frac{1}{p} \sum_{i=1}^p y_{ij}, \quad \bar{y} = \sum_{j=1}^2 \bar{y}_j. \quad (3)$$

Факторна $d_{\text{факт}}$ та залишкова дисперсії $d_{\text{залиш}}$ з врахуванням кількості ступенів вільності обчислюються за формулами [20]:

$$d_{\text{факт}} = S_{\text{факт}}, \quad d_{\text{залиш}} = \frac{S_{\text{залиш}}}{2 \cdot (p-1)}. \quad (4)$$

У формулах (4) в знаменнику виразу стоїть кількість ступенів вільності. Порівняння факторної та залишкової дисперсії, які спостерігаються в експерименті проводять за величиною критерію Фішера [20]:

$$F = \frac{d_{\text{факт}}}{d_{\text{залиш}}}. \quad (5)$$

Критичне значення критерію Фішера $F_{\text{кр}}$ знаходять на основі рівня значимості $\alpha = 0,05$, ступенів вільності чисельника $m_1 = N \cdot (p-1)$ та ступенів вільності знаменника $m_2 = p-1$.

Якщо $F > F_{\text{кр}}$, то середні $\bar{y}_1$ та $\bar{y}_2$ розрізняються значимо і вплив фактора є значущим. В протилежному випадку вплив фактора визнається не значущим, а різниця у середніх значеннях пояснюється випадковими причинами. Розрізняють однофакторний та багатофакторний дисперсійний аналіз. Однофакторний дисперсійний аналіз виконується для з'ясування впливу одного



фактора на відгук моделі (результат) у випадках, коли неможливо провести порівняльні спостереження вихідної величини при наявності фактора і без нього (контрольна група) та набрати відповідні статистичні дані. Крім того, на практиці виникає потреба дослідити вплив декількох факторів. Результат можна отримати, дослідивши вплив кожного фактора окремо. Однак кількість експериментів при такому підході швидко зростає зі збільшенням кількості факторів, щоб уникнути цього проводять експерименти за багатофакторними планами з урахуванням сумісного впливу факторів [20]. Такий багатофакторний план у випадку двох факторів має вигляд (таблиця 2):

Таблиця 2 – Багатофакторний план у випадку двох факторів

2^2	A_1	A_2	Дисперсійний аналіз	
			дисперсія	Кількість ступенів вільності
B_1	$y_1(A_1, B_1), \dots, y_4(A_1, B_1)$	$y_1(A_2, B_1), \dots, y_4(A_2, B_1)$	Фактор A	1
B_2	$y_1(A_1, B_2), \dots, y_4(A_1, B_2)$	$y_1(A_2, B_2), \dots, y_4(A_2, B_2)$	Фактор B	1
			Фактор AB	1
			залишкова	$15-3=12$
	$p = 8$	$N_{np} = 16$	загальна	$16-1=15$

де A і B – два фактори, вплив яких на відгук моделі y досліджується,

$y_k(A_i, B_j)$ – результат k -того спостереження на i -тому рівні фактора A та на j -тому рівні фактора B .

Загальне кількість прогонів в цьому плані $N_{np} = p \cdot 2 = 16$, а кількість повторень для кожного рівня $p = 8$.

Крім того, є можливість дослідження впливу взаємодії факторів A і B .

Верхній рівень фактору взаємодії AB визначається експериментами:

$$y_1(A_1, B_1), \dots, y_4(A_1, B_1), y_1(A_2, B_2), \dots, y_4(A_2, B_2).$$

Нижній рівень – експериментами:

$$y_1(A_1, B_2), \dots, y_4(A_1, B_2), y_1(A_2, B_1), \dots, y_4(A_2, B_1).$$



Потрібно зауважити, що дисперсійний аналіз впливу кожного фактора проводиться в такий же спосіб як і для одного фактора, тобто за формулами (1)–(5). Відрізняються тільки кількості ступенів вільності, що використовуються у формулах (4), (5) та при визначенні критерію Фішера. Для того, щоб не виникло помилок значення ступенів вільності подаються в плані.

Статистичну обробку результатів факторного експерименту проводять в декілька етапів. Спочатку виконують оцінку *відтворюваності* експерименту за критерієм Кохрена. Для цього розраховують значення дисперсії у кожному експерименті D_j , сумарне D_Σ та максимальне $D_{\max}$ значення дисперсії за такими формулами [20]:

$$D_j = \frac{\sum_{i=1}^p (y_{ij} - y_j)^2}{p-1}, \quad (6)$$

де y_{ij} – i -е спостереження відгуку моделі в j -ому експерименті;

$$D_\Sigma = \sum_{j=1}^N D_j, \quad (7)$$

$$D_{\max} = \max_j D_j. \quad (8)$$

Потім обчислюють спостережуване значення критерію Кохрена:

$$G = \frac{D_{\max}}{D_\Sigma}. \quad (9)$$

Середні значення відгуку моделі обчислюють за такою формулою:

$$y_j = \frac{1}{p} \sum_{i=1}^p y_{ji}. \quad (10)$$

Спостережуване значення критерію Кохрена порівнюють з його табличним значенням $G_{кр}$, обчисленим при рівні значимості $\alpha = 0,05$, кількості експериментів N і кількості ступенів вільності $m = p - 1$. Якщо $G < G_{кр}$, то експеримент є відтворюваним,

За виразом (11) обчислюють оцінку дисперсії генеральної сукупності:



$$D = \frac{1}{N} \sum_j D_j, \quad (11)$$

Якщо $G > G_{кр}$, потрібно збільшити кількість прогонів або зменшити інтервал варіювання факторів (збільшити точність вимірювань).

Якщо експеримент є відтворюваним переходять до обчислення коефіцієнтів рівняння регресії, використовуючи формули:

$$b_0 = \frac{\sum y_i}{N}, \quad b_k = \frac{\sum y_i x_{ik}}{N}, \quad k = 1, \dots, N-1. \quad (12)$$

І виконують наступний етап статистичної обробки результатів. На цьому етапі оцінюють значущість коефіцієнтів рівняння регресії за критерієм Стюдента. Спостережуване значення критерію Стюдента знаходять за формулою:

$$t_j = |b_j| \sqrt{\frac{N \cdot p}{D}}, \quad (13)$$

Потім t_j порівнюють з табличним значенням $t_{кр}$, визначеним при рівні значимості $\alpha = 0,05$ та кількості ступенів вільності $m = N \cdot (p-1)$. Коефіцієнт b_j вважається значущим, якщо відповідне значення $t_j > t_{кр}$. Інші $N-L$ коефіцієнтів приймаються незначущими і виключаються з рівняння регресії.

Якщо всі коефіцієнти рівняння регресії виявились значущими, то наступний етап статистичної обробки результатів факторного експерименту не виконують. Вважають обробку результатів закінченою і переходять до розкодування рівняння регресії, використовуючи вирази [20]:

$$x_i = \frac{X_i - X_{i0}}{\Delta_i}, \quad (14)$$

$$\text{де } X_{i0} = \frac{X_{i\max} + X_{i\min}}{2}, \quad \Delta_i = \frac{X_{i\max} - X_{i\min}}{2}.$$

Якщо є незначущі коефіцієнти рівняння регресії, переходять до останнього етапу статистичної обробки результатів факторного експерименту. Перевіряють адекватність отриманого рівняння регресії результатам



експерименту за критерієм Фішера. Для цього розраховують дисперсію адекватності за формулою:

$$D_{ad} = \frac{\sum_{i=1}^N (y_i^{exc} - y_i^{pe2})^2}{N - L}, \quad (15)$$

де y_i^{pe2} – обчислене за регресійним рівнянням значення i -ого експерименту,
 L – кількість значущих коефіцієнтів лінійної регресії.

Спостережуване значення критерію Фішера визначають за формулою:

$$F = \frac{D_{ad}}{D}. \quad (16)$$

Якщо $F < F_{кр}$, то модель адекватна і переходять до розкодування рівняння регресії, використовуючи вирази (14).

Якщо $F > F_{кр}$, то модель не адекватна, і потрібно перейти до більш складної моделі (від дробового до повного плану або від лінійного до квадратичного рівняння) або зменшити інтервал варіювання факторів.

1.3. Визначення якісного та кількісного впливу факторів на чутливість ємнісного сенсора вологості одношарової структури

Експериментальними зразками слугували ємнісні сенсори вологості (м. Вінниця, Україна, ВНТУ), виготовлені на ситаловій підкладці розміром $0,7 \times 0,9$ см. На поверхні ситалової підкладки нанесена плівка міді, яка утворює обкладки ємнісних сенсорів вологості у вигляді меандру з відповідною геометрією $7,85 \cdot 10^{-2} \times 150 \cdot 10^{-6} \times 1,2 \cdot 10^{-6}$ м [6]. В такій конструкції вологочутливим шаром є гігроскопічна сіль, яка слугує діелектриком. Для створення вологочутливої плівки використовувались розчини гігроскопічної солі NaCl з концентраціями 0,89 моль/л та 5,33 моль/л, які наносились на поверхню ємнісних сенсорів вологості пульверизатором на відстані $40 \div 50$ см товщинами 5,0 мкм та 10,0 мкм.



Для оцінювання *якісного впливу* на чутливість ємнісного сенсора вологості одношарової структури таких факторів: товщина вологочутливого шару, концентрація розчину солі (гігроскопічна сіль NaCl) та сумісного впливу товщина вологочутливого шару та концентрація розчину солі, застосуємо *багатофакторний дисперсійний аналіз*.

Для розрахунків використано такі позначення: фактор A – товщина вологочутливого шару d , мкм; A_1 – нижній рівень фактора A ; A_2 – верхній рівень фактора A ; фактор B – концентрація розчину солі NaCl, яка виконує функцію адсорбуючого матеріалу C , моль/л; B_1 – нижній рівень фактора B ; B_2 – верхній рівень фактора B ; AB – сумісний вплив фактора A та фактора B ; відгук моделі y – чутливість ємнісного сенсора вологості S_C , пФ/%.

Потрібно провести оцінювання впливу факторів A , B та AB на чутливість ємнісного сенсора вологості одношарової структури за такими даними факторного експерименту (таблиця 3):

Таблиця 3 – Результати факторного експерименту

	$d = 5,0$ мкм	$d = 10,0$ мкм
$C = 0,89$ моль/л	5,2; 4,8; 6,7; 7,8	6,1; 5,0; 7,5; 8,4
$C = 5,33$ моль/л	10,1; 16,2; 25,3; 30,7	32,5; 28,1; 38,5; 49,0

Для кожного фактора маємо два рівня, отже $q = 2$ та вісім прогонів, тобто $p = 8$. Результати експериментів, які подано в таблиці 4 відповідають багатофакторному плану у випадку двох якісних факторів.

Оцінювання впливу факторів A , B та AB за багатофакторним дисперсійним аналізом у випадку двох якісних факторів будемо проводити за виразами (1) – (5). Результати обчислень за формулами (1) – (5) подано в таблиці 5.

Потрібно зауважити, що в знаменнику залишкової дисперсії (4) для багатофакторного плану у випадку двох якісних факторів кількість ступенів вільності дорівнює 12, а не 14, як в однофакторному дисперсійному аналізі.



Таблиця 4 – Результати багатфакторного плану у випадку двох якісних факторів

2^2	A_1	A_2	Дисперсійний аналіз	
			дисперсія	кількість ступенів вільності
B_1	5,2; 4,8; 6,7; 7,8	6,1; 5,0; 7,5; 8,4	фактор A	1
B_2	10,1; 16,2; 25,3; 30,7	32,5; 28,1; 38,5; 49,0	фактор B	1
			фактор AB	1
			залишкова	15-3=12
	$p = 8$	$N_{np} = 16$	загальна	16-1=15

Таблиця 5 – Результати оцінювання впливу факторів за дисперсійним аналізом

A		B		AB	
$\overline{y_{A_1}}$	13,35	$\overline{y_{B_1}}$	6,438	$\overline{y_{AB_1}}$	21,575
$\overline{y_{A_2}}$	21,888	$\overline{y_{B_2}}$	28,8	$\overline{y_{AB_2}}$	13,663
$\overline{y_A}$	17,619	$\overline{y_B}$	17,619	$\overline{y_{AB}}$	17,619
$S_{факт}$	291,58978	$S_{факт}$	2000,23618	$S_{факт}$	250,39898
$S_{залиш}$	2762,68875	$S_{залиш}$	1053,91875	$S_{залиш}$	2803,81375
$d_{факт}$	291,58978	$d_{факт}$	2000,23618	$d_{факт}$	250,39898
$d_{залиш}$	230,22406	$d_{залиш}$	87,82656	$d_{залиш}$	233,65115
F	1,27	F	22,77	F	1,07
$F_{кр}$	4,75	$F_{кр}$	4,75	$F_{кр}$	4,75

Результати досліджень отримано на основі порівняння факторної дисперсії, яка обумовлена впливом фактора та залишкової дисперсії, що обумовлена впливом випадкових причин. Порівняння факторної та залишкової дисперсії проводилось за величиною критерію Фішера. Отже, використовуючи багатфакторний дисперсійний аналіз доведено, що на відгук моделі, а саме на чутливість ємнісного сенсора вологості одношарової структури вагомий вплив має фактор B – концентрація розчину солі NaCl. В цьому випадку значення критерію Фішера, яке спостерігається в експерименті значно перевищує критичне значення критерію Фішера, а саме $22,77 > 4,75$ ($F > F_{кр}$). Вплив



факторів A , AB , а саме товщини вологочутливого шару та сумісного впливу товщини вологочутливого шару + концентрації розчину солі є несуттєвим, тобто різниця в значеннях відгуку моделі пов'язана з випадковим її характером і не пов'язана зі зміною значення фактора ($F < F_{кр}$). Результати оцінювання впливу факторів на чутливість ємнісного сенсора вологості одношарової структури за багатфакторним дисперсійним аналізом подано в таблиці 5.

Тепер застосуємо *регресійний аналіз* для визначення *кількісного впливу* на чутливість ємнісного сенсора вологості одношарової структури таких факторів: товщина вологочутливого шару та концентрація розчину солі.

Для проведення розрахунків приймемо такі позначення: фактор X_1 – товщина вологочутливого шару d , мкм; фактор X_2 – концентрація розчину солі NaCl, яка виконує функцію адсорбуючого матеріалу C , моль/л; відгук моделі y – чутливість ємнісного сенсора вологості S_C , пФ/%.

Тип експерименту – це число, яке дорівнює кількості експериментів в плані. Так, для двох факторів кількість експериментів буде $2^2 = 4$, тобто $N = 4$.

В таблиці 6 подано значення відгуку моделі y_{ij} , які отримані в результаті проведення повного факторного експерименту типу 2^2 при кількості прогонів $p = 3$.

Таблиця 6 – Результати повного факторного експерименту типу 2^2

X_1	X_2	y_{j1}	y_{j2}	y_{j3}
5,0	0,89	5,2	4,8	6,7
10,0	0,89	6,1	5,0	7,5
5,0	5,33	10,1	16,2	25,3
10,0	5,33	32,5	28,1	49,0

Перейдемо до статистичної обробки результатів факторного експерименту. На початку статистичної обробки виконують оцінку *відтворюваності* експерименту за критерієм Кохрена.



Спостережуване значення критерію Кохрена обчислимо за формулами (6)–(10) та отримаємо такі значення: максимальне значення дисперсії – $D_{\max} = 121,4$; сумарне значення дисперсії – $D_{\Sigma} = 182,48$; спостережуване значення критерію Кохрена – $G \approx 0,665$.

Перейдемо до визначення табличного значення критерію Кохрена $G_{кр}$. При рівні значимості $\alpha = 0,05$, кількості ступенів вільності $m = p - 1 = 3 - 1 = 2$, маємо $G_{кр} = 0,768$. Оскільки $0,665 < 0,768$, тобто $G < G_{кр}$, то факторний експеримент є відтворюваним. За виразом (11) визначена оцінка дисперсії генеральної сукупності – $D = 45,62$.

Складемо матрицю планування повнофакторного експерименту (ПФЕ) (таблиця 7) та визначимо коефіцієнти рівняння регресії.

Таблиця 7 – Матриця планування ПФЕ

2^2	x_0	x_1	x_2	x_1x_2	y_j
1	+	-	-	+	5,57
2	+	+	-	-	6,2
3	+	-	+	-	17,2
4	+	+	+	+	36,53

Плануванню факторного експерименту типу 2^2 відповідає рівняння регресії в загальному вигляді:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_1x_2.$$

Використовуючи дані матриці планування ПФЕ (таблиці 7), визначимо коефіцієнти рівняння регресії за формулами (12):

$$b_0 = 16,38; \quad b_1 = 4,99; \quad b_2 = 10,49; \quad b_3 = 4,68.$$

З врахуванням отриманих значень коефіцієнтів, рівняння регресії має вигляд:

$$y = 16,38 + 4,99x_1 + 10,49x_2 + 4,68x_1x_2. \quad (17)$$

Отже, аналізуючи отримане рівняння регресії, можна зробити висновок про те, що фактор x_2 спричиняє на відгук моделі набагато більший вплив,



ніж фактор x_1 або x_1x_2 . Тобто концентрація розчину солі NaCl, яка використовувалась для створення вологочутливого шару суттєво впливає на чутливість ємнісного сенсора вологості одношарової структури. Отримане рівняння регресії можна використовувати для наближених розрахунків відгуку моделі в області проведення експериментів.

Зважаючи на те, що експеримент є відтворюваним перейдемо до наступного етапу статистичної обробки результатів.

На цьому етапі оцінюють значущість коефіцієнтів рівняння регресії за критерієм Стюдента.

При рівні значимості $\alpha = 0,05$, числі ступенів вільності $m = N \cdot (p - 1) = 4 \cdot (3 - 1) = 8$, маємо табличне значення критерію Стюдента $t_{кр} = 2,31$.

Оцінюємо значущість коефіцієнтів b_j за формулою (13):

$$t_0 = 8,4 > t_{кр} = 2,31 \rightarrow b_0 \text{ є значущим}; t_1 = 2,56 > t_{кр} = 2,31 \rightarrow b_1 \text{ є значущим};$$

$$t_2 = 5,38 > t_{кр} = 2,31 \rightarrow b_2 \text{ є значущим}; t_3 = 2,4 > t_{кр} = 2,31 \rightarrow b_3 \text{ є значущим}.$$

Зважаючи на те, що всі коефіцієнти рівняння регресії є значущими, то наступний етап статистичної обробки результатів факторного експерименту не виконують, і вважають обробку результатів закінченою.

Фактори x_1 , x_2 входять до рівняння регресії у кодованому вигляді. Перейдемо до розкодування рівняння регресії, яке отримали в результаті обробки результатів ПФЕ. Для цього перетворимо за формулами (14) початкові змінні в допоміжні та врахуємо область проведення експериментів (таблиця 6) $X_1 \in (5,0; 10,0)$, $X_2 \in (0,89; 5,33)$.

$$x_1 = \frac{X_1 - 7,5}{2,5}, \quad x_2 = \frac{X_2 - 3,11}{2,22}. \quad (18)$$

Врахуємо ці значення в рівнянні (17). У результаті маємо остаточне рівняння регресії в масштабі реальних факторів такого вигляду:

$$y = 6,38 - 0,63X_1 - 1,60X_2 + 0,84X_1X_2. \quad (19)$$



Отримане остаточне рівняння регресії в масштабі реальних факторів (19) дає змогу провести оптимізацію параметрів створення вологочутливого шару ємнісного сенсора вологості одношарової структури з максимальними значеннями функції відгуку – «чутливість». Як критерій оптимізації параметрів створення вологочутливого шару такого ємнісного сенсора вологості обрано чутливість. З експериментів видно, що чутливість ємнісного сенсора вологості одношарової структури залежить від таких факторів як товщина вологочутливого шару та концентрація розчину солі NaCl, яка виконує функцію адсорбуючого матеріалу. Однак, суттєвий вплив на чутливість ємнісного сенсора вологості має концентрація розчину гігроскопічної солі NaCl. Встановлено, що найбільша чутливість 36,32 пФ/% забезпечується при таких оптимальних параметрах процесу створення вологочутливого шару: концентрації адсорбуючого матеріалу – 5,33 моль/л та товщині вологочутливого шару 10,0 мкм.

1.4. Визначення якісного та кількісного впливу факторів на чутливість ємнісного сенсора вологості двошарової структури

При дослідженні ємнісних вологочутливих елементів одношарової структури, розроблених на основі гігроскопічної солі NaCl встановлено, що основним недоліком таких елементів є те, що вони здатні працювати тільки в обмеженому діапазоні відносної вологості нижче точки роси [6]. Для усунення цього недоліку виникла ідея створення захисного полімерного покриття з метою запобігання випадіння точки роси [7].

Основою розробки слугували ємнісні вологочутливі елементи одношарової структури. Вологочутливим шаром в такій конструкції є гігроскопічна сіль NaCl, яка виконує функцію діелектрика (перший шар). З метою створення вологочутливого шару, використовувались розчини гігроскопічної солі NaCl з концентраціями 0,89 моль/л та 5,33 моль/л, які наносились шляхом розпилення



на поверхню ємнісних сенсорів вологості товщинами 5,0 мкм та 10,0 мкм. Захисним шаром (другий шар) слугувала вологопоглинальна плівка поліметилметакрилату товщинами 40 мкм та 80 мкм.

В такий спосіб отримали ємнісні вологочутливі елементи двошарової структури.

Застосуємо *багатофакторний дисперсійний аналіз* для оцінювання *якісного впливу* на чутливість ємнісного сенсора вологості двошарової структури таких факторів: товщина вологочутливого шару; товщина захисного шару; концентрація розчину солі (гігроскопічна сіль NaCl) та сумісного впливу: товщина вологочутливого шару + товщина захисного шару; товщина вологочутливого шару + концентрація розчину солі; товщина захисного шару + концентрація розчину солі; товщина вологочутливого шару + товщина захисного шару + концентрація розчину солі.

Для розрахунків використаємо такі позначення: фактор A – товщина вологочутливого шару $d_{ВШ}$, мкм; A_1 – нижній рівень фактора A ; A_2 – верхній рівень фактора A ; фактор B – товщина захисного шару $d_{ЗШ}$, мкм; B_1 – нижній рівень фактора B ; B_2 – верхній рівень фактора B ; фактор C – концентрація розчину солі NaCl, яка виконує функцію адсорбуючого матеріалу C , моль/л; C_1 – нижній рівень фактора C ; C_2 – верхній рівень фактора C ; AB – сумісний вплив фактора A та фактора B ; AC – сумісний вплив фактора A та фактора C ; BC – сумісний вплив фактора B та фактора C ; ABC – сумісний вплив факторів A , B та C ; відгук моделі y – чутливість ємнісного сенсора вологості двошарової структури S_C , нФ/%.

Проведемо оцінювання впливу факторів A , B , C , AB , AC , BC та ABC на чутливість ємнісного сенсора вологості двошарової структури. В таблиці 8 подано результати факторного експерименту.

Кожний фактор має два рівня, тобто $q = 2$ та дванадцять прогонів, тобто $p = 12$. В таблиці 9 подано результати експериментів, які відповідають багатофакторному плану у випадку трьох якісних факторів.



Таблиця 8 – Результати факторного експерименту

	$d_{BIII} = 5,0$ МКМ	$d_{BIII} = 10,0$ МКМ	$d_{3III} = 40,0$ МКМ	$d_{3III} = 80,0$ МКМ
$C = 0,89$ моль/л	0,38; 0,48; 0,54	0,75; 0,86; 0,91	0,42; 0,53; 0,6	0,83; 0,95; 1,25
$C = 5,33$ моль/л	0,57; 0,62; 0,75	0,97; 1,78; 2,82	0,68; 0,78; 0,82	1,89; 2,95; 3,78

Таблиця 9 – Результати багатфакторного плану у випадку трьох якісних факторів

2^3	A_1		A_2		Дисперсійний аналіз	
	C_1	C_2	C_1	C_2	дисперсія	кількість ступенів вільності
B_1	0,38; 0,48; 0,54	0,75; 0,86; 0,91	0,42; 0,53; 0,6	0,83; 0,95; 1,25	фактор A фактор B фактор C фактор AB	1 1 1 1
B_2	0,57; 0,62; 0,75	0,97; 1,78; 2,82	0,68; 0,78; 0,82	1,89; 2,95; 3,78	фактор AC фактор BC фактор ABC залишкова	1 1 1 23-7=16
	$p = 12$		$N_{np} = 24$		загальна	24-1=23

Проведемо оцінювання впливу факторів A , B , C , AB , AC , BC та ABC за багатфакторним дисперсійним аналізом, використовуючи вирази (1)– (5). В таблиці 10 подано результати обчислень за формулами (1) – (5).

Зауважимо те, що в знаменнику залишкової дисперсії (4) для багатфакторного плану у випадку трьох якісних факторів кількість ступенів вільності дорівнює 16 (для однофакторного дисперсійного аналізу – 22).

Порівняння факторної та залишкової дисперсії проводилось за величиною критерію Фішера. Отже, використовуючи багатфакторний дисперсійний аналіз доведено, що на відгук моделі, тобто на чутливість ємнісного сенсора вологості двошарової структури впливають: фактор B – товщина захисного шару, $F > F_{кр}$ ($4,56 > 4,49$); фактор C – концентрація розчину солі NaCl, $F > F_{кр}$ ($9,08 > 4,49$), а



**Таблиця 10 – Результати оцінювання впливу факторів
за дисперсійним аналізом**

Фактори							
<i>A</i>		<i>B</i>		<i>C</i>		<i>AB</i>	
$\overline{y_{A_1}}$	0,95	$\overline{y_{B_1}}$	0,71	$\overline{y_{C_1}}$	0,6	$\overline{y_{AB_1}}$	1,66
$\overline{y_{A_2}}$	1,29	$\overline{y_{B_2}}$	1,53	$\overline{y_{C_2}}$	1,65	$\overline{y_{AB_2}}$	2,82
$\overline{y_A}$	1,12	$\overline{y_B}$	1,12	$\overline{y_C}$	1,13	$\overline{y_{AB}}$	2,24
$S_{факт}$	0,6936	$S_{факт}$	4,0344	$S_{факт}$	6,6156	$S_{факт}$	8,0736
$S_{залиш}$	17,5513	$S_{залиш}$	14,1429	$S_{залиш}$	11,6515	$S_{залиш}$	31,6942
$d_{факт}$	0,6936	$d_{факт}$	4,0344	$d_{факт}$	6,6156	$d_{факт}$	8,0736
$d_{залиш}$	1,1	$d_{залиш}$	0,8839	$d_{залиш}$	0,7282	$d_{залиш}$	2,0
F	0,63	F	4,56	F	9,08	F	4,04
$F_{кр}$	4,49	$F_{кр}$	4,49	$F_{кр}$	4,49	$F_{кр}$	4,49
Фактори							
<i>AC</i>		<i>BC</i>		<i>ABC</i>			
$\overline{y_{AC_1}}$	1,55	$\overline{y_{BC_1}}$	1,31	$\overline{y_{ABC_1}}$			1,24
$\overline{y_{AC_2}}$	2,94	$\overline{y_{BC_2}}$	3,18	$\overline{y_{ABC_2}}$			1,01
$\overline{y_{AC}}$	2,25	$\overline{y_{BC}}$	2,25	$\overline{y_{ABC}}$			1,13
$S_{факт}$	11,5932	$S_{факт}$	20,982	$S_{факт}$			0,318
$S_{залиш}$	29,2028	$S_{залиш}$	25,7944	$S_{залиш}$			17,9245
$d_{факт}$	11,5932	$d_{факт}$	20,982	$d_{факт}$			0,318
$d_{залиш}$	1,8252	$d_{залиш}$	1,6122	$d_{залиш}$			1,1203
F	6,35	F	13,01	F			0,28
$F_{кр}$	4,49	$F_{кр}$	4,49	$F_{кр}$			4,49

також сумісний вплив факторів *AC* – товщина вологочутливого шару + концентрація розчину солі, $F > F_{кр}$ ($6,35 > 4,49$) та факторів *BC* – товщина захисного шару + концентрація розчину солі, $F > F_{кр}$ ($13,01 > 4,49$), тобто різниця в значеннях відгуку моделі пов'язана зі зміною значення фактора і не може бути спричинена тільки її випадковим характером.

Однак, суттєво впливає на відгук моделі сумісний вплив факторів *BC*, а саме товщина захисного шару + концентрація розчину солі. В цьому випадку значення критерію Фішера, яке спостерігається в експерименті значно



перевищує критичне значення критерію Фішера, в порівнянні з вище наведеними значеннями впливу факторів. Вплив факторів A , AB і ABC , а саме, товщина вологочутливого шару, сумісного впливу: товщина вологочутливого шару + товщина захисного шару; товщина вологочутливого шару + товщина захисного шару + концентрація розчину солі є несуттєвим, тобто різниця в значеннях відгуку моделі пов'язана з випадковим її характером і не пов'язана зі зміною значення фактора ($F < F_{кр}$). Результати оцінювання впливу факторів на чутливість ємнісного сенсора вологості двошарової структури за багатфакторним дисперсійним аналізом подано в таблиці 10.

За допомогою *регресійного аналізу* визначимо *кількісний вплив* на чутливість ємнісного сенсора вологості двошарової структури таких факторів: товщина вологочутливого шару; товщина полімерного покриття, як захисного шару; концентрація розчину солі, як адсорбуючого матеріалу.

Для розрахунків приймемо такі позначення: фактор X_1 – товщина вологочутливого шару d , мкм; фактор X_2 – товщина захисного шару d , мкм; фактор X_3 – концентрація розчину солі NaCl, яка виконує функцію адсорбуючого матеріалу C , моль/л; відгук моделі y – чутливість ємнісного сенсора вологості двошарової структури S_C , нФ/%.

Для трьох факторів кількість експериментів $-2^3 = 8$, тобто $N = 8$.

При проведенні повного факторного експерименту типу 2^3 при кількості прогонів $p = 3$ отримано такі значення відгуку моделі y_{ij} (таблиця 11):

Таблиця 11 – Результати повного факторного експерименту типу 2^3

X_1	X_2	X_3	y_{j1}	y_{j2}	y_{j3}
5,0	40	0,89	0,38	0,48	0,54
10,0	40	0,89	0,42	0,53	0,6
5,0	80	0,89	0,57	0,62	0,75
10,0	80	0,89	0,68	0,78	0,82
5,0	40	5,33	0,75	0,86	0,91
10,0	40	5,33	0,83	0,95	1,25
5,0	80	5,33	0,97	1,78	2,82
10,0	80	5,33	1,89	2,95	3,78



Проведемо статистичну обробку результатів факторного експерименту. Спочатку за формулами (6)–(10) обчислимо спостережуване значення критерію Кохрена: максимальне значення дисперсії – $D_{\max} = 0,9$; сумарне значення дисперсії – $D_{\Sigma} = 1,85$; спостережуване значення критерію Кохрена – $G \approx 0,486$.

Наступним кроком статистичної обробки результатів факторного експерименту є визначення табличного значення критерію Кохрена $G_{кр}$. При рівні значимості $\alpha = 0,05$, кількості ступенів вільності $m = p - 1 = 3 - 1 = 2$, маємо $G_{кр} = 0,516$. Оскільки $0,486 < 0,516$ ($G < G_{кр}$) можна зробити висновок, що факторний експеримент є відтворюваним. За виразом (11) визначена оцінка дисперсії генеральної сукупності, яка набуває значення: $D = 0,23$.

Складемо матрицю планування повнофакторного експерименту (ПФЕ) (таблиця 12) та визначимо коефіцієнти рівняння регресії за формулами (12).

Таблиця 12 – Матриця планування ПФЕ

2^3	x_0	x_1	x_2	x_3	x_1x_2	x_1x_3	x_2x_3	$x_1x_2x_3$	y_j
1	+	-	-	-	+	+	+	-	0,47
2	+	+	-	-	-	-	+	+	0,52
3	+	-	+	-	-	+	-	+	0,65
4	+	+	+	-	+	-	-	-	0,76
5	+	-	-	+	+	-	-	+	0,84
6	+	+	-	+	-	+	-	-	1,01
7	+	-	+	+	-	-	+	-	1,86
8	+	+	+	+	+	+	+	+	2,87

Коефіцієнти рівняння регресії набувають таких значень:

$$b_0 = 1,12; \quad b_1 = 0,17; \quad b_2 = 0,41; \quad b_3 = 0,52; \quad b_4 = 0,11;$$

$$b_5 = 0,13; \quad b_6 = 0,31; \quad b_7 = 0,1.$$

В результаті рівняння регресії має вигляд:

$$y^{pe} = 1,12 + 0,17x_1 + 0,41x_2 + 0,52x_3 + 0,11x_1x_2 + 0,13x_1x_3 + 0,31x_2x_3 + 0,1x_1x_2x_3. \quad (20)$$



З отриманого рівняння регресії (20) видно, що фактор x_3 – концентрація розчину солі NaCl спричиняє на відгук моделі набагато більший вплив ніж фактори: x_1 – товщина вологочутливого шару; x_2 – товщина захисного шару та їх сумісний вплив. Отже, отримане рівняння регресії можна використовувати для наближених розрахунків відгуку моделі в області проведення експериментів.

Оскільки експеримент є відтворюваним, то перейдемо до наступного етапу статистичної обробки результатів. А саме, проведемо оцінювання значущості коефіцієнтів рівняння регресії за критерієм Стюдента.

При рівні значимості $\alpha = 0,05$, числі ступенів вільності $m = N \cdot (p - 1) = 8 \cdot (3 - 1) = 16$, табличне значення критерію Стюдента – $t_{kp} = 2,12$.

За формулою (13) проведемо оцінювання значущості коефіцієнтів b_j :

$t_0 = 11,45 > t_{kp} = 2,12 \rightarrow b_0$ є значущим; $t_1 = 1,74 < t_{kp} = 2,12 \rightarrow b_1$ є незначущим;
 $t_2 = 4,2 > t_{kp} = 2,12 \rightarrow b_2$ є значущим; $t_3 = 5,3 > t_{kp} = 2,12 \rightarrow b_3$ є значущим;
 $t_4 = 1,12 < t_{kp} = 2,12 \rightarrow b_4$ є незначущим; $t_5 = 1,33 < t_{kp} = 2,12 \rightarrow b_5$ є незначущим;
 $t_6 = 3,17 > t_{kp} = 2,12 \rightarrow b_6$ є значущим; $t_7 = 1,02 < t_{kp} = 2,12 \rightarrow b_7$ є незначущим.

Скориговане рівняння регресії за критерієм Стюдента має вигляд:

$$y^{peg} = 1,12 + 0,41x_2 + 0,52x_3 + 0,31x_2x_3. \quad (21)$$

Зважаючи на те, що в рівнянні регресії є незначущі коефіцієнти, перейдемо до наступного етапу статистичної обробки результатів факторного експерименту. Перевіримо адекватність отриманого рівняння регресії результатам експерименту за критерієм Фішера.

Підставимо відповідні значення факторів у рівняння (21) і визначимо значення відгуку моделі в кожному експерименті. Обчислені значення y^{peg} заносимо у таблицю результатів експериментів (таблиця 13):



Таблиця 13 – Значення відгуку моделі в кожному експерименті

2^3	x_2	x_3	y	y^{pez}
1	-	-	0,47	0,5
2	-	-	0,52	0,5
3	+	-	0,65	0,7
4	+	-	0,76	0,7
5	-	+	0,84	0,92
6	-	+	1,01	0,92
7	+	+	1,86	2,36
8	+	+	2,87	2,36

Визначимо значення адекватності дисперсії за формулою (15), враховуючи, що $N = 8$, $L = 4$:

$$D_{ad} = 5 \cdot 10^{-3}.$$

Значення критерію Фішера обчислене за формулою (16) має вигляд:

$$F = 0,02.$$

Критичне значення критерію Фішера при рівні значимості $\alpha = 0,05$ і кількості ступенів вільності $m_1 = N \cdot (p - 1) = 8 \cdot (3 - 1) = 16$ та $m_2 = p - 1 = 3 - 1 = 2$ дорівнює

$$F_{кр} = 19,41.$$

Оскільки $F < F_{кр}$, рівняння регресії (21) визнається адекватним результатам факторного експерименту.

Фактори x_2 та x_3 входять до рівняння регресії (21) у кодованому вигляді. Розкодуємо рівняння регресії (21). За формулами (14) перетворимо початкові змінні в допоміжні та врахуємо область проведення експериментів (таблиця 11) $X_1 \in (5, 0; 10, 0)$, $X_2 \in (40; 80)$, $X_3 \in (0, 89; 5, 33)$:

$$x_1 = \frac{X_1 - 7,5}{2,5}, \quad x_2 = \frac{X_2 - 60}{20}, \quad x_3 = \frac{X_3 - 3,11}{2,22}. \quad (22)$$

Остаточне рівняння регресії в масштабі реальних факторів має такий вигляд:

$$y^{pez} = 0,46 - 0,001X_2 - 0,18X_3 + 0,01X_2X_3. \quad (23)$$



Рівняння регресії в масштабі реальних факторів (23) сприяє оптимізації параметрів виготовлення ємнісного сенсора вологості двошарової структури з максимальним значенням функції відгуку моделі – «чутливість». Критерієм оптимізації параметрів виготовлення вологочутливого та захисного шарів ємнісного сенсора вологості двошарової структури є чутливість. З експериментів видно, що чутливість ємнісного сенсора вологості двошарової структури залежить від таких факторів: товщина захисного шару та концентрація розчину солі NaCl, яка виконує функцію адсорбуючого матеріалу. Однак, суттєво впливає на чутливість ємнісного сенсора вологості двошарової структури концентрація розчину гігроскопічної солі NaCl. Встановлено, що найбільша чутливість 2,36 нФ/% забезпечується за таких оптимальних параметрів процесу виготовлення ємнісного сенсора вологості двошарової структури: концентрація адсорбуючого матеріалу – 5,33 моль/л, товщина захисного шару – 80 мкм. Враховуючи те, що товщина вологочутливого шару не впливає на чутливість ємнісного сенсора вологості, товщину цього шару можна взяти в діапазоні від 5,0 мкм до 10,0 мкм.

1.5. Застосування дробового факторного експерименту для кількісного оцінювання впливу факторів на чутливість ємнісного сенсора вологості двошарової структури

Доведено, що повні факторні плани дають змогу найточніше вивчити механізм впливу факторів на досліджувану систему і сприяють формулюванню найбільш обґрунтованих висновків. Проведення повних факторних експериментів в багатофакторних системах пов'язане із значними труднощами, тобто розмір матриці планування та обсяг експерименту значно зростає зі збільшенням кількості факторів. Водночас в рівнянні регресії суттєво збільшується кількість доданків, які описують взаємодії факторів. Дослідника цікавлять лише доданки, які описують фактори. Тому за великої кількості факторів нехтують деякою частиною рівняння регресії, що описує складні



взаємодії факторів. Для цього будують дробовий план експерименту. Дробовий план факторного експерименту виходить з повного плану прирівнюванням лінійних ефектів до ефектів взаємодії. Кожне введене співвідношення зменшує план вдвічі. Тому, якщо повний план – типу 2^k і введено m співвідношень, то виходить дробовий план типу 2^{k-m} . Для отримання лінійних моделей широко використовуються дробові репліки. Ефективність використання дробових реплік залежить від правильного вибору системи змішування лінійних ефектів з ефектами взаємодії. Зважаючи на те, що в дробових репліках частина взаємодій замінюється новими факторами, обчислені коефіцієнти рівняння регресії будуть сумісними оцінками лінійних ефектів та ефектів взаємодії. Зі збільшенням кількості факторів зростає доцільність їх використання [20–23].

У таблиці 14 продемонстровано як кількість експериментальних досліджень суттєво залежить від значення дробової репліки [23].

Таблиця 14 – Умовні позначення дробових реплік та кількість дослідів

Кількість факторів	Дробова репліка	Умовне позначення	Кількість дослідів	
			для дробової репліки	для ПФЕ
3	1 / 2 репліка від 2^3	2^{3-1}	4	8
4	1 / 2 репліка від 2^4	2^{4-1}	8	16
5	1 / 4 репліка від 2^5	2^{5-2}	8	32
6	1 / 8 репліка від 2^6	2^{6-3}	8	64
7	1 / 16 репліка від 2^7	2^{7-4}	8	128
5	1 / 2 репліка від 2^5	2^{5-1}	16	32
6	1 / 4 репліка від 2^6	2^{6-2}	16	64
7	1 / 8 репліка від 2^7	2^{7-3}	16	128
8	1 / 16 репліка від 2^8	2^{8-4}	16	256
9	1 / 32 репліка від 2^9	2^{9-5}	16	512
10	1 / 64 репліка від 2^{10}	2^{10-6}	16	1024

Скорочення кількості дослідів спричиняє появу кореляції між оцінками коефіцієнтів. Ця обставина не дозволяє окремо оцінювати ефекти факторів і ефекти взаємодії. Утворюються так звані змішані оцінки [20–22].



В роботі [10] для оцінювання впливу факторів на чутливість ємнісного сенсора вологості двошарової структури застосовано повний факторний експеримент типу 2^3 , який передбачав проведення 8 експериментів. Застосуємо дробовий факторний експеримент (ДФЕ) для зменшення кількості експериментів, який є частиною від повного факторного експерименту. Загалом, щоб правильно досліджувати об'єкт за допомогою ДФЕ, потрібно застосувати велику кількість теоретичних відомостей про об'єкт дослідження, щоб визначити, яким впливом взаємодіючих факторів можна знехтувати.

Для дробових реплік застосуємо спеціальні алгебричні співвідношення, які називаються генерувальними співвідношеннями і визначальними контрастами. Такі алгебричні співвідношення сприятимуть виявленню змішаних ефектів [20–23].

Побудуємо план дробового факторного експерименту, тобто замість плану 2^3 використаємо його піврепліку – план 2^{3-1} (таблиця 14). Введемо генерувальне співвідношення

$$x_3 = x_1 x_2. \quad (24)$$

Помножимо праву та ліву частини співвідношення (24) на нововведений фактор x_3 та використаємо умову $x_i^2 = 1$. Отримаємо:

$$x_3 \cdot x_3 = x_1 \cdot x_2 \cdot x_3.$$

Визначальний контраст, який задає елементи першого стовпця матриці планування набуває вигляду:

$$+1 = x_1 \cdot x_2 \cdot x_3. \quad (25)$$

Розв'язувальна здатність цієї піврепліки дорівнює трьом. На основі визначального контрасту (25) одержимо систему змішаних оцінок для цієї дробової репліки в такий спосіб: праву та ліву частини співвідношення (25) помножимо на кожний фактор та взаємодії факторів. Нижче подано співвідношення, якими задаються змішані оцінки коефіцієнтів рівняння регресії:

$$x_1 = x_1^2 x_2 x_3 = x_2 x_3, \quad x_2 = x_1 x_2^2 x_3 = x_1 x_3, \quad x_3 = x_1 x_2 x_3^2 = x_1 x_2. \quad (26)$$



Для плану дробового факторного експерименту типу 2^{3-1} змішування оцінок набуває такого вигляду:

$$b_1 \rightarrow \beta_1 + \beta_{23}, \quad b_2 \rightarrow \beta_2 + \beta_{13}, \quad b_3 \rightarrow \beta_3 + \beta_{12}.$$

Потрібно зазначити, що ДФЕ проводиться в припущенні, що лінійні ефекти є домінуючими і змішування оцінок ефектів не означає невизначеності. Зазвичай явище змішування оцінок прийнято записувати в символічній формі.

Матриця планування плану дробового факторного експерименту типу 2^{3-1} містить стовпці x_0 , x_1 , x_2 та x_3 . Для побудови рівняння регресії достатньо чотирьох дослідів, тобто $N = 4$, кількість прогонів $p = 3$.

В таблиці 15 подано результати дробового факторного експерименту типу 2^{3-1} . Обробка результатів ДФЕ здійснюється в такий самий спосіб, як і для повнофакторного експерименту (ПФЕ).

Таблиця 15 – Результати ДФЕ типу 2^{3-1}

X_1	X_2	X_3	y_{j1}	y_{j2}	y_{j3}
5,0	40	5,33	0,91	1,44	1,81
10,0	40	0,89	0,68	0,79	0,98
5,0	80	0,89	0,76	0,82	1,25
10,0	80	5,33	1,82	2,87	3,61

Експериментальними зразками слугували ємнісні сенсори вологості двошарової структури, виготовлені на ситаловій підкладці. Для створення вологочутливого шару, який виконував би функцію діелектрика застосовано гігроскопічну сіль NaCl. Розчини цієї солі з концентраціями 0,89 моль/л та 5,33 моль/л наносились шляхом розпилення на поверхню ємнісних сенсорів вологості товщинами 5,0 мкм та 10,0 мкм. З метою запобігання випадіння точки роси створено захисний шар – це вологопоглинальна плівка поліметилметакрилату товщинами 40 мкм та 80 мкм.

Для поточних розрахунків використаємо такі позначення: фактор X_1 – товщина вологочутливого шару d , мкм; фактор X_2 – товщина захисного шару d , мкм; фактор X_3 – концентрація розчину солі NaCl, яка виконує функцію



адсорбувального матеріалу C , моль/л; відгук моделі y – чутливість ємнісного сенсора вологості двошарової структури S_C , нФ/%.

Спочатку проведемо статистичну обробку результатів факторного експерименту, яка передбачає розрахунок значень дисперсії у кожному експерименті D_j , сумарне D_Σ та максимальне $D_{\max}$ значення дисперсії. На основі отриманих значень виконаємо оцінювання відтворюваності експерименту за критерієм Кохрена, використовуючи вирази (6) – (10):

На основі виразів (6) – (10) отримано такі значення: максимальне значення дисперсії – $D_{\max} = 0,8091$; сумарне значення дисперсії – $D_\Sigma = 1,1084$; спостережуване значення критерію Кохрена – $G \approx 0,730$.

Перейдемо до визначення табличного значення критерію Кохрена $G_{кр}$. За рівня значимості $\alpha = 0,05$, кількості ступенів вільності $m = p - 1 = 3 - 1 = 2$, отримуємо табличне значення критерію Кохрена – $G_{кр} = 0,768$. Факторний експеримент є відтворюваним, тому що $G < G_{кр}$ ($0,730 < 0,768$). За виразом (11) обчислимо оцінку дисперсії генеральної сукупності, яка набуває значення – $D = 0,2771$.

Розробимо матрицю планування ДФЕ (таблиця 16) та обчислимо коефіцієнти рівняння регресії, використовуючи формули (12):

Таблиця 16 – Матриця планування ДФЕ

2^{3-1}	x_0	x_1	x_2	$x_3 = x_1x_2$	y_j
1	+	-	-	+	1,39
2	+	+	-	-	0,82
3	+	-	+	-	0,94
4	+	+	+	+	2,77

Обчислені коефіцієнти рівняння регресії за формулами (12) мають такі значення:

$$b_0 = 1,48; \quad b_1 = 0,32; \quad b_2 = 0,38; \quad b_3 = 0,6.$$

Рівняння регресії набуває вигляду:



$$y^{pez} = 1,48 + 0,32x_1 + 0,38x_2 + 0,6x_3. \quad (27)$$

На основі отриманого рівняння регресії (27) можна зробити висновок, що на відгук моделі найбільший вплив має фактор x_3 , тобто концентрація розчину солі NaCl, ніж фактори: x_1 – товщина вологочутливого шару та x_2 – товщина захисного шару. В області проведення експериментів отримане рівняння регресії ДФЕ можна використовувати для наближених розрахунків відгуку моделі.

Враховуючи те, що експеримент є відтворюваним, проведемо наступний етап статистичної обробки результатів. Тобто оцінимо значущість коефіцієнтів рівняння регресії за критерієм Стюдента. За формулою (13) обчислимо спостережуване значення критерію Стюдента [20].

За рівня значимості $\alpha = 0,05$, числа ступенів вільності $m = N \cdot (p - 1) = 4 \cdot (3 - 1) = 8$, табличне значення критерію Стюдента набуває значення: $t_{kp} = 2,31$.

Перейдемо до оцінювання значущості коефіцієнтів b_j , які набувають таких значень за формулою (13):

$$t_0 = 9,74 > t_{kp} = 2,31 \rightarrow b_0 \text{ є значущим}; \quad t_1 = 2,11 < t_{kp} = 2,31 \rightarrow b_1 \text{ є незначущим};$$

$$t_2 = 2,5 > t_{kp} = 2,31 \rightarrow b_2 \text{ є значущим}; \quad t_3 = 3,95 > t_{kp} = 2,31 \rightarrow b_3 \text{ є значущим}.$$

Врахуємо цей етап обчислень в рівнянні (27). Рівняння регресії набуває вигляду:

$$y^{pez} = 1,48 + 0,38x_2 + 0,6x_3. \quad (28)$$

Оскільки в рівнянні регресії є незначущі коефіцієнти, проведемо наступний етап статистичної обробки результатів факторного експерименту. Перевіримо за критерієм Фішера адекватність отриманого рівняння регресії результатам ДФЕ.

Врахуємо відповідні значення факторів у рівнянні (28) та обчислимо значення відгуку моделі в кожному експерименті.

В таблиці 17 подано обчислені значення y^{pez} результатів експериментів:



Таблиця 17 – Значення відгуку моделі в кожному експерименті

2^{3-1}	x_2	x_3	y	y^{pez}
1	-	+	1,39	1,7
2	-	-	0,82	0,5
3	+	-	0,94	1,26
4	+	+	2,77	2,46

Визначимо значення адекватності дисперсії за формулою (15), враховуючи, що $N = 4$, $L = 2$:

$$D_{ad} = 0,199.$$

Значення критерію Фішера обчислене за формулою (16) має вигляд:

$$F = 0,72.$$

Критичне значення критерію Фішера за рівня значимості $\alpha = 0,05$ і кількості ступенів вільності $m_1 = N \cdot (p - 1) = 4 \cdot (3 - 1) = 8$ та $m_2 = p - 1 = 3 - 1 = 2$ дорівнює

$$F_{kp} = 19,37.$$

Оскільки $F < F_{kp}$ ($0,72 < 19,37$), рівняння регресії (28) є адекватним результатам факторного експерименту.

В рівнянні регресії (28) фактори x_2 та x_3 в кодованому вигляді. Розкодуємо рівняння регресії (28), для цього за формулами (14) перетворимо початкові змінні в допоміжні та врахуємо область проведення експериментів (таблиця 15) $X_1 \in (5,0; 10,0)$, $X_2 \in (40; 80)$, $X_3 \in (0,89; 5,33)$:

$$x_1 = \frac{X_1 - 7,5}{2,5}, \quad x_2 = \frac{X_2 - 60}{20}, \quad x_3 = \frac{X_3 - 3,11}{2,22}. \quad (29)$$

Рівняння регресії в масштабі реальних факторів має такий вигляд:

$$y^{pez} = -0,501 + 0,019X_2 + 0,27X_3. \quad (30)$$

Розроблено план ДФЕ типу 2^{3-1} з метою зменшення кількості дослідів, на основі якого отримано рівняння регресії в масштабі реальних факторів (30). За критерієм Кохрена доведено, що ДФЕ є відтворюваним. Використовуючи критерій Стюдента визначено значущі коефіцієнти рівняння регресії.



Адекватність результатам факторного експерименту скоригованого рівняння регресії доведена за допомогою критерію Фішера.

За допомогою рівняння регресії в масштабі реальних факторів можна здійснити оптимізацію параметрів виготовлення ємнісного сенсора вологості двошарової структури з максимальним значенням функції відгуку моделі. Критерієм оптимізації параметрів виготовлення вологочутливого та захисного шарів ємнісного сенсора вологості двошарової структури є чутливість. На основі проведеного ДФЕ встановлено, що чутливість ємнісного сенсора вологості двошарової структури залежить від таких факторів, як товщина захисного шару і концентрація розчину солі NaCl. Однак, на чутливість ємнісного сенсора вологості двошарової структури суттєво впливає концентрація розчину гігроскопічної солі NaCl.

Найбільша чутливість 2,46 нФ/% забезпечується за таких оптимальних параметрів процесу виготовлення ємнісного сенсора вологості двошарової структури: концентрація розчину гігроскопічної солі NaCl – 5,33 моль/л, товщина захисного шару – 80 мкм. Враховуючи те, що товщина вологочутливого шару суттєво не впливає на чутливість ємнісного сенсора вологості, товщину цього шару можна взяти в діапазоні від 5,0 мкм до 10,0 мкм.

Висновки

В поданій роботі теоретично доведено, що методи математичної статистики доцільно використовувати для систематизації, оброблення та аналізу експериментальних даних, ефективність та достовірність яких залежить від обраного метода математичної статистики. Крім того, ефективним засобом одержання математичної моделі досліджуваного об'єкта є повний факторний експеримент за кількості факторів більше 3. Зі збільшенням кількості факторів суттєво збільшується як точність моделі, так й кількість експериментів. Збільшення кількості експериментів призводить до великих затрат часу та коштів, тому за таких обставин доцільно застосувати ДФЕ. Однак, для коректного дослідження об'єкта за допомогою ДФЕ потрібно застосувати



широкий спектр теоретичних відомостей про досліджуваний об'єкт для того, щоб визначити взаємодії факторів, впливом яких можна знехтувати. Саме цю інформацію потрібно застосувати для побудови реплік заданої дробовості з метою побудови апроксимувального полінома.

Експериментальними зразками слугували ємнісні сенсори вологості одношарової та двошарової структури (м. Вінниця, Україна, ВНТУ), які виготовлені на ситаловій підкладці розміром $0,7 \times 0,9$ см, на поверхні якої нанесена плівка міді, яка утворює обкладки конденсатора у вигляді меандру з відповідною геометрією $7,85 \cdot 10^{-2} \times 150 \cdot 10^{-6} \times 1,2 \cdot 10^{-6}$ м.

Встановлено, що метрологічні характеристики вологочутливих елементів визначаються насамперед фізико-хімічними та адсорбційними властивостями використаного сорбенту.

Розроблено план ПФЕ та ДФЕ типу 2^{3-1} . На основі яких отримано рівняння регресії в масштабі реальних факторів. За критерієм Кохрена доведено, що ПФЕ та ДФЕ є відтворюваними. За критерієм Стюдента визначено значущі коефіцієнти рівняння регресії. Адекватність результатам ПФЕ та ДФЕ скоригованого рівняння регресії доведена за допомогою критерію Фішера.

Використовуючи багатфакторний дисперсійний аналіз встановлено, що на відгук моделі, а саме на чутливість ємнісного сенсора вологості одношарової структури вагомий вплив має фактор – концентрація розчину солі NaCl. В цьому випадку значення критерію Фішера, яке спостерігається в експерименті значно перевищує критичне значення критерію Фішера, а саме $22,77 > 4,75$ ($F > F_{кр}$). Однак в двошаровій структурі ємнісного сенсора вологості, суттєво впливає на відгук моделі сумісний вплив фактора – товщина захисного шару + концентрація розчину солі. В цьому випадку значення критерію Фішера, яке спостерігається в експерименті значно перевищує критичне значення критерію Фішера $F > F_{кр}$ ($13,01 > 4,49$).

Отримані рівняння регресії в масштабі реальних факторів сприяють оптимізації параметрів виготовлення ємнісних сенсорів вологості одношарової



та двошарової структури з максимальним значенням функції відгуку моделі – «чутливість». Як критерій оптимізації параметрів створення вологочутливого та захисного шарів ємнісних сенсорів вологості одношарової та двошарової структури відповідно, обрано чутливість. Встановлено, що найбільша чутливість 36,32 пФ/% ємнісних сенсорів вологості одношарової структури забезпечується при таких оптимальних параметрах процесу виготовлення вологочутливого шару: концентрації розчину адсорбуючого матеріалу, а саме гігроскопічної солі NaCl – 5,33 моль/л і товщині вологочутливого шару 10,0 мкм.

Стосовно ємнісного сенсора вологості двошарової структури, то при проведенні ПФЕ найбільша чутливість 2,36 нФ/% забезпечується за таких оптимальних параметрів процесу виготовлення: концентрація адсорбуючого матеріалу – 5,33 моль/л, товщина захисного шару – 80 мкм, при проведенні ДФЕ – найбільша чутливість набуває значення 2,46 нФ/% за таких оптимальних параметрів процесу виготовлення ємнісного сенсора вологості двошарової структури: концентрація розчину гігроскопічної солі NaCl – 5,33 моль/л, товщина захисного шару – 80 мкм. Зважаючи на те, що товщина вологочутливого шару не впливає на чутливість ємнісного сенсора вологості двошарової структури, товщину цього шару доцільно взяти в діапазоні від 5,0 мкм до 10,0 мкм. Встановлено, що створення полімерного покриття як захисного шару з метою запобігання випадіння точки роси зменшує чутливість ємнісного сенсора вологості двошарової структури до впливу відносної вологості навколишнього середовища.



KAPITEL 2 / CHAPTER 2 ²

IMPLEMENTATION OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN THE DEVELOPMENT AND MODERNIZATION OF WEBSITES

DOI: 10.30890/2709-2313.2024-26-00-039

Introduction

Artificial intelligence (AI) has not been a part of science fiction for a very long time, it has also become a defective component for the development of modern technologies. The application of artificial intelligence has penetrated into completely different aspects of human life, from medicine to building cars. Also, we couldn't do without web development. Web development in combination with artificial intelligence opens new horizons for the development of the most interactive and effective websites. The main goal of my research is to understand the current possibilities of integrating artificial intelligence into the web development process. This is necessary in order to better understand how artificial intelligence can contribute to the development and modernization of websites. The research is subject not only to the analysis of existing methods and technologies, but also to the development of our own web resource in which we implement these technologies for a clear example of how AI can modernize its work. Special attention was paid to questions, user experience and optimization of processes to relieve the resource administrator.

Theoretical analysis: Study of the theoretical foundations of AI, including its history, development, basic concepts and technologies. This will allow you to understand the fundamental principles of AI and its potential in the context of web development.

Overview of Existing Techniques and Approaches to AI Tools: A survey of existing approaches and tools using AI in web development. This includes the analysis of successful cases that can serve as an example for further application.

Determining the capabilities of this or that tool and the difficulties that may arise

²**Authors:** Antonenko Artem Vasylovych, Buchenko Ihor Anatoliyovych, Korotkov Serhii Stanislavovych, Balvak Andrii Anatoliyovych, Tsyvk Oleksandr Serhiyovych, Korotkov Serhii Stanislavovych, Tverdokhleba Arsenii Oleksandrovich, Korotin Denys Serhiyovych, Ziniar Denys Arkadiiovych, Solobaiev Serhii Gennadiyovych, Yurii Mishkur Valentynovych, Danevych Oleksii Volodymyrovych, Chupakhin Mykyta Sergiyovych



when using it.

Practical implementation. Developing your own project that uses AI to solve some problems in web development. This task will include a detailed description of the project, the process of implementing certain technologies.

The literature review includes the analysis of scientific articles, reports, books and mainly online resources that can provide a better understanding of artificial intelligence technologies. Of course, special attention should be paid to those works that describe the process of implementing the successful introduction of artificial intelligence into the work, regardless of whether it is a website or an application. In order to achieve our goals, we used a combination of several methodologies. The first is a detailed review of available information resources to provide us with a theoretical basis for work. The next step is an analysis of the various available tools and platforms that provide artificial intelligence technologies specifically for web development.

2.1. Basic concepts of artificial intelligence

For a better understanding of what artificial intelligence concepts currently exist, I suggest you consider the table in which they are listed and indicate the sphere of human life in which backgrounds are most often used. The basic concepts of artificial intelligence are fundamental to understanding its potential and applications in various industries, including web development. To better understand the difference between the concepts, let's look at them in more detail.

All these methodologies and concepts are fundamental to understanding what artificial intelligence is and how it is built. For a better understanding of each of these concepts, I propose to consider them separately in detail.

Machine learning (ML) is one of the most significant and rapidly developing branches of artificial intelligence. Its main idea is to teach machines to perform tasks not through direct programming, but through data-driven learning. This allows machines to develop their own "understanding" and perform complex tasks by



analyzing large volumes of data and identifying patterns or trends. Key aspects of machine learning should also be highlighted.

Supervised Learning: This approach is used when we have labeled data (that is, data for which the answers are known). ML models are trained on this data to predict or classify results on new data. For example, in pattern recognition, a system can learn to recognize objects by analyzing thousands of labeled images.

Learning without a teacher (Unsupervised Learning): Here, models work with unlabeled data, that is, without defined answers or labels. The goal is to find structure or patterns in the data. Examples include clustering (grouping similar elements) and dimensionality reduction.

Reinforcement Learning: Models learn through trial and error by interacting with the environment. They get rewards for doing the right thing and learn to optimize their behavior. This approach is often used in the development of game strategies and autonomous robots.

Examples of applying machine learning directly to web development include the following areas:

- **Content Personalization:** ML algorithms can analyze user behavior on sites, tailoring content and recommendations to their preferences.
- **Search engines:** ML is used to improve search algorithms, making them more accurate and efficient in responding to user queries.
- **User Analytics:** Collecting and analyzing data about user behavior helps to understand how people interact with the website, which can be used to improve design and functionality.
- **Automation of web testing:** ML algorithms can automate the process of testing websites, identifying errors and vulnerabilities more efficiently.

Machine learning plays an important role in the development of modern web technologies, offering developers powerful tools to create more intelligent, dynamic and user-oriented websites. The influence of this methodology on web development continues to grow, so it is considered one of the main ones for web developers.

Neural networks are one of the most fundamental and revolutionary concepts in



the field of artificial intelligence. They are inspired by the structure and function of the human brain and are designed to mimic the way the human brain processes information. Neural networks can also be characterized.

Structure: Neural networks consist of nodes called "artificial neurons". Each neuron is connected to others through adjustable "synaptic connections" (weights). A neural network structure typically includes an input layer (which receives the data), one or more hidden layers (where the data is processed), and an output layer (which provides the output).

Learning process: Neural networks "learn" using a process called "backpropagation". During training, the network receives input and produces output. This output is compared to the expected output, and the difference (the error) is used to adjust the synapse weights in the network.

Generalization ability: One of the key advantages of neural networks is their ability to generalize, that is, draw conclusions based on training data and apply that knowledge to new, unknown data. It should be noted the expediency of using neural networks in web development.

Recommender systems: Neural networks are used to analyze user behavior and generate personalized recommendations on websites and online stores.

Image and speech recognition: Neural networks enable the development of interactive web interfaces that can recognize user speech or visual objects.

Website security: Using neural networks to detect and prevent cyber-attacks such as phishing or massive automated requests.

Web Traffic Analytics: Analyzing website traffic using neural networks can help uncover trends, user behavior patterns, and other useful insights.

Neural networks continue to play an important role in the development of artificial intelligence and its application in web development, offering developers powerful tools to create innovative, intuitive and efficient websites.

Deep learning, a subfield of machine learning, uses multilayered neural networks to analyze data, enabling artificial intelligence systems to perform extremely complex tasks. This learning method is based on simulating the workings of the human brain,



allowing machines to learn from large amounts of data and recognize complex patterns.

Multilayer Neural Networks: Deep learning involves the use of neural networks with a large number of hidden layers. These additional layers allow the model to learn more complex and abstract representations of data.

Capability for high level of abstraction: Deep learning efficiently analyzes large volumes of unstructured or complex data, displaying a high level of abstraction that is key to understanding complex patterns and dependencies.

Self-detection of features: Unlike traditional machine learning, where features must be determined manually, deep learning is able to independently detect the necessary features for classification or prediction.

Applications of deep learning in web development:

Image and video recognition: Using deep learning to analyze and interpret images and videos on websites, for example to automatically categorize images or detect visual content.

Natural Language Processing (NLP): Deep learning has greatly improved the effectiveness of NLP, enabling the development of more accurate systems for translation, semantic analysis, and natural language generation that can be used in chatbots and virtual assistants.

Personalized recommendations: Deep learning can analyze large amounts of data about user behavior, providing more accurate and personalized recommendations on websites and online stores.

Web Test Automation: Using deep learning to design intelligent test automation systems that can detect and correct errors more efficiently.

Deep learning continues to expand the horizons of possibilities in the field of artificial intelligence, opening new avenues for innovation and improvement of web technologies. Its ability to analyze complex, unstructured data and discover deep relationships and patterns makes it an indispensable tool in modern web development.

Evolutionary Algorithms (EA) represent a unique approach in the field of artificial intelligence, inspired by the processes of natural selection and genetic evolution. These algorithms are used to solve optimization and search tasks, simulating biological



processes of reproduction, mutation, recombination and selection.

Population approach: EAs work with a population of solutions rather than a single solution. Each element of the population (often called an "individual") represents a potential solution to the problem.

Selection: The selection process determines which individuals will be preserved for further reproduction. Individuals with the best "fitness function" (a measure of the suitability of a solution) are usually selected.

Genetic operators: Include mutation (random changes in individuals) and recombination (combination of elements from two or more parental individuals). These processes provide genetic diversity and new opportunities for finding optimal solutions.

Web design optimization: EAs can be used to automate the design process by finding optimal solutions in terms of element placement, color palette, and other aspects of web design.

Website Testing: EAs can help automate the testing process by finding optimal test scenarios and identifying potential issues on websites.

Web Analytics: Using evolutionary algorithms to analyze large volumes of data to discover useful patterns in user behavior that can be used to improve UX/UI.

Content Optimization: EAs can be used to generate and optimize website content, ensuring more effective use of keywords for SEO and improving content quality.

Evolutionary algorithms offer a flexible and powerful way to solve complex problems, especially when traditional optimization methods are ineffective or unsuitable. They allow web developers to approach problems from a new perspective, using natural selection as a key to innovation and improvement.

Natural language processing (NLP) is an important branch of artificial intelligence that focuses on the interaction between computers and human (natural) language. This field involves the development of algorithms and systems that can understand, interpret, produce and respond to human language in an efficient manner.

The main characteristics of NLP:

Language Understanding: NLP enables machines to recognize, interpret and



respond to human language. This includes voice recognition, understanding semantics and context, and processing different linguistic elements (words, phrases, sentences).

Speech generation: The ability of machines not only to understand, but also to produce speech. This means creating clear and coherent texts, answers or even entire dialogues.

Text Processing: NLP involves analyzing text to identify key information elements, classify text, detect emotions, perform semantic analysis, and more.

Chatbots and virtual assistants: Integrate chatbots into websites to provide automated customer support, make reservations, answer user questions, and more.

User feedback analysis: Automate the process of collecting and analyzing user feedback, allowing you to understand general sentiment, identify problematic issues, and monitor customer satisfaction.

Content Optimization for SEO: Using NLP to analyze keywords, structure content and improve the effectiveness of SEO strategies on websites.

Web Experience Personalization: Analyzing users' language preferences and responses to provide personalized web experiences, including content, product, and service recommendations.

Automatic translation: Using NLP to provide multilingual content on websites, allowing text to be automatically translated for different user groups.

Natural language processing opens up new horizons in the interaction between users and computer systems, especially in web development. It allows you to create more intuitive, efficient and useful web services, increasing the overall satisfaction of users and the efficiency of web resources.

An intelligent agent (sometimes called an intelligent agent) in the field of artificial intelligence is an autonomous entity capable of observing and interacting with its environment to achieve certain goals or objectives. Intelligent agents can be characterized by various indicators and can perform a variety of tasks, from simple to highly complex, using artificial intelligence, machine learning and other technologies.

Autonomy: Intelligent agents are able to perform tasks or make decisions without direct human intervention. They can independently adapt to changes in the



environment.

Environmental Sensing: Agents can perceive their environment through "sensors" (which can be data, web cameras, microphones, etc.) and respond to changes in that environment.

Decision-making process: Intelligent agents analyze information and decide how to act using certain algorithms and decision-making mechanisms.

Performing tasks: Agents can interact with their environment through "actuators" (eg, performing actions on a web page, sending messages, etc.).

Virtual Assistants and Chatbots: Intelligent agents can act as virtual assistants by providing users with information, answers to questions, and tasks.

Personalization of user experience: Agents can analyze user behavior on the site and adapt content, recommendations and interfaces according to their preferences and interests.

Website monitoring and analytics: Intelligent agents can automatically collect and analyze data about user interaction with the site, providing valuable insights for web analytics.

Website test automation: Using agents to automate web application testing, functionality testing, bug and vulnerability detection.

Intelligent agents play an important role in modern web development, providing tools to automate, personalize, and improve the user experience. Their ability to adapt and learn over time makes them indispensable in the dynamic and fast-changing world of web technologies.

Based on the entire review of existing methodologies, we can come to a certain conclusion that at the moment artificial intelligence is becoming one of the most indispensable tools in decision-making processes for a wide variety of fields. Thanks to artificial intelligence, it becomes possible to quickly and efficiently process large amounts of information, find patterns and make predictions based on the analysis of the results obtained, which would be, if not impossible, then definitely difficult for the human brain.

In decision-making processes with the help of artificial intelligence, we can



highlight such aspects as:

- Data processing and analysis: AI can process huge data sets, discovering patterns, trends and correlations that may not be obvious to humans.
- Forecasting and modeling: AI uses machine learning techniques and statistical models to predict future trends, assess risks and determine the possible outcomes of different strategies.
- Optimizing solutions: AI algorithms can be used to find the best possible solutions in complex scenarios where many variables need to be considered.
- Adaptation and learning: AI can adapt to new data and changes in the environment, learn from experience and constantly improve its decisions.

If we turn to real examples of the use of artificial intelligence, we can highlight such areas as:

- Business analytics: AI helps companies analyze market trends, consumer behavior, evaluate the effectiveness of marketing campaigns and optimize supply chains.
- Medical diagnostics: In medicine, AI is used to analyze medical images, detect pathologies, recommend treatment and predict the course of diseases.
- Financial modeling: In the financial sector, AI is used for market analysis, risk management, securities trading and personal financial advice.
- Recommendation systems: Using AI to personalize recommendations in online stores, streaming services and social networks.
- Resource management: AI helps in decision-making about the optimal allocation and use of resources in various fields, from energy production to urban planning.

Artificial intelligence in decision-making allows organizations and individuals to make more informed, accurate and effective decisions, based on the analytics provided by artificial intelligence. Given its ability to adapt and learn, the potential of AI in this area continues to grow and has very strong prospects.



2.2. Principles of artificial intelligence integration in web development

The integration of artificial intelligence in web development involves the use of various AI techniques and methodologies to increase the functionality, efficiency and interactivity of websites. This process covers a wide range of applications, from automating and personalizing web content and improving user interfaces or improving web analytics.

The main principles of implementing artificial intelligence in web development include:

- Automation of Routine Tasks
- Personalization of User Experience
- Interactive User Interfaces
- Improving the Security of Websites
- Search optimization and SEO
- Web Traffic Analytics
- Use of Cloud Technologies

The introduction of artificial intelligence into the web development process opens up completely new horizons for us to create more efficient, intuitive and interactive websites. The use of artificial intelligence technologies allows developers to solve complex tasks, improve the quality of user experience and optimize the operation of websites.

I suggest looking at each of the principles separately, for a better understanding of how each of them is arranged and how it can be useful in one or another situation.

1. Automation of Routine Tasks with the help of artificial intelligence (AI) in web development is a real breakthrough that greatly simplifies the lives of developers and website owners. It's not just about technology, it's about transforming the way we approach web projects. Let's imagine a situation where we no longer need to manually check each link on the site, or check compatibility with different browsers and their versions. Thanks to artificial intelligence, these tasks are performed automatically without the involvement of the developer, which in turn actually helps to optimize the



pipeline of work and the testing of a ready-made web resource. For example, there are tools that can automatically analyze web pages for errors, both spelling and code errors, broken links, or loading speed issues. After that, provide detailed analytics based on the data we checked and even provide reasonable recommendations for improving the resource. And even this is not all that artificial intelligence can do at the moment, it can also help in identifying and solving more complex problems that previously required significant efforts on the part of developers or even analysts. For example, machine learning algorithms can analyze user behavior on a site, identifying patterns that may indicate problems in navigation or UX (User Experience) design. In this way, it is possible to automatically receive recommendations for optimizing the design and structure of the website without calling in professional designers. Such an approach will not only lead to lower costs for the development and optimization of UX design, but may even be more effective than consulting with a designer.

In addition, artificial intelligence also provides much more opportunities in managing the content of a web resource. Artificial intelligence systems can automatically categorize, tag, and even recommend content based on user interests and behavior. This not only improves content efficiency, but also provides a more personalized experience for site visitors.

Applying AI to automate routine tasks in web development is not just the introduction of new technologies, but a strategic step that allows developers and webmasters to focus on more creative and strategic aspects of projects, leaving repetitive and sometimes boring tasks to be bought off by intelligent systems.

2. Personalization of user experience using artificial intelligence (AI) in web development is like the art of creating a unique digital world for each visitor to your site. This is not just a technological trend, but a deep rethinking of how we interact with users in the digital space. Imagine yourself as a chef in a restaurant where every guest has their own unique tastes and preferences. AI in web development works like this: it analyzes the "tastes" of each site visitor to serve exactly the dish (or in our case, content) that he likes the most.

- Analysis of User Data: artificial intelligence collects and analyzes data about



user behavior on the site - what they look at, what they click on, which pages they visit most often.

- Identification of Preferences: Based on this data, the system determines the individual preferences and interests of each visitor. This could be a preference for a certain type of product, article, design, or even specific topics.

- Personalized Content: Using this knowledge, artificial intelligence adapts the content of the site for each user. For example, if someone is interested in travel adventures, the homepage for that person might include travel-related articles or offers.

- Dynamic Adaptation: AI is constantly learning, gathering new information about user behavior, which allows the system to better and better adapt to individual needs.

Personalization of the content component with the help of artificial intelligence is not just a pleasant bonus for the user, this aspect is one of the main factors for attracting and retaining the main mass of the audience. In this way, we create for the user the effect of attention to him as an individual and help with his specific needs, thereby increasing the satisfaction and loyalty of the client to our web resource. Due to the fact that the content is personalized, it increases the chances that he will make a purchase or subscribe to our newsletter, and the probability that he will later return to the site increases significantly.

In our world, where the digital space is sometimes too crowded with information, personalization of content can be the key to stand out from the general mass of competitors, because in fact you provide each user with an individual experience of using your resource.

3. The integration of artificial intelligence (AI) into the creation of interactive user interfaces transforms websites and applications into something much more than just static pages. It's about bringing "mind" and "soul" to the digital experience, making interactions with users more alive, personal and intuitive.

- Chatbots and Virtual Assistants: Today, chatbots can not only answer simple questions, but also understand complex requests, adapt to the context of the conversation, and even detect the emotions of users. They can recommend products, provide personalized information, book appointments and more.



- Voice Interfaces: AI is also used to create voice interfaces that allow users to interact with sites or applications using voice commands. This is especially useful for people with disabilities or in situations where the use of hands is not possible.

- Personalized Recommendations: AI can analyze user browsing history and preferences to create personalized recommendations that are displayed in dynamic interfaces.

- Predicting User Needs: By analyzing user behavior data, AI can predict what a user might need and offer relevant content or services even before they make a request.

- Adaptive Interfaces: AI allows interfaces to adapt to user needs and behavior in real time, changing layout, navigation or even visual style depending on their preferences. With the help of AI, interfaces become not just an "entry point" to the site, but intelligent, responsive entities that can conduct dialogue, learn from their users and even anticipate their needs. This creates a more personal, engaging and satisfying user experience, increasing customer loyalty and satisfaction. In the constant competition for users' attention, this kind of interactivity can be a key factor that differentiates your site or product from others, helping to create a deeper connection with users and providing them with an unforgettable experience.

4. Improving website security with artificial intelligence can be thought of as a tireless, highly intelligent bodyguard, standing guard 24/7 to keep your digital space safe. This "guard" not only detects potential threats, but also learns from each attack attempt, becoming smarter and more effective in protecting web resources.

- Attack Detection and Warning: Artificial intelligence can analyze traffic patterns and user behavior on the site, detecting unusual or suspicious activity. These could be intrusion attempts, phishing, malware distribution, or DDoS attacks.

- Adaptive Protection: Thanks to artificial intelligence, website security systems can adapt and respond to new types of threats. artificial intelligence analyzes new attacks and automatically develops protection methods without waiting for human intervention.

- Increased Efficiency: Instead of checking each case manually, artificial intelligence allows you to automate many aspects of security monitoring, reducing the



risk of human error and ensuring continuous protection.

- Threat Prediction: AI not only responds to known threats, but can also predict potential vulnerabilities by analyzing trends and previous attacks, allowing you to prevent problems before they become serious.

In a world where cyber threats are becoming more sophisticated and diverse, using artificial intelligence to protect websites isn't just an advantage – it's a necessity. Not only does AI provide powerful protection against potential attacks, but it also gives website owners and their users peace of mind knowing that their data is protected with advanced technology. Using artificial intelligence to protect websites is like having a team of highly skilled cyber security professionals who never tire, never sleep, and are constantly learning to provide the best protection in this ever-changing digital world.

5. Search optimization and SEO using artificial intelligence (AI) is turning into real magic in the world of web development. It's not just a set of algorithms or complex technical processes, but rather the art of anticipating and satisfying users' needs before they even realize them. Imagine that your website is a living being that knows how to listen to its visitors, understand their most subtle desires and even predict their next steps. Artificial intelligence plays the role of an intelligent assistant that not only deeply analyzes the language and behavior of users, but also constantly learns from this experience, becoming better every day. Thanks to AI, SEO is no longer just a set of rules and keywords. It turns into a dynamic process, where the content on the site lives a life of its own, adapting to current trends, changes in user behavior and even seasonal fluctuations. This allows not only to attract more visitors, but also to provide them with a much more personal and satisfying web browsing experience.

The use of artificial intelligence for search optimization and SEO also means that your site becomes not just a destination in the vast ocean of the Internet, but a real guide for users, smoothly guiding them through limitless content, presenting exactly what will be most interesting and useful for them . In short, AI expands the horizons of traditional SEO, transforming it into an intelligent, flexible and highly effective tool for ensuring website visibility in today's fast-paced digital world.

6. Web traffic analytics using artificial intelligence turns dry numbers and



statistics into a fascinating story about how people interact with your site. It is as if you are a detective who unravels the mysteries of visitor behavior using not only logic, but also intuition given by AI data.

Advanced User Understanding: AI analyzes how users interact with your site, from where they click to how much time they spend on each page. You don't just get numbers, you get the stories behind those numbers.

Behavior Prediction: By analyzing big data, artificial intelligence can predict how changes to your site will affect visitor behavior. This allows you to optimize the site, making it more attractive and useful for users.

Identification of Trends and Patterns: Artificial intelligence detects patterns and trends in user behavior that may not be obvious at first glance. It could be a certain type of content that gets the most attention, or certain pages that aren't getting the desired engagement.

Optimizing User Experience (UX): Using artificial intelligence to analyze web traffic allows you to improve UX by making changes that make site navigation more intuitive and enjoyable.

In a world where every click and page view counts, AI web traffic analytics is becoming a powerful tool to help you understand not just what's happening on your site, but why it's happening. Thanks to deep data analysis, you can not only react to changes, but also anticipate them, always staying one step ahead of your users' needs. Using AI for web traffic analytics is like a bridge between you and your users, where every step a visitor takes on your site gives you valuable information that helps you create an even more personalized and engaging experience for them.

7. The integration of cloud technologies in web development has opened up new horizons for developers and businesses. Cloud services offer flexibility, scalability and availability of resources that were previously unavailable or too expensive for many companies.

Computing Platforms and Infrastructure as a Service (IaaS):

- **Amazon Web Services (AWS):** One of the most popular platforms that offers a wide range of services, including EC2 (Elastic Compute Cloud) for deploying virtual



servers, S3 for scalable data storage, and RDS for database management.

- Microsoft Azure: A competitor to AWS, Azure provides a similar set of services, with additional integration with other Microsoft products such as Office 365 and Active Directory.

- Google Cloud Platform (GCP): Includes Google Compute Engine, Google Cloud Storage, and Google Kubernetes Engine. GCP is known for its strong support for containers and machine learning.

Platform as a Service (PaaS)

- Heroku: One of the most popular PaaS, specializing in simplifying the deployment and management of web applications. Heroku supports many programming languages, including Ruby, Node.js, Java, and Python.

- Red Hat OpenShift: Another popular PaaS that supports a variety of languages and services, and offers capabilities for containers and automation.

Software as a Service (SaaS) for Web Development

- GitHub and GitLab: These platforms are used for code version control, interoperability and CI/CD (Continuous Integration/Continuous Deployment).

- Shopify and BigCommerce: Examples of e-commerce SaaS that allow you to quickly create and manage online stores.

Website and Application Hosting: Cloud platforms like AWS or Azure allow you to host websites and applications with high availability and flexibility. They help you easily scale resources according to changes in load.

Development and Testing: Cloud services provide developers with the environment and tools for development, testing and deployment without the need to invest in their own IT infrastructure.

Databases and Analytics: Cloud database solutions like Amazon RDS or Google Cloud SQL offer flexibility, scalability and high availability for data management. Cloud platforms also offer big data and analytics tools that can help gather valuable insights from user data.

Cloud technologies are revolutionizing web development, offering flexibility, efficiency and innovative solutions that make the development process more accessible



and efficient. Using cloud services allows developers to focus on creating and optimizing web applications, instead of worrying about infrastructure maintenance.

This chapter covers a wide range of topics that highlight fundamental aspects of artificial intelligence and its applications in web development. From the historical development of AI to modern technologies and methods, in the chapter we have analyzed together how artificial intelligence has transformed the world of digital technologies.

In the first part of the distribution, we considered how AI has evolved from early theoretical concepts to modern complex systems affecting various areas of life. This evolution underscores the importance of AI as a fundamental element in today's technological developments.

Considering machine learning, neural networks, deep learning and other aspects of AI, we see how these technologies play a key role in the development of intelligent systems capable of analyzing data, solving complex tasks and automating processes.

Artificial intelligence has found wide application in the field of web development, from automating routine tasks to personalizing the user experience. Interactive user interfaces, increased website security, search and SEO optimization, and web traffic analytics have all become much more efficient thanks to the introduction of AI. We also realized that the use of cloud technologies that provide flexibility, scalability and efficiency is critical in modern web development. Cloud services such as AWS, Azure, and Google Cloud Platform play a key role in the development and deployment of web applications.

In conclusion, Chapter 1 emphasizes that artificial intelligence is not just a technological curiosity, but a powerful tool capable of radically transforming the field of web development. Artificial intelligence opens up new opportunities for innovation, increased productivity and the creation of more intelligent and effective web solutions.



2.3. Analysis of tools and platforms that use artificial intelligence in web development

Machine learning and artificial intelligence have become the basis of modern technological solutions in web development. The frameworks and libraries used for these purposes provide powerful tools for data analysis, process automation, and the creation of innovative web applications.

Let's consider several examples of such tools.

1. TensorFlow. Developer: Google. Description: TensorFlow is an open framework that allows developers to easily construct and train machine learning models. It is known for its flexibility and a wide range of capabilities, ranging from research in the field of AI to the development of real products. Examples of use: TensorFlow is used in the creation of recommender systems, natural language processing, computer vision, and other areas where machine learning is required.

2. PyTorch. Developer: Facebook. Description: PyTorch is another open source machine learning framework that has become popular due to its intuitive architecture and flexibility. It is suitable for research, prototyping and production. Usage examples: PyTorch is often used in research projects and in the field of deep learning to create complex models that require fast computations.

3. Keras. Developer: François Chollet. Description: Keras is a high-level framework that runs on top of TensorFlow. It is designed for rapid prototyping and machine learning experiments, while providing ease of use and flexibility. Use cases: Keras is ideal for beginners and researchers who want to quickly implement their machine learning ideas.

4. Scikit-learn. Developer: Various authors (Open Source). Description: Scikit-learn is one of the most famous Python libraries for machine learning. It includes a wide range of algorithms for classification, regression, clustering and dimensionality reduction. Usage examples: Often used for data analysis, statistical modeling, and other tasks where standard machine learning algorithms need to be implemented quickly and efficiently.

5. Apache MXNet. Developer: Apache Software Foundation. Description:



MXNet is an efficient and flexible deep learning framework powered by Amazon. It is distinguished by its optimization for parallel data processing and the ability to scale on large computing clusters. Usage examples: MXNet is often used to train large scale neural networks, especially in areas where high computing power is required, such as computer vision and language processing.

6. Microsoft Cognitive Toolkit (CNTK). Developer: Microsoft. Description: CNTK is an open framework from Microsoft that allows you to efficiently design and train deep neural networks. It provides high performance and scalability on different computing platforms. Usage examples: CNTK is particularly effective for tasks that require high computational performance, such as large data sets or complex network architectures.

7. Fast.ai. Developer: Fast.ai. Description: Fast.ai is a library that aims to make deep learning more accessible and easier to use. It provides high-level APIs for convenient work with neural networks, while not losing flexibility and performance. Use cases: Fast.ai is ideal for developers who want to quickly prototype and experiment with deep learning without getting bogged down in the complexity of low-level coding.

Each of these frameworks has its own characteristics and purposes, offering developers a variety of opportunities to realize their ideas in the field of artificial intelligence. The choice of a particular tool often depends on the specific requirements of the project, including requirements for performance, flexibility, and ease of use. Moving on from fundamental machine learning frameworks and libraries that provide powerful capabilities for developing and training AI models, we now turn our attention to cloud-based AI solutions. These cloud platforms open the door to new possibilities by providing scalability, high availability, and integrated services that simplify the implementation and deployment of artificial intelligence in web development. They allow developers to effectively use the power of AI without the need for large infrastructure costs, providing flexibility and speed in the implementation of complex projects.

Cloud-based artificial intelligence (AI) solutions are paving the way for innovation and scale in web development. They provide powerful computing



resources, specialized tools for AI development, and flexibility in use. Such services include:

1. Amazon Web Services (AWS). Features: AWS is one of the leaders in the provision of cloud services, offering a wide range of AI services. AWS SageMaker is a full-featured service that makes it easy to build, train, and deploy machine learning models. Use cases: AWS is used to process big data, generate personalized recommendations, automate web services, and other AI tasks.

2. Microsoft Azure. Features: Azure provides integrated cloud services with a focus on AI and machine learning. Azure Machine Learning Studio is an interactive environment for data visualization and creation of AI models. Examples of use: Azure is used to develop intelligent web applications, data analytics, chatbots and other AI solutions.

3. Google Cloud Platform (GCP). Features: GCP offers a wide range of AI services, including Google Cloud AI and AutoML, which allow you to automate the creation and training of AI models. Use cases: GCP is used to build intelligent applications with machine learning capabilities such as language processing, visual recognition, and predictive analytics.

4. IBM Cloud. Features: IBM Cloud offers a number of AI services under the Watson brand. These services include tools for developing machine learning models, natural language processing and computer vision. Usage examples: IBM Watson is used to build intelligent systems for business intelligence, customer service automation, and other web applications. These cloud-based AI solutions provide web application developers with the tools they need to build advanced intelligent systems, greatly simplifying the development and scaling of projects. They provide the flexibility, scalability, and affordability you need to bring your wildest web development ideas to life.

5. Alibaba Cloud. Features: Alibaba Cloud offers a variety of AI services, including machine learning, data analytics, and computing capabilities. One of the flagship products is PAI, a platform that allows developers to efficiently build AI models. Usage examples: Alibaba Cloud is used to develop e-commerce platforms,



analytical tools, and integrate AI into a variety of business applications.

6. Oracle Cloud. Features: Oracle Cloud includes a wide range of AI services and solutions focused on business analytics, machine learning and process automation. This platform provides powerful tools for data analysis and embedded AI solutions. Examples of use: Oracle Cloud is often used in the corporate sector to create advanced business intelligence systems, automate and optimize business processes.

AI cloud solutions such as AWS, Azure, GCP, IBM Cloud, Alibaba Cloud, and Oracle Cloud are revolutionizing the world of web development by offering a wide range of tools and capabilities for developers. These platforms not only provide access to advanced AI and machine learning technologies, but also provide the necessary infrastructure to effectively implement these technologies into various projects. Using cloud services takes a lot of the burden off developers, allowing them to focus on innovation and value creation instead of worrying about infrastructure support and server maintenance. These platforms provide ample opportunities for scaling, automation, analytics, and development of high-performance AI solutions.

All this makes cloud-based AI solutions indispensable in modern web development, enabling the creation of more intelligent, efficient and adaptive web applications that open new horizons for business and technology development. Moving from cloud-based AI solutions that provide powerful platforms for developing and deploying AI solutions, we now focus on tools for automation and optimization. These tools play a key role in improving the efficiency and productivity of web development by giving developers the means to automate routine tasks, streamline processes, and improve the overall quality of web applications.

Automation and optimization are key aspects of effective web development. Tools focused on these tasks make it much easier for developers, allowing them to focus on the more creative and innovative aspects of their projects.

Automation Testing. Selenium: A web application testing automation tool that allows you to simulate user actions in a web browser. Selenium supports different programming languages and browsers, providing flexibility in the testing process.

Jenkins: This is a continuous integration and continuous deployment (CI/CD) tool



that automates the build and deployment processes of web applications. Jenkins increases development efficiency and guarantees product stability.

Search optimization and SEO. Google Analytics and Google Search Console: Indispensable tools for analyzing web traffic and optimizing sites for search engines. They provide detailed information about user behavior on the site, the keywords they use to find your site, and much more. Moz Pro and SEMrush: These tools provide advanced capabilities for SEO analysis and strategy. They help in the selection of keywords, monitoring the ranking of sites in search engines and identifying potential opportunities for optimization.

Optimizing Productivity. Webpack: A modular packager for JavaScript that optimizes and bundles different resources (JS, CSS, imaging), improving the performance of web applications. Lighthouse by Google: A web page quality analysis tool that evaluates performance, accessibility, mobile-optimization, and more.

These tools are indispensable for modern web development, allowing you to automate key aspects of the development process, optimize websites for search engines, improve their performance and ensure a high quality end product. Using these tools not only helps developers save time, but also provides a better experience for end users.

A detailed review of the key technologies and tools that form the basis of the use of artificial intelligence in modern web development is made. From machine learning and AI frameworks like TensorFlow and PyTorch to cloud solutions from leading tech giants like AWS and Google Cloud Platform, we've looked at how these tools are driving innovation and efficiency in web applications.

These tools play a vital role in the development of web technologies, enabling developers to create more intelligent, interactive and personalized web experiences. They provide opportunities for deep data analysis, automation of routine tasks, search engine optimization and significantly increase the productivity of web development. Therefore, understanding and being able to use these tools is key for any web developer looking to innovate and improve the quality of their web products.



2.4. Examples of successful projects and case studies

After a detailed overview of the tools and platforms behind the implementation of artificial intelligence in web development, we move on to the next important element of our research, which is the analysis of successful examples of the application of artificial intelligence in web development. In this unit, we will look at specific examples and use cases of AI in web development, analyzing real projects and research. This will allow us to better understand how the theoretical foundations and tools of AI are applied in practice, what results they have and their impact on web development. The use of artificial intelligence (AI) in e-commerce has revolutionized the way companies interact with their customers, optimize sales processes and improve user experience. Let's look at some key aspects and examples of the use of AI in e-commerce.

1. Personalized recommendations. Case study: Amazon uses machine learning algorithms to create personalized product recommendations based on users' browsing and purchase history. Result: Increased sales through accurate identification of user interests, leading to improved user experience and loyalty.

2. Chatbots for customer service. Case: eBay uses a chatbot called ShopBot on Facebook Messenger to help users choose products using natural language and query processing. Result: Effective and fast customer service, reducing the burden on support operators, increasing customer satisfaction.

3. Trend forecasting and inventory management. Case: Zara uses AI to analyze fashion trends and consumer demand, allowing the company to effectively manage inventory and plan collections. Result: Optimization of the supply chain, quick response to changes in consumer preferences, reduction of losses from unsold goods.

4. Visual search and image recognition. Case: ASOS, a popular clothing retailer, integrated visual search into its mobile platform, allowing users to search for products using photos instead of text descriptions. The result: Increased user engagement and satisfaction as shoppers can easily find and buy products they've seen online or in real life.



5. Dynamic pricing. Case Study: Airbnb uses machine learning algorithms to recommend optimal pricing to hosts based on factors such as demand, location, seasonality, and more. The result: Increased profits for owners and better resource management for Airbnb, as well as more competitive prices for users.

6. Automated fraud detection. Case study: PayPal uses sophisticated AI algorithms to monitor and detect fraudulent transactions among the millions of transactions carried out every day. Result: A significant reduction in fraud cases, ensuring the security of financial transactions for users and preserving the company's reputation.

These cases show that AI has great potential in the field of e-commerce, offering solutions to improve user experience, optimize business processes and improve security. From shopping personalization to dynamic pricing and anti-fraud, AI is demonstrating its ability to transform key aspects of e-commerce, providing a more efficient and secure environment for both sellers and buyers. The implementation of artificial intelligence (AI) in social networks and content marketing opens up new opportunities for increasing engagement, personalization of content and effectiveness of advertising campaigns. Let's consider several case studies demonstrating the impact of AI on these areas.

1. Targeted targeting in advertising campaigns. Case in point: Google AdWords and Facebook Ads use AI to analyze user interests and behavior, allowing advertisers to create more precisely targeted advertising campaigns. Result: More effective reaching of the target audience, increased conversion and optimization of the advertising budget.

2. Analytics and Trend Forecasting. Case in point: Tools like BuzzSumo use AI to track and analyze social media trends, allowing marketers to adjust their content strategies. Result: Marketers can respond more quickly to changes in the interests of the audience, creating content that resonates with current trends.

3. AI for Improving User Service on Social Platforms. Case study: Twitter uses AI algorithms to detect and respond to user queries that come through their platform. This includes identifying questions, complaints, and providing automated but



personalized responses. Result: Increasing the speed and accuracy of responses to user requests, improving customer satisfaction and optimizing the customer service process.

4. AI for the Analysis of Emotional Context in Social Networks. Case study: IBM Watson is used to analyze the emotional context in social media, helping brands understand the overall mood and emotions around their products or services. The result: Companies can engage more effectively with their audience by responding to their emotions and feelings, and adapt their marketing strategies accordingly.

5. AI in Content Creation. Case: Companies like Articoolo and Wordsmith are using AI to automatically create content that can simulate human writing. This includes creating news articles, reports, analytical reviews and even blogs. Result: A significant reduction in time and costs for content creation, the ability to quickly generate large volumes of text for various needs.

These case studies illustrate how AI can be used for various aspects of content marketing and social media engagement. From automated customer service and sentiment analysis to content creation, AI is opening up new opportunities to improve engagement, personalize experiences and optimize marketing efforts.

The integration of artificial intelligence (AI) into web interfaces opens up new opportunities for interactivity, providing users with a more engaging and personalized experience. Here are some examples that illustrate how AI can transform interactive web interfaces:

1. AI-Powered Chatbots for Websites. Case: Drift and Intercom use AI to create intelligent chatbots that can answer user requests, provide recommendations and help navigate the site. Result: Increased user satisfaction thanks to fast and efficient service, reducing the load on the support service.

2. Personalization of the Web Experience Using AI. Case study: Netflix uses machine learning algorithms to analyze user viewing habits and recommend personalized content. Result: Improved user experience of the platform, increased session duration and satisfaction with using the service.

3. Voice Assistants on Websites. Case: Integrating voice assistants such as Amazon Alexa and Google Assistant into web interfaces so that users can interact with



the site using voice commands. Result: Providing more intuitive and accessible navigation, especially for users with disabilities.

These case studies highlight how innovations in AI can significantly improve the interactivity of web interfaces, making them more user-friendly and engaging. From chatbots that make site navigation and interaction easier, to voice assistants that make websites more accessible, AI is opening new horizons for the development of web design and functionality. To summarize this chapter, we have conducted a comprehensive analysis of real-world case studies that demonstrate the impact of artificial intelligence (AI) in various aspects of web development, including e-commerce, social media, content marketing, and interactive web interfaces. This analysis revealed significant potential for AI to transform the web experience, increase user engagement, and optimize business processes. The use of AI in e-commerce, particularly through personalized recommendations, customer service chatbots and trend forecasting, has revolutionized the way buyers and sellers interact. This not only improved the user experience, but also increased sales and optimized inventory management.

In social media and content marketing, AI has provided tools for deeper analysis of user behavior, personalization of advertising campaigns, and automation of content creation. This has allowed brands to more precisely target their marketing efforts, ensuring high engagement and efficient use of advertising budgets. Innovations in interactive web interfaces, such as the integration of chatbots and voice assistants, have opened up new horizons for creating more dynamic and engaging web experiences. They have not only increased the accessibility and usability of websites, but also greatly improved the quality of interaction with users. Overall, the case study analysis in this chapter demonstrates that AI is becoming an increasingly important tool in web development, opening up endless possibilities for innovation, increased efficiency, and the creation of more personalized and interactive web experiences. The use of AI allows companies to become more competitive by responding to changes in user behavior and needs.



2.5. Potential benefits and challenges of integrating artificial intelligence into web development

The integration of artificial intelligence (AI) into web development opens up significant opportunities for improving the efficiency and productivity of processes. This becomes possible thanks to automation, improvement of decision-making processes and optimization of work procedures.

1. Automation of routine tasks. AI can automate routine and repetitive tasks often found in web development, such as testing, website monitoring, and content management. Using AI for automation allows developers to focus on more complex and creative aspects of projects, increasing overall productivity.

2. Optimization of work processes. AI can analyze large volumes of data to identify trends, patterns and anomalies, helping to improve workflows. Applying the analytical capabilities of AI can improve development strategies, project planning, and resource management.

3. Improvement of decision-making. AI can provide recommendations and insights based on data processing, which improves decision-making in web development projects. Intelligent systems can help in choosing the most effective technical solutions, assessing risks and predicting potential problems.

Integrating AI into web development not only helps streamline and streamline workflows, but also paves the way for a more innovative and creative approach to development. Using AI to automate routine tasks and data analytics allows teams to use their time and resources more efficiently, focusing on key project elements and innovative solutions.

The integration of artificial intelligence (AI) into web development opens up new opportunities to significantly improve the user experience. AI can be used to create more intuitive, relevant and personalized web interfaces that meet the unique needs and preferences of users.

1. Personalization of Websites. AI enables website content to be tailored to the individual interests and behavior of users. This can include personalized product



recommendations, customizing content or even adapting the interface according to user habits.

2. Improving navigation and accessibility. intelligent algorithms can optimize site navigation, making it more intuitive and accessible to all users, including people with disabilities. This can include voice control, responsive layouts, or automated navigation tips.

3. Interactivity and involvement. AI can be used to create more interactive elements on websites, such as chatbots, interactive dashboards or personalized videos. This increases user engagement and creates a more dynamic interaction experience.

4. Collection and analysis of feedback. Using AI to analyze user feedback can help identify strengths and weaknesses in web design and functionality. This allows teams to quickly make adjustments and improvements based on user needs.

Improving user experience with AI not only increases user satisfaction, but can also lead to increased conversions, engagement and loyalty. Intelligent algorithms allow you to create more personal and relevant web experiences, adapted to the needs and desires of each user.

Integrating artificial intelligence (AI) into web development brings with it not only advantages, but also certain challenges, especially in the area of security. These challenges require careful consideration and a responsible approach when implementing AI technologies.

1. Data protection and privacy. As the amount of data processed by AI grows, the issues of data protection and privacy are becoming more and more relevant. The challenge is to ensure safe storage and processing of users' personal data, in compliance with regulatory requirements.

2. Protection against AI-enhanced fraud. Just as AI can be used to improve security, it can also be misused by criminals to develop more sophisticated fraud schemes. Web developers face the challenge of building systems that can detect and counter such threats.

3. Identity and access management. Ensuring secure and effective identity and access management in an AI environment is essential. This includes developing robust



authentication and access control systems that can adapt to evolving security requirements.

4. Ethical and legal challenges. The use of AI also raises ethical questions, especially in the context of automated decision-making. Web developers must consider the possible impact of their systems on individual rights and freedoms and adhere to legal frameworks.

Integrating artificial intelligence (AI) into web development brings unique challenges, especially in the area of security. These challenges cover a wide range of aspects, from data protection and privacy to risk management and ethical compliance. On the one hand, there is a need to protect the huge amounts of data that are analyzed and processed by AI. This requires careful consideration of privacy issues, protection of personal data and compliance with regulatory standards. At the same time, the risk of fraud and other types of cyberattacks increases, as attackers can also use AI to develop more sophisticated schemes. In addition to the technical aspects, there are also ethical considerations. Integrating AI requires developers to be aware of the potential impact of their decisions on users, including issues of transparency, fairness, and algorithmic bias. It is also important to ensure that systems using AI are understandable and human-controlled, while maintaining the necessary level of security.

Given these challenges, web developers must actively work to develop safe, ethical, and responsible AI systems. This includes the use of advanced encryption methods, regular security audits, development of risk management strategies and constant updating of knowledge about regulatory requirements. Thus, security becomes not just a technical aspect, but a fundamental part of the web development process in the age of artificial intelligence. Given these challenges, security is becoming a key part of the development process for web applications using AI. This requires a deep understanding of the potential risks, as well as the development of strategies and solutions that ensure the protection of data and privacy, as well as the ethical and responsible use of AI.

Integrating artificial intelligence (AI) into web development requires not only technical changes in projects, but also adaptation at the level of teams and



organizations. This process includes education and training, as well as cultural changes in the perception and use of AI.

1. Education and professional development. Given the rapid development of AI technologies, developers and project teams need to constantly learn and upgrade their skills. This includes knowledge of the latest algorithms, tools, best practices and industry standards. Training programs, workshops and conferences can help developers stay at the forefront of innovation and implement effective AI solutions in their projects.

2. Adaptation of work processes. Integrating AI may require revisions and adaptations of existing work processes. This includes integrating new tools and methodologies into daily work. Teams may need to learn how to work with AI tools, interpret their results, and make appropriate changes to their strategies and approaches.

3. Cultural adaptation. The implementation of AI also requires a change in corporate culture and attitude to innovation. Organizations must create an environment that promotes experimentation, innovation and openness to new technologies. It is necessary to promote the development of a "learning culture", where constant updating of knowledge and skills is considered an important part of professional growth.

In the context of integrating artificial intelligence (AI) into web development, adaptation and training are key elements to ensure effective implementation and use of these technologies. This process covers not only technical aspects, but also changes in corporate culture and approaches to work. First, there is a need for constant updating of knowledge and skills of developers. The rapid development of AI technologies requires web development professionals to stay one step ahead by understanding new trends, tools and methodologies. This includes not only independent study, but also participation in specialized courses and trainings. Second, adaptation of work processes and work methods is critically important. Introducing AI into work processes may require rethinking approaches to product design, development, and production. This means adapting existing work procedures and implementing new practices that optimize the use of AI. Finally, cultural adaptation is an important aspect. It's about creating an environment that fosters innovation, openness to new ideas, and willingness



to experiment. Companies should foster a culture of continuous learning and development that allows teams to quickly adapt to new technologies and use them to their maximum advantage.

Overall, adaptation and learning in the context of implementing AI in web development requires a comprehensive approach that includes technical skills upgrading, workflow reorganization, and building a culture focused on innovation and adaptability. Adapting and learning in the context of AI in web development is not just a set of technical skills, but also an evolution of the way of thinking and working. This requires developers to be flexible, willing to learn and adapt, and organizations to support such a culture of learning and innovation. Taking these aspects into account is key to successfully integrating AI into web development.

Integrating AI into web development also requires organizations to strengthen their approaches to staff training and development. As technology evolves rapidly, learning and professional development become a continuous process. This applies not only to developers, but also to project managers, designers and other team members who need to understand the capabilities and limitations of AI.

In summary, implementing AI in web development offers the promise of significant benefits, including streamlining processes, improving productivity, improving user experience, and even opening up new opportunities for innovation. However, these benefits come with responsibilities and challenges. They require developers to be aware of ethical, legal, and security issues, and to be willing to constantly learn and adapt. Ultimately, success in using AI in web development depends not only on technological knowledge, but also on the ability to take a holistic approach to innovation, security and ethical responsibility.

Conclusions

Thanks to the analysis of existing artificial intelligence technologies, it is possible to select services that can help me in my work and everyday life. Looking at our project, it is clear to everyone that it is not complete in terms of design and content, this is one



of the most important factors that affects the audience. People will not consider the author of the articles to be intelligent enough if the articles are on an outdated site. Therefore, the content and design of the pages should be one of the first stages of how to further develop our project outside of the thesis. Also, we used only a few possibilities of artificial intelligence in web development, in fact, such services and technologies are becoming more and more every day and it is even difficult to follow their development. If we consider the question of what other artificial intelligence technologies can be added to the current project, then these would be:

1. Advanced analysis of user data to use machine learning to analyze user behavior on the site to improve UX and personalize content. After that, it is possible to develop a system of recommendations for better personalization of the content of individual users based on the results of the analysis by artificial intelligence.

2. Automation of SEO components so that AI is responsible for the process of optimizing keywords, meta tags and content structure to improve SEO. After that, it would be possible to implement AI that would automatically put metatags on images and the like.

Although our work does not have a significant impact on the web development industry as such, such a demonstration of the capabilities of artificial intelligence opens up new perspectives for the use of artificial intelligence technologies. The conclusions and possible methods presented in the work can serve as a reference point for other developers and companies seeking to integrate AI into their web projects.



KAPITEL 3 / CHAPTER 3³

SOME ASPECTS OF DENTAL IMAGES COMPRESSION WITHOUT VISUALLY PERCEIVED LOSSES

DOI: 10.30890/2709-2313.2024-26-00-010

Вступ

В сучасній стоматології широко використовуються цифрові зображення, що сформовані сучасними системами [1]. Це дозволяє використовувати цифрові алгоритми обробки таких даних, зберігати їх на сучасних носіях, передавати по лініях зв'язку, формувати бази для виявлення діагностичних ознак і навчання нейромереж, а також для навчання студентів [2]. Внаслідок покращення розрізняювальної здатності систем формування радіологічних зображень та застосуванню нових режимів їх роботи (наприклад панорамного) спостерігається тенденція до зростання середнього розміру зображень – типовими стають розміри в одиниці та десятки Мегабайт. Це призводить до проблем збереження таких даних і, особливо, їх термінового пересилання (обміну) в ситуаціях, коли потрібно точно встановити діагноз спеціалістами.

Існують методи стиснення медичних зображень [3], але не всі вони здатні задовольнити спеціалістів та користувачів. По-перше, методи стиснення без втрат, як правило, не вирішують проблему. По-друге, для медичних зображень характерною вимогою є стиснення без візуально помітних втрат (без втрат діагностично важливої інформації), що не дозволяє використовувати будь-які значення параметру, що керує стисненням (ПКС). По-третє, не завжди доцільно використовувати відомі стандарти, як-то JPEG, а більш розумно для збереження даних обстеження пацієнтів застосовувати менш відомі кодери. Тож у цьому розділі нами розглянуто одну з можливостей забезпечити візуальну непомітність внесених спотворень та проведено первинний порівняльний аналіз основних характеристик декількох кодерів.

³*Authors: Lukin Volodymyr Vasilyovych, Kryvenko Sergii Stanislavovych, Kryvenko Liudmyla Stanislavivna, Krylova Olha Volodymyrivna*



3.1. Основні ідеї нашого підходу

За останні 20 років запропоновано багато метрик візуальної якості (МВЯ) для зображень в градаціях сірого для різних типів спотворень, які можуть мати місце в практиці обробки зображень. Для спотворень, що мають місце в практиці стиснення зображень з втратами, існує досить багато МВЯ, які є суттєво більш адекватними, ніж звичайне пікове відношення сигнал-шум (ПВСШ) [4], і які маєть рангову кореляцію Спірмена з осередненою думкою людей (mean opinion score – MOS) на рівні 0,96-0,97, тобто здатні дуже добре характеризувати якість стиснених зображень. Крім того, для кількох з таких метрик оцінено поріг Т, для якого спотворення або візуально непомітні, або є дуже несуттєвими (такими, що не впливають на діагностичну цінність даних) [5].

Однією з таких метрик є PSNR-HVS-M, яка враховує дві важливі особливості зору людей (<https://ponomarenko.info/psnrhvs.htm>). Ця метрика виражається в дБ і поріг Т для неї приблизно дорівнює 40 дБ. Тоді під час стиснення необхідно забезпечити значення PSNR-HVS-M не гірше (не менше), ніж 40 дБ і це може бути певною запорукою, що внесені спотворення є невидимими. Але при цьому треба врахувати, це спеціалісти (дантисти) зазвичай розглядають не все велике зображення в цілому, а приділяють особливу увагу певним фрагментам розміром сотні на сотні пікселів, які вони роздивляються в режимі скролінгу в натуральному масштабі. Тож бажано забезпечити значення PSNR-HVS-M не гірше порогу не тільки для всього зображення, але й для його фрагментів, які можуть мати різну складність і характеризуватись різним рівнем внесених спотворень [6].

Тут необхідно зазначити, що кожен метод стиснення має свій ПКС. Наприклад, для JPEG характеристики стиснення визначаються фактором якості (quality factor – QF), що мають значення від 1 до 100, де 100 відповідає практично ідеальній якості і мінімальному значенню коефіцієнта стиснення (КС). Для інших методів стиснення використовуються інші ПКС, які так чи інакше пов'язані з кроками квантування коефіцієнтів ортогональних перетворень, що



лежать в основі більшості сучасних кодерів. Зокрема, для кодеру AGU-M [7] на основі дискретного косинусного перетворення (ДКП) в якості ПКС використовується коефіцієнт масштабування (scaling factor – SF), який загалом може бути будь-яким ненегативним числом, але на практиці його значення лежать в межах від одиниць до кількох десятків.

Тож в нас є сподівання, що завдяки використанню фіксованих значень ПКС вдасться забезпечити PSNR-HVS-M не гірше за поріг помітності спотворень для всіх (більшості) фрагментів типових стоматологічних зображень, при цьому будуть досягнуті дості високі значення КС. Тож завдання полягає у тому, щоб знайти такі значення ПКС та проаналізувати межі варіації значень PSNR-HVS-M та КС.

3.2. Аналіз отриманих результатів

JPEG є методом стиснення, який, мабуть, є найбільш вивченим з різних точок зору. Для нього існують певні рекомендації щодо встановлення QF для різних режимів в цифрових камерах та інших засобах. Зокрема, щоб гарантувати непомітність спотворень рекомендується встановлювати QS=75. Нами була перевірена ця рекомендація для 20 фрагментів стоматологічних зображень розміром 512×512 пікселів, що вирізані з панорамного зображення розміром 2761×1504 пікселів, що отримано сучасною системою Morita (Morita, дивись <https://www.jmoritaeurope.de/en/products/diagnostic-and-imaging-equipment-overview/>) та 14 фрагментів такого ж розміру, що отримані системою Dentsply Sirona (Orthophos S). Деякі з отриманих результатів показані на рис. 1. Як бачимо, в обох випадках значення PSNR-HVS-M в середньому дорівнюють 48 дБ, але змінюються в межах від 45,5 до 50,5 дБ для випадку на рис. 1,а і від 47,7 до 48,8 дБ на рис. 1,в. При цьому значення КС лежать у межах від 5 до 13 на рис. 1,б і від 9,8 до 16,3 на рис. 1,г. На наш погляд, одна з причин більших значень КС для фрагментів зображень, що зформовані системою Dentsply Sirona, полягає в тому, що для них спостерігається помітно менший рівень завад.

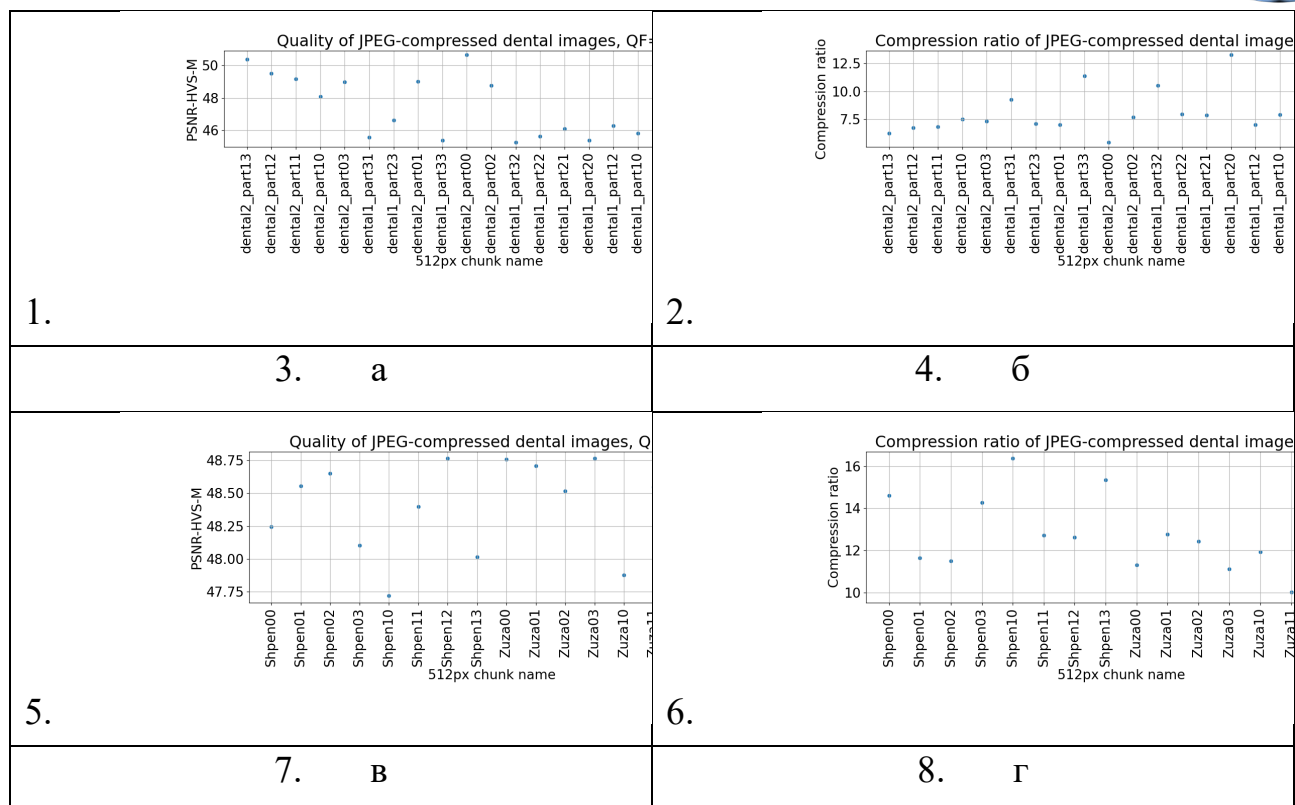
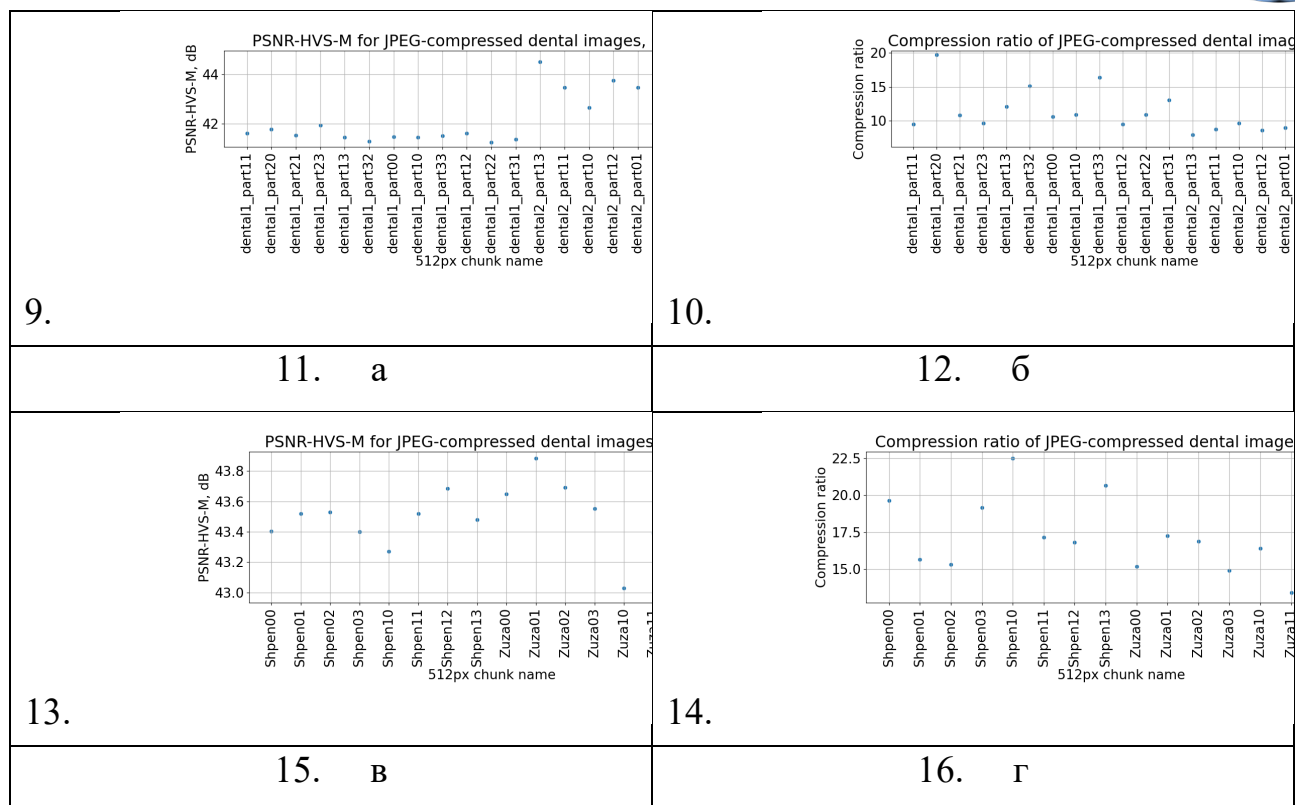


Рисунок 1 – Дані для стиснення фрагментів стоматологічних зображень для двох сучасних систем, JPEG, QF=75

Втім, як можна побачити, навіть найменші значення PSNR-HVS-M є досить далекими від $T=40$ дБ. Це означає, що можна суттєво зменшити QF, забезпечивши середні значення PSNR-HVS-M для фрагментів на рівні 42,5 дБ. Аналіз залежностей PSNR-HVS-M від QF довів, що це спостерігається за умови, що $QF \approx 60$. Відповідні дані для тих же фрагментів великого розміру, що отримані досліджуваними системами, наведені на рис. 2.

Як можна побачити, всі значення PSNR-HVS-M, як і раніше, перевищують поріг T ; в першому випадку (рис. 2,а) вони лежать в межах від 41 до 45 дБ, а в другому випадку (рис. 2,в) вони є навіть більш компактними – від приблизно 43 до 44 дБ. При цьому зменшення QF дало позитивний ефект у сенсі збільшення мінімального і максимального (а також середнього) значень КС. Значення цього параметру тепер лежать в межах від 7 до 20 для фрагментів зображення системи Morita (рис. 2,б) та від 13 до 23 для фрагментів зображення системи Dentsply Sirona.



**Рисунок 2 – Дані для стиснення фрагментів стоматологічних зображень
для двох сучасних систем, JPEG, QF=60**

Загалом, можна ще трохи збільшити КС за рахунок використання QF=59, але в такому випадку збільшується ризик, що PSNR-HVS-M для деяких фрагментів виявиться меншим за поріг і, відповідно, внесені стисненням спотворення стануть помітними.

Втім, існують інші можливості покращити ефективність стиснення, адже JPEG є «старим» методом стиснення і за останні роки було запропоновано багато кращих за нього в тому чи іншому сенсі, хоча жоден не набув такого практичного поширення (причини цього розглядати не будемо). Більшість з розроблених в останні роки методів стиснення з втратами базується або за ДКП, або на дискретних малохвильових перетвореннях. Для кодерів на основі малохвильових перетворень проблемою є забезпечення із задовільною точністю бажаної якості стиснених зображень (наприклад, бажаних значень PSNR-HVS-M [8]), тому розглянемо один з методів стиснення на основі ДКП.

Кодер AGU-M є модифікацією [7] розробленого в 2006 році кодеру AGU (<https://ponomarenko.info/agu.htm>), який, на відміну від JPEG, використовує

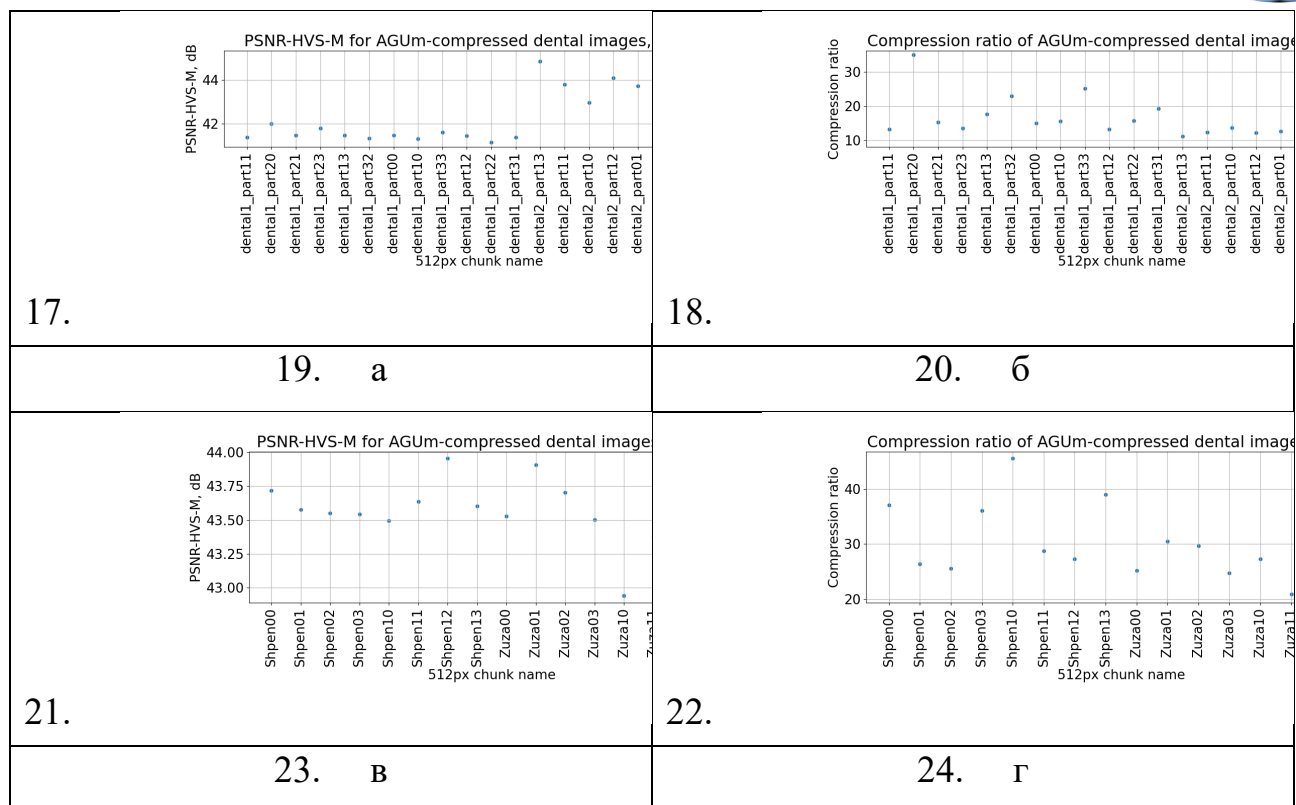


блоки розміром 32×32 пікселі, більш сучасний підхід до кодування квантованих коефіцієнтів ДКП та вбудований деблокінг після декодування. Модифікація [7] полягає в тому, що для квантування ДКП-коефіцієнтів застосовуються не однакові коефіцієнти квантування, а такі, що отримані інтерполяцією значень матриці квантування з JPEG, тобто адаптовані до особливостей системи зору людини. Це дозволяє підвищити ефективність стиснення у відповідності до метрик візуальної якості у порівнянні до первинної версії AGU.

Надані в роботі [7] графіки усередненої залежності PSNR-HVS-M від згаданого раніше SF, що виконує роль ПКС для AGU-M, дозволяють отримати рекомендоване значення SF з метою досягти $\text{PSNR-HVS-M} \approx 42,5$ дБ для того, щоб коректно порівняти характеристики стиснення для AGU-M та JPEG. Значення SF має приблизно дорівнювати 8,8, тож отримаємо та проаналізуємо результати саме для цього значення.

Вони наведені на рис. 3. Як можна побачити, середнє значення PSNR-HVS-M дійсно приблизно дорівнює 42,5 дБ (рис. 3,а), а самі значення для фрагментів лежать в межах від 41 до 45 дБ, тобто вимоги до якості вдалося задовільнити. Для фрагментів зображення системи Dentsply Sirona (рис. 3,в) середнє значення PSNR-HVS-M трохи вище ($\approx 43,5$ дБ), а самі значення для фрагментів лежать в дуже вузьких межах від 42,9 до 44,0 дБ. При цьому найважливішим є те, що значення КС виявились, загалом, суттєво більшими, ніж для JPEG. Для даних на рис. 3,б значення КС лежать в межах від 9,8 до 33, а для даних на рис. 3,г – від 20 до майже 50. Тож суттєво більшими, ніж для JPEG, виявились як мінімальні, так і максимальні значення КС, що свідчить про доцільність використання кодеру AGU-M (деякі додаткові дані можна знайти в нашій роботі [9]).

Зрозуміло, що будь-які метрики візуальної якості не є ідеальними і поріг помітності внесених спотворень є досить умовним (існують підходи до аналізу, що базуються на так званих ледь помітних спотвореннях – just noticeable distortions [10]). Тому, крім проведеного вище кількісного аналізу на основі метрики PSNR-HVS-M, були також проведені експерименти по візуальному



**Рисунок 3 – Дані для стиснення фрагментів стоматологічних зображень
для двох сучасних систем, AGU-M, SF=8,8**

порівнянню фрагментів до стиснення та із стисненням у відповідності до наданих рекомендацій. Експерименти були проведені чотирма спеціалістами-стоматологами з використанням високоякісних моніторів та відповідно до рекомендацій до таких експериментів (відстань до монітору, час проведення експерименту, тощо). Виявилось, що лише у 15% випадків спеціалісти помічали деяку відмінність порівнюваних зображень, але в жодному випадку спотворення внаслідок стиснення з втратами не можна було вважати такими, що негативно впливають на діагностичну цінність.

Приклад стиснених зображень наведений на рис. 4. В обох випадках PSNR-HVS-M $\approx$ 42 дБ, але для зображення, що стиснуте JPEG (його фрагмент розташований зліва) КС дорівнює 14,7, а для зображення, що стиснуте AGU-M (справа) КС дорівнює 23,5, тобто є суттєво більшим. На наш погляд, розрізнити ці зображення (знайти явні відмінності) дуже важко, при цьому вони аналогічно не відрізняються від фрагменту нестисненого зображення.



Рисунок 4 – Фрагмент зображення, стисненого JPEG (зліва) та AGU-M (справа)

Висновки

Таким чином, показано, що є можливість стискати стоматологічні зображення практично без візуально помітних спотворень із застосуванням кодерів JPEG та AGU-M із забезпеченням досить високих значень КС. При цьому завдяки наведеним рекомендаціям по вибору ПКС можна уникнути ітераційного [7] або двоетапного [8] стиснення, яке зазвичай використовують, коли необхідно забезпечити бажану якість стиснених зображень у відповідності до метрик якості, що використовуються користувачем. Це дозволяє виконувати стиснення швидко і в автоматичному режимі.

Доведено, що при практично однаковій якості стиснених зображень кодер AGU-M забезпечує суттєво кращі (більші) значення КС, що дозволяє зекономити пам'ять на збереження даних або час на їх передачу по каналах зв'язку. Це підтверджено результатами експериментів по аналізу стиснених та первинних зображень, що проведені спеціалістами-стоматологами.

**KAPITEL 4 / CHAPTER 4⁴****MODERN SOLUTIONS FOR ASSEMBLING AND REASSEMBLING DOCUMENTS IN A SPECIALIZED DOCUMENT MANAGEMENT SYSTEM****DOI: 10.30890/2709-2313.2024-26-00-031****Вступ**

Щороку різноманітні інстанції обробляють незлічену кількість запитів у вигляді документів [1-5]. Кожен з надісланих документів відповідає строгій формі та має складатись вручну. Також на базі надісланих документів секретарі складають протоколи засідань та витяги після розгляду документу та винесеного рішення на рівні кожної з інстанцій. Такий підхід до роботи з документами спричиняє доволі вагоме навантаження та є дуже вразливим до бюрократичних помилок [6-9]. Такими помилками можуть бути як граматичні неточності, так і похибки під час надсилання документа для подальшого його обробки. Усі вищенаведені аргументи пов'язані з процесом обробки документів вручну. Тому тема дослідження є актуальною.

Таким чином, існує потреба у аналізі та вдосконаленні методів обробки документів, зокрема методів збереження цілісності та автентичності документів та їх автоматизованої генерації. Основна увага приділяється процесам асемблювання та реасемблювання документів.

Метою роботи є підвищення відповідності автоматизованої системи документообігу основним принципам ЕСД за рахунок застосування процедур асемблювання та реасемблювання.

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати такі завдання:

- 1) Провести огляд сучасних ЕСД, проаналізувати їх переваги і недоліки;
- 2) Розробити технологічний ланцюжок спеціалізованої автоматизованої системи документообігу;
- 3) Побудувати аналітичний опис технологічного ланцюжка САСД;
- 4) Перевірити розробку на предмет відповідності основним принципам ЕСД.

⁴*Authors: Korobeinikova T. I.*



Об'єктом дослідження є процеси асемблювання та реасемблювання документів на рівні кожного з департаментів. Процеси асемблювання та реасемблювання сприяють оптимізації опрацювання документів під час складання безпосередніх файлів. Такий ефект досягнуто шляхом автоматизованого створення файлів та генерації їх вмісту програмно.

Предметом дослідження є методи та засоби автоматизованої обробки документів.

Наукова новизна полягає у такому:

- Вдосконалено технологічний ланцюжок спеціалізованої автоматизованої системи документообігу за рахунок використання програмних засобів для асемблювання та реасемблювання документів;
- Запропоновано аналітичний опис програмних засобів для асемблювання та реасемблювання документів, що враховує можливість автоматизованої генерації документів.

4.1. Аналіз сучасних систем документообігу

В даній частині роботи виконано аналіз сучасних систем документообігу та розглянуто поняття про мануальний підхід обробки документів.

Метою даної частини роботи є ознайомлення з існуючими імплементаціями електронних систем документообігу (ЕСД) та створення їх порівняльної характеристики в ході якої було розглянуто їх переваги та недоліки. Зокрема автором були розглянуті такі ЕСД як “Дія”, “PandaDoc” та “GoogleDocs”.

4.1.1. Мануальний підхід до систем документообігу

У сучасному світі підприємства мають тримати руку на пульсі, коли мова йде про операції даними. Витрати на розвиток бізнесу та ведення документообігу шляхом мануальної обробки виросли до неймовірних масштабів. Традиційних методів обробки даних стає недостатньо, оскільки існує певний людський



фактор, і обробка великих обсягів даних ускладнюється через обробку їх співробітниками вручну [10-11].

Податкові чеки, будівельні документи, торговельні накладні та документи будь-яких типів надсилаються до різноманітних відділів для їх обробки. Багато підприємств не використовують автоматизовану обробку і наймають працівників для перетворення цих фізичних даних в електронні. Також існують стандарти, яких слід дотримуватися, які можуть відрізнятися від країни до країни, наприклад, Європейські правила виставлення рахунків з податком на додану вартість. Всі фактори описані вище суттєво ускладнюють ведення бізнесу та призупиняють його розвиток [11].

Для прикладу на підприємстві з обробки замовлень процес ручної обробки документів для рядового працівника виглядав би таким чином:

- 1) Переглянути список нових замовлень;
- 2) Заповнити форму для запиту нових товарів;
- 3) Передати заповнену форму менеджеру;
- 4) Дочекатися схвалення менеджером;
- 5) Надіслати форму до бухгалтерії;
- 6) Дочекатися схвалення бухгалтерією;
- 7) Надіслати запит до бухгалтерії з проханням про створення нового замовлення;
- 8) Дочекатися надсилання замовлення.

Залежно від типу підприємства можуть бути деякі відмінності, але основа бюрократичного процесу залишається незмінною. Описаний процес є не тільки громіздким, але і потребує багаторазових передач від одного відомства до іншого, що призводить до великої ймовірності втрати деяких документів під час переміщення.

Нижче ми опишемо набір недоліків, що виникають під час мануальної обробки документів:

1. Обмежена швидкість введення даних.

Хоч людина і може вводити дані мануально з постійною швидкістю



протягом тривалого часу – неможливо цілодобово підтримувати максимальну продуктивність або середню кількість натискань клавіш на годину безперервно. Співробітники схильні до втоми, і коли до цього додаються лікарняні та вихідні, то це спричиняє затримки з обробкою документів.

2. Високі витрати.

На підприємствах працівники відділу обробки документів оплачуються погодинно, що в довгостроковій перспективі стає дорогим для підтримки та часто призводить до збитковості.

3. Більше виправлень.

Ніхто не любить перевіряти заповнені форми та документи на предмет наявності в них помилок та переробляти вже оброблені документи. Але через мануальний документообіг цей факт є неминучим. Існує елемент людської помилки, і незалежно від того, наскільки кваліфікованими є працівники – вони роблять помилки. Крім того, якщо деталі в документах оновлюються, і про них повідомляється пізніше, працівники мають повторно ввести дані та розпочати процес обробки заново.

Нижче буде наведена порівняння мануальної і електронної обробки документів (таблиця 1). Під час аналізу даних було проведення переваг і недоліків мануальної та електронної систем документообігу [12-13]. Очевидно, що результати даного порівняння свідчать на користь електронної системи, так як мануальна система програє в більшості категорій. Зокрема мануальна обробка представляє собою доволі трудомісткий і часозатратний процес за високого рівня вразливості до простих помилок спричинених людським фактором. В той же час електронна система обробки документів дозволяє повністю нівелювати більшість згаданих недоліків мануальної системи через усунення людського фактора від процесу обробки. Параметр початкової вартості все ж єдина категорія в якій мануальна система обробки ще є вигідним вибором на противаги електронній.



Таблиця 1 – Порівняння мануальної і електронної обробки документів

	Мануальна	Електронна
Початкова вартість	Низька	Висока через вартість програмного забезпечення
Людське втручання	Мануальна обробка вимагає від працівників покрокового опрацювання	Програми для автоматизованої обробки даних потребують мінімального втручання людини. Вони мають чітко визначені робочі процеси для обробки документів та введення даних.
Час	Це дуже трудомісткий процес, до того ж компанії мають знайти відповідних фахівців	Автоматична обробка даних посередництвом попередньо навчених API займає кілька хвилин. Це чудовий спосіб заощадити години на обробку документів [11].
Кількість помилок	Мануальна обробка має такі ризики, як повторювані записи, друкарські помилки, граматичні помилки та введення неправильної інформації	Автоматизоване введення даних може посилатися на досвід попередніх моделей даних і перевіряти введену інформацію
Аналіз	Аналіз даних мануально настільки ж громіздкий, як і їх обробка	Технологія автоматичного вилучення даних швидко читає, упорядковує та аналізує дані, що зберігаються.

Авторська розробка

4.1.2 Огляд сучасних електронних систем документообігу

Електронна система документообігу (ЕСД) – інформаційна система, що



забезпечує процес створення, управління доступом і поширення електронних документів, а також забезпечує контроль над потоками документів в організації.

Основні принципи ЕСД:

- 1) Однократна реєстрація документа, що дозволяє однозначно ідентифікувати документ в будь-якій інсталяції даної системи;
- 2) Можливість паралельного виконання операцій, що дозволяє скоротити час руху документів і підвищення оперативності їх виконання;
- 3) Безперервність руху документа, що дозволяє ідентифікувати відповідального за виконання документа (завдання) в кожен момент часу життя документа (процесу);
- 4) Єдина (або погоджено розподілена) база документної інформації, що дозволяє унеможливити дублювання документів;
- 5) Ефективно організована система пошуку документа (час на пошук зменшується), що дозволяє знаходити документ, володіючи мінімальною інформацією про нього;
- 6) Розвинена система звітності по різних статусах і атрибутах документів, що дозволяє контролювати рух документів по процесах документообігу і приймати управлінські рішення, ґрунтуючись на даних зі звітів.

Електронна система документообігу «ДІЯ». Дія – це один портал, де можна отримати всі послуги онлайн: швидко та зручно. В порталі доступні такі послуги як Електронний паспорт, Електронне водійське посвідчення, Автоцивілка, Студентський квиток, Військовий квиток, Закордонний паспорт тощо [14].

З нинішнім функціоналом «Дія» – це папка, де зберігаються цифрові копії документів користувача. І їх офіційно визнають аналогами паперових чи пластикових посвідчень. На початковому етапі, одразу після запуску додатку, в цифровому вигляді можна було тримати тільки два документи – водійське посвідчення та свідоцтво про реєстрацію транспортного засобу (рисунок 1).

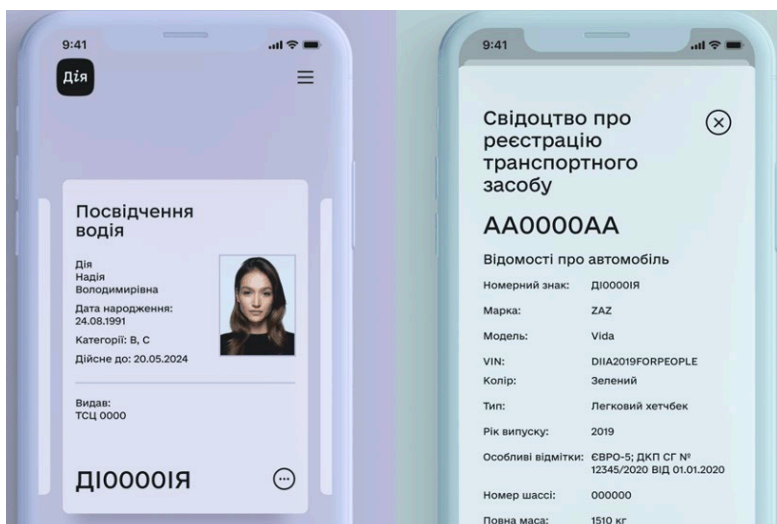


Рисунок 1 – Інтерфейс електронної системи документообігу «Дія»

Джерело: [14]

Сьогодні онлайн-сервіс «Дія» передбачає близько 20 послуг, які можуть надаватися онлайн. При цьому такі послуги розраховані як для громадян, так і для суб'єктів підприємницької діяльності. Для того щоб почати користуватися онлайн-сервісом «Дія», необхідно пройти реєстрацію з використанням кваліфікованого електронного підпису (колишній електронний цифровий підпис).

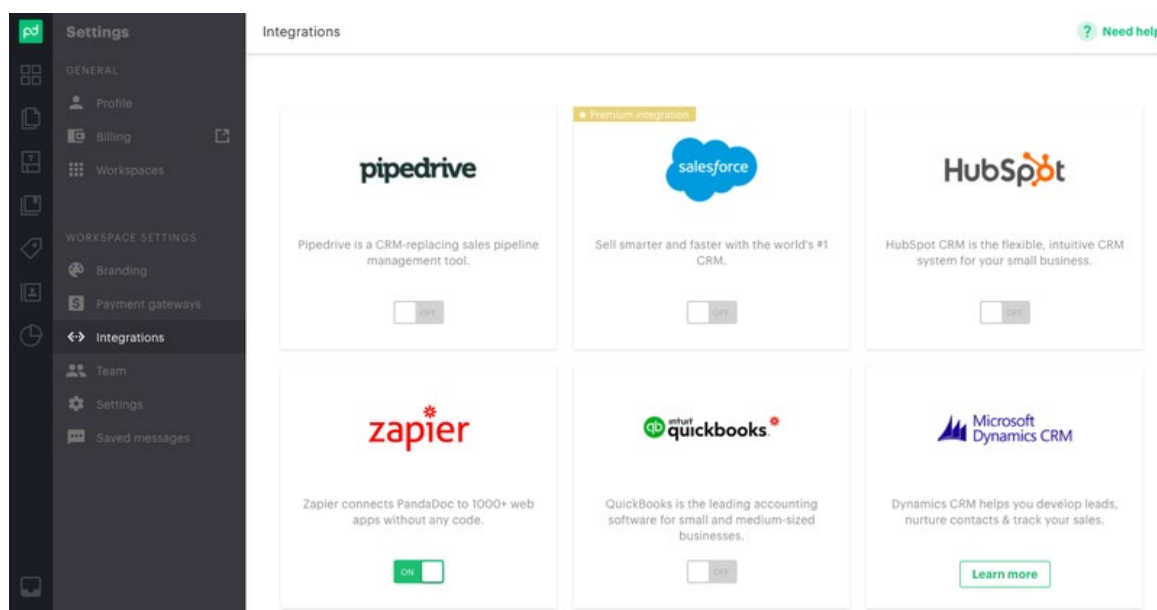
В «Дія» зазначаються такі дані: приблизний час формування заявки, вартість і строк надання послуги, опис послуги, покрокова інструкція, часті запитання, пов'язані закони й накази тощо.

Проте в більшості випадків онлайн-сервіси, запропоновані в «Дія», реалізуються не через власний сайт «Дія», а через відповідні сайти державних органів. Тобто фактично необхідно вчиняти додаткові дії (авторизуватися на сайті відомств для отримання онлайн-послуги). Водночас є сервіси, які не потребують такої додаткової авторизації (зокрема, оформлення допомоги у зв'язку з безробіттям) [12].

Електронна система документообігу «PandaDoc». PandaDoc – онлайн-сервіс для створення документів і електронного документообігу. У PandaDoc можна створювати документи, використовуючи вбудований редактор, підписувати документ за допомогою електронного підпису і відправляти його на



затвердження (рисунок 2) [15].



**Рисунок 2 – Інтерфейс електронної системи документообігу
“PandaDoc”**

Джерело: [15]

Вбудований редактор в PandaDoc орієнтований на створення документів за допомогою шаблонів або з нуля. В редакторі можна створювати не тільки офіційні документи (рахунки, договори, чеки), але також маркетингові документи. Редактор працює як блоковий конструктор – в лівій частині відображається сам документ, в правій блоки для додавання. Користувач може додати в документ текст, зображення, відео, таблицю, прайс-лист, чек-боксу, дату і інше. При роботі з текстом можна змінювати шрифт, його розмір і колір, налаштовувати положення.

Створені документи зберігаються в одному списку, звідки користувач може підписати і відправити документ. Після вчинення будь-які дії з документом пропонується статус, який користувач може відстежувати в підменю «статусів».

Особливості PandaDoc:

- PandaDoc містить в собі функції для створення, відстеження і виконання документів, а також функції для електронних підписів;
- Рішення складається з функцій в таких категоріях: пропозиції, угоди,

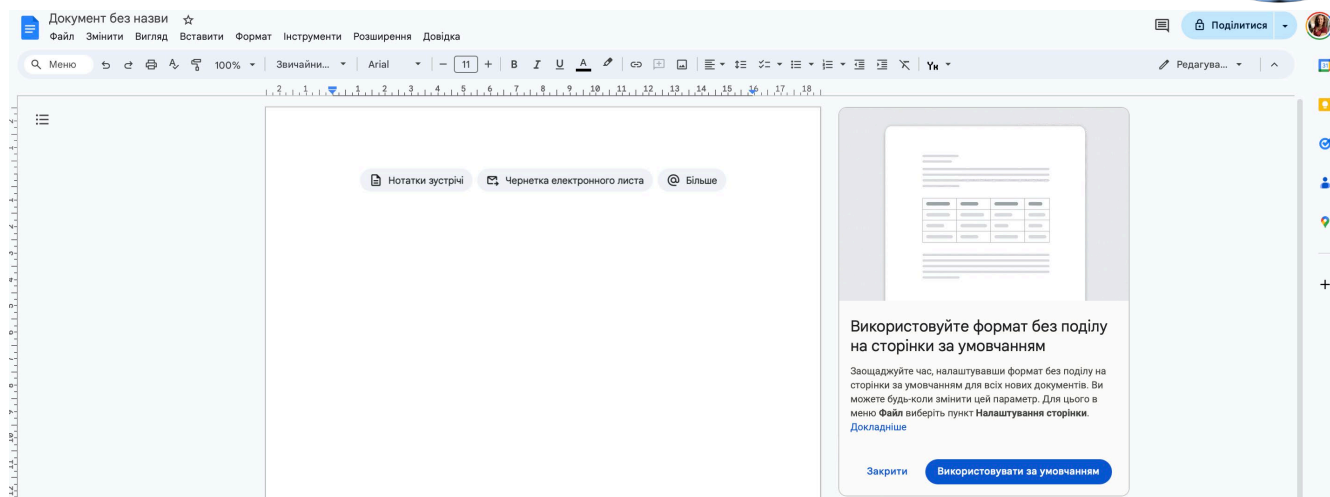


- управління командою, управління контентом, брендування, робочий процес;
- PandaDoc інтегрується з декількома платіжними системами, хмарним сховищем і іншими системами;
 - Надає можливості створення пропозицій і угод з налаштованими шаблонами, що допускають фірмові стилі, теми і параметри персоналізації;
 - Надає можливості автоматизації створення цінових пропозицій за допомогою каталогів продуктів і динамічних таблиць цін, дозволяючи клієнтам вибирати правильний варіант і ціну для них;
 - Надає можливості налаштування пропозицій в пару кліків, додавши відео або відгуки прямо з вашої бібліотеки контенту, доповнивши дані про угоди з CRM;
 - Налаштування документації онлайн.

Переваги PandaDoc:

- Інтеграція з Службами Google, Dropbox, Vox і іншими;
- Завантаження та налаштування файлів будь-якого типу;
- Відправка документів в Google Docs;
- Юридично обов'язкові електронні підписи;
- Коментування і співпраця в режимі реального часу;
- Необмежений доступ до професійної бібліотеки шаблонів;
- Додавання полів для підписів, ініціалів, дат і т. д.;
- Аудит діяльності.

Електронна система документообігу «GoogleDocs». Google Docs – онлайн-редактор для створення і форматування текстових документів. Редактор допомагає користувачу створювати документи на ходу, ділитися ними з колегами і при необхідності спільно їх редагувати. Призначені для користувача документи в Google Docs зберігаються в хмарі, це забезпечує додатковий захист і доступ з різних пристроїв (рисунк 3) [16].



**Рисунок 3 – Інтерфейс електронної системи документообігу
“GoogleDocs”**

Джерело: [16]

Google Docs мають повнофункціональний редактор текстів, який можна використовувати як в браузері, так і на мобільному пристрої. Створюючи документ, користувач може змінювати шрифти, завантажувати власні, вставляти зображення, графіки, таблиці, створювати списки і автоматично перевіряти граматику, і орфографію. Для збільшення функціональності Google Docs їх можна інтегрувати зі сторонніми веб-додатками.

Так як Google Docs – онлайн-редактор, то він добре підходить для спільної роботи. Користувачі можуть ділитися з колегами і друзями документами, спільно їх редагувати, управляти доступом, залишати коментарі, бачити в режимі реального часу редагування, який вносить інший редактор. Внесені зміни відображаються в окремому меню, звідки можна відкотитися до необхідної версії.

Особливості Google Docs:

- Створення та редагування документів;
- Спільне редагування документів в реальному часі;
- Відправка запрошень користувачам по посиланню або по електронній пошті;



- Перегляд історії змін документа;
- Робота з форматом Word;
- Завантаження документів у форматах Word, OpenOffice, RTF, PDF, HTML;
- Переклад документів на інші мови.

4.1.3 Аналіз переваг та недоліків сучасних електронних систем

документообігу

Ключовими перевагами ЕСД «ДІЯ» є:

- Компактне зберігання офіційно визнаних цифрових копій документів
- Отримання держпослуг на різних рівнях онлайн

Основними недоліками електронної системи документообігу «ДІЯ» є:

1) Складна авторизація.

Це перша незручність, з якою стикаються ті, хто встановлює «Дію». Щоб увійти в застосунок, знадобиться ідентифікація через технологію BankID. Поки що це єдиний спосіб реєстрації. І вже на цьому етапі, промучившись з переходом у додаток для мобільного банкінгу і назад у «Дію», кілька разів ввівши пароль (бо навіть таку елементарну операцію «Дія» виконує, погано реагуючи на дотик і пропускаючи букви) та відповівши на дзвінок від банку, можна отримати відповідь «Неуспішна авторизація».

2) Відображення не всіх документів.

Це одна з найпоширеніших користувацьких скарг. Від моменту запуску додатку цифрова копія посвідчення водія доступна тільки власникам документів нового зразка. Щоб мати права у смартфоні, власники старих документів мусять обміняти їх на нові. Посвідчення радянського зразка чи зразка 90-х взагалі не оцифровані. Проблеми можуть виникати і з пластиковими посвідками, виданими до 2014 року. У такому випадку доведеться відправити заявку на додаткову верифікацію, перейшовши в електронний кабінет водія, завантажити фото обох сторін документа і заповнити онлайн-форму. Заявка відправиться в сервісний центр МВС, і якщо перевірка мине успішно, документ має відобразитися в



додатку

3) Офлайн неможливо підтвердити, що документ справжній.

У офлайн-режимі застосунок не генерує QR-код. Себто, якщо патруль спинить вас на якомусь глухому перевалі, де відсутнє інтернет-покриття, а ваші права та паспорт тільки в смартфоні – ви у халепі. Не відсканований код – недійсний документ. Також документами не вважаються скріни з додатку.

Ключовими перевагами ЕСД «GoogleDocs» є:

- Сервіс безкоштовний;
- Все зберігається в хмарі. Якщо комп'ютер зламався - інформація залишиться цілою;
- Простий обмін файлами. Відправили посилання - людина отримала документ. Це економить багато часу вам, вашим колегам і клієнтам;
- Інструменти для колективної роботи. Над одним файлом може працювати кілька людей одночасно;
- Зручна історія змін. За допомогою комбінацій клавіш можна перемикатись між версіями файлу;
- Кросплатформеність. Google Docs працює на будь-якому пристрої з будь-якою операційною системою, в якій є звичний веб-браузер.

Основними недоліками ЕСД «GoogleDocs» є:

- Працює відносно повільно. Особливо з об'ємними текстами за низької швидкості інтернету;
- Залежить від облікового запису. Всі документи зберігаються на хмарі, яке прив'язане до вашого профілю. Позбудетеся доступу – позбудетеся всього;
- Залежить від наявності доступу до інтернету. Без доступу до мережі ви не зможете нічого відкрити. За винятком файлів, які зберігаються в кеші.

Ключовими перевагами ЕСД «PandaDoc» є:

- Інтеграція з Службами Google, Dropbox, Box і іншими;
- Завантаження та налаштування файлів будь-якого типу;



- Відправка документів в Google Docs;
- Юридично обов'язкові електронні підписи;
- Коментування і співпраця в режимі реального часу;
- Необмежений доступ до професійної бібліотеки шаблонів;
- Додавання полів для підписів, ініціалів, дат і т. д.;
- Аудит діяльності.

Основними недоліками ЕСД «Pandadoc» є:

- Відсутність системи контролю версій;
- Погане форматування шаблонів;
- Завищена ціна.

Результати виконаного аналізу.

За результатами наукового пошуку автором пропонується таблиця порівняння розглянутих ЕСД за такими критеріями, що були висвітлені у таблиці 1: Початкова вартість; Людське втручання; Час; Кількість помилок; Аналіз; Можливості електронно-цифрового підпису документів; Створення шаблонів; Автоматична побудова документів в реальному часі

Оцінимо кожен із ЕСД по 10-бальній шкалі по кожному із критеріїв, базуючись на проведеному вище аналізі переваг та недоліків кожної із розглянутих ЕСД і занесемо дані в таблицю 2.

І побудуємо візуалізацію отриманих даних (рисунок 4). Як можна бачити з наведеного вище огляду переваг та недоліків трьох різних систем – найзручнішою у використанні є електронна система документообігу «GoogleDocs». Дана система має простий і доступний інтерфейс, є безкоштовною, а також надає можливість версіонування файлів. Наведені фактори є ознаками флагмана в індустрії електронних систем документообігу.

З іншого боку «PandaDoc» володіє всіма особливостями системи, яка буде запропонована для створення в межах цієї роботи. А саме надання можливості електронно-цифрового підпису документів, створення шаблонів та автоматична побудова документів в реальному часі. Наведені фактори роблять «PandaDoc» нашим прямим теоретичним конкурентом.



Таблиця 2 – Порівняння розглянутих ЕСД

	Дія	PandaDoc	GoogleDocs
Початкова вартість	0	8	0
Людське втручання	3	2	1
Час	1	1	0
Кількість помилок	1	1	2
Аналіз	5	9	0
Можливості електронно-цифрового підпису документів	6	8	-
Створення шаблонів	0	10	5
Автоматична побудова документів в реальному часі	10	10	10

Авторська розробка



Рисунок 4 – Порівняння розглянутих ЕСД

Авторська розробка

4.1.4. Постановка задач та обґрунтування вибору технологій

Після проведеного аналізу та отриманих даних виникає потреба у розробці розробити спеціалізовану систему документообігу для автоматизації створення витягів з протоколів засідання структурних підрозділів, обміну документами між структурними підрозділами. Додаток має дозволяти редагування, зберігання та



пересилку документів між установами, що спростить процес подання та розгляду документів на всіх рівнях бюрократичної ієрархії. Забезпечить можливість електронно-цифрового підпису документу [10-12].

Ключовими перевагами запропонованої спеціалізованої ЕСД можуть стати:

- автоматичне формування витягів з протоколів засідань структурних підрозділів;
- пересилання витягів з протоколів між структурними підрозділами;
- електронно-цифровий підпис витягів;
- автоматизоване асемблювання порядку денного для протоколів засідань структурних підрозділів на базі вхідної кількості витягів з структурних підрозділів нижчого рівня;
- редагування та зберігання документів у різних форматах (doc, excel, pdf);
- може бути розширена для використання в більш широкому спектрі задач.

Технології для використання:

1) Spring-Boot Framework.

Spring Boot – це інструмент, який дозволяє швидше і простіше розробляти вебпрограми та мікросервіси з Spring Framework за допомогою трьох основних можливостей:

- Автоконфігурація окремих компонентів програми;
- Можливість створення автономних додатків.

Ці функції присутні для того, щоб надати інструмент, який дозволяє легко створити додаток на основі Spring з мінімальними налаштуваннями.

В запропонованій спеціалізованій системі документообігу Spring-Boot Framework буде використовуватись для налаштування підключення до бази даних та написання основних компонентів серверної частини додатку.

2) Hibernate.

Hibernate – це інструмент реляційного відображення об'єктів, який надає фреймворк для відображення об'єктно-орієнтованих моделей до реляційних баз



даних для веб-додатків.

Фреймворк співставляє класи, розроблені мовою програмування Java, з таблицями баз даних і типів даних мови програмування Java з типами даних мови запитів SQL та надає можливість автоматизованої побудови запитів до бази даних [17].

В запропонованій спеціалізованій системі документообігу Hibernate буде використовуватись для швидкого налаштування та керування об'єктами, що є репрезентаціями збережених в базі даних ресурсів користувача.

3) Docker.

Docker – це платформа для розробки та запуску програм. Docker дозволяє відокремити програми від інфраструктури, задля швидкої розробки програмного забезпечення. За допомогою Docker можна керувати інфраструктурою так само, як і програмами [18].

В запропонованій спеціалізованій системі документообігу Docker буде використовуватись для налаштування локального тестування додатку та запуску.

4) AWS EC2.

Хмарна технологія Amazon Elastic Compute Cloud (Amazon EC2) – це веб-сервіс, що надає безпечні масштабовані обчислювальні ресурси в хмарі. Він спрощує проведення обчислень в хмарі в масштабі всього Інтернету. Дозволяє отримати доступ до обчислювальних ресурсів і налаштувати їх з мінімальними зусиллями. Він надає користувачам повний контроль над обчислювальними ресурсами, а також перевірену обчислювальне середовище Amazon для роботи [19].

В запропонованій спеціалізованій системі документообігу Amazon EC2 буде використовуватись для встановлення додатку на віртуальну машину, щоб забезпечити віддалений доступ до нього та зробити його доступним для інших користувачів.

5) AWS S3.

Amazon Simple Storage Service – веб-сервіс, що надає можливість зберігання та отримання будь-якого обсягу даних в будь-який час з будь-якої точки мережі



і є так званим файловим хостингом [20].

В запропонованій спеціалізованій системі документообігу Amazon Simple Storage Service буде використовуватись для зберігання файлів (витягів з протоколів) користувачів та швидкого доступу до них.

6) AWS RDS.

Amazon Relational Database Service або Amazon RDS – веб-сервіс, який надає користувачам доступ до даних реляційних баз даних з подальшим використанням цих даних в додатках. Amazon RDS дозволяє виконувати швидке розгортання, просте обслуговування і легке масштабування серверів баз даних [21].

В запропонованій спеціалізованій системі документообігу Amazon Relational Database Service використовуватись для розміщення бази даних на віртуальній машині та забезпечення віддаленого доступу до бази даних.

7) Mysql.

MySQL – це швидка, надійна та гнучка система управління реляційними базами даних з відкритим вихідним кодом.

В запропонованій спеціалізованій системі документообігу Amazon Relational Database Service буде використовуватись для зберігання даних користувачів та посилань на їх ресурси розміщені в сховищах файлів.

4.2. Робота спеціалізованої автоматизованої системи документообігу

В даній частині роботи розроблено технологічний ланцюжок спеціалізованої автоматизованої системи документообігу, розроблені механізми асемблювання та реасемблювання документів, також описано процеси, що супроводжують технологічний ланцюжок. Метою другої частина даної роботи є докладний розгляд ключових механізмів спеціалізованої автоматизованої системи документообігу, їх загальна взаємодія на рівні клієнт-сервер.



4.2.1. Технологічний ланцюжок спеціалізованої автоматизованої системи документообігу

Спеціалізована автоматизована система документообігу (САСД) – це така система документообігу, первинною ціллю якої є автоматизація процесу обробки документів та всіх мануальних процесів пов'язаних з ними. Підвищення ефективності обробки документів шляхом нівелювання недоліків мануального підходу обробки документів використовуючи хмарні технології та засоби парсингу для автоматичного формування нових документів та швидкого отримання інформації, що може бути оброблена програмно.

Технологічний ланцюжок спеціалізованої автоматизованої системи документообігу (пояснимо зміст кожного з процесів докладно, рисунок 5):

- 1) Першим кроком обробки є формування секретарем протоколу засідання кафедри. Секретар обирає з-поміж надісланих йому документів ті, що будуть розглянуті засіданням.

Після того як секретар завершив процес відбору документів він надсилає їх дані системі, яка згодом автоматично асемблює готовий файл протоколу засідання, завантажує його в хмару та надсилає сформований файл секретареві та завідувачу кафедри задля отримання підпису. Після того як документ розміщено в хмарному середовищі будь-хто з авторизованих осіб може доступитись до нього, та завантажити його на власний комп'ютер для повного його перегляду.

- 1) Після формування протоколу, секретар переглядає список доступних йому документів та підписує потрібні.

Утворений підпис секретаря буде збережено в БД для подальшої верифікації підписаних ним документів.

- 2) Після формування протоколу, завідувач кафедри переглядає список доступних йому документів та підписує потрібні.

Утворений підпис завідувача буде збережено в БД для подальшої верифікації підписаних ним документів.

- 1) На етапі декомпозиції протоколу система перевіряє присутність підписів секретаря та завідувача в базі даних для верифікації



цілісності та автентичності документу.

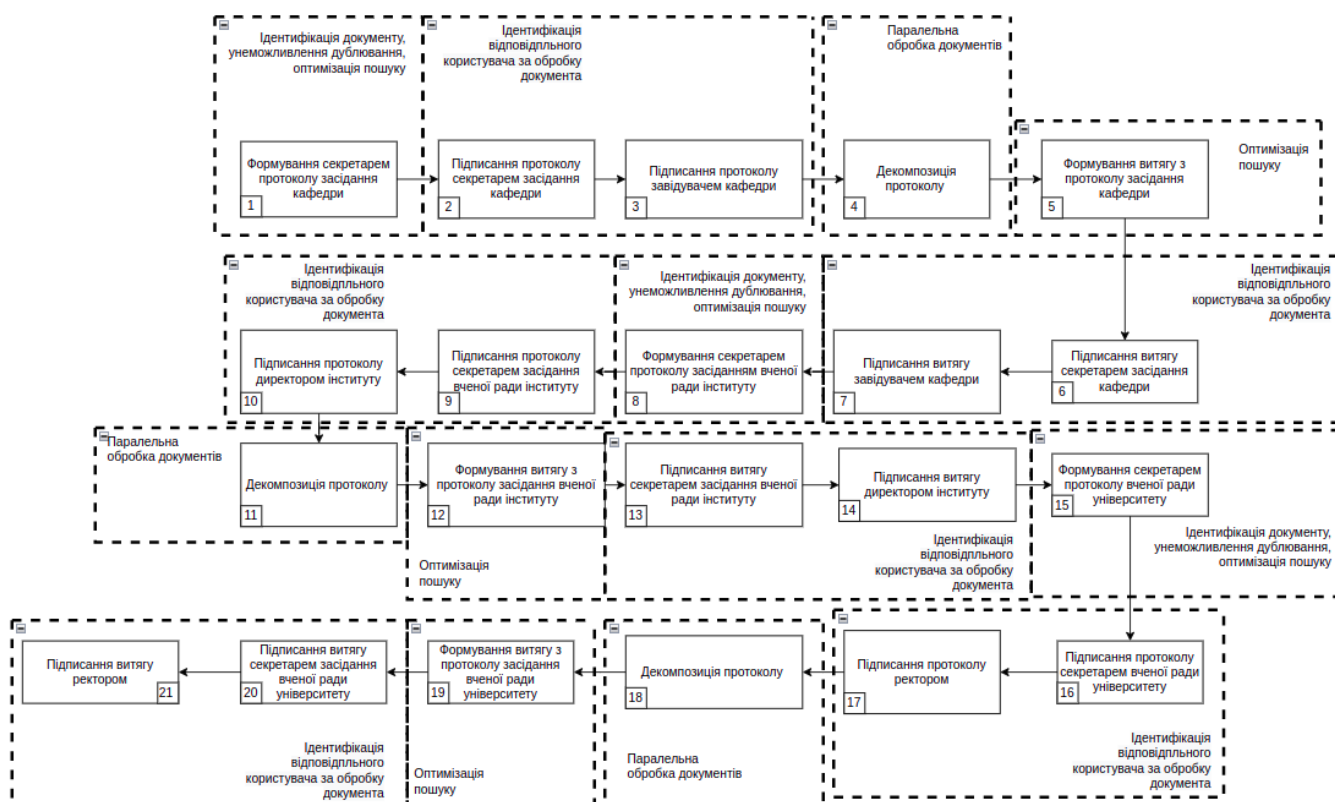


Рисунок 5 – Технологічний ланцюжок САСД

Авторська розробка

Після перевірки підписів алгоритм проводить парсинг файлу з маркування окремих блоків документу (список присутніх, порядок денний, список рішень ухвалених засіданням) для подальшого формування витягів з протоколу.

2) На етапі формування витягу з протоколу система створює окремий документ (витяг) і переносить туди дані розміщені в певному блоці протоколу, який було промарковано на попередньому кроці.

Новостворений файл буде збережено в хмарному середовищі та надіслано секретареві засідання і завідувачу кафедри задля отримання підпису.

3) Після формування витягів з протоколу, секретар переглядає список надісланих йому витягів та підписує потрібні.

Утворений підпис секретаря буде збережено в БД для подальшої верифікації підписаних ним документів.



- 4) Після формування витягів з протоколу, завідувач кафедри переглядає список надісланих йому витягів та підписує потрібні.

Утворений підпис завідувача буде збережено в БД для подальшої верифікації підписаних ним документів.

- 5) На етапі формування секретарем протоколу засідання вченої ради інституту Секретар обирає з-поміж надісланих йому документів ті, що будуть розглянуті засіданням.

Після того як секретар завершив процес відбору документів він надсилає їх дані системі, яка згодом автоматично асемблює готовий файл протоколу засідання, завантажує його в хмару та надсилає сформований файл секретареві та директору інституту задля отримання підпису. Після того як документ розміщено в хмарному середовищі будь-хто з авторизованих осіб може доступитись до нього, та завантажити його на власний комп'ютер для повного його перегляду.

- 6) Після формування протоколу, секретар переглядає список доступних йому документів та підписує потрібні.

Утворений підпис секретаря буде збережено в БД для подальшої верифікації підписаних ним документів.

- 7) Після формування протоколу, директор інституту переглядає список доступних йому документів та підписує потрібні.

Утворений підпис директора буде збережено в БД для подальшої верифікації підписаних ним документів.

- 8) На етапі декомпозиції протоколу система перевіряє присутність підписів секретаря та директора інституту в базі даних для верифікації цілісності та автентичності документу.

Після перевірки підписів алгоритм проводить парсинг файлу з маркування окремих блоків документу (список присутніх, порядок денний, список рішень ухвалених засіданням) для подальшого формування витягів з протоколу.

- 9) На етапі формування витягу з протоколу система створює окремий документ (витяг) і переносить туди дані розміщені в певному блоці



протоколу, який було промарковано на попередньому кроці.

Новостворений файл буде збережено в хмарному середовищі та надіслано секретареві засідання і директорові інституту задля отримання підпису.

- 10) Після формування витягів з протоколу, секретар переглядає список надісланих йому витягів та підписує потрібні.

Утворений підпис секретаря буде збережено в БД для подальшої верифікації підписаних ним документів.

- 11) Після формування витягів з протоколу, директор інституту переглядає список надісланих йому витягів та підписує потрібні.

Утворений підпис директора буде збережено в БД для подальшої верифікації підписаних ним документів.

- 12) На етапі формування секретарем протоколу засідання вченої ради університету. Секретар обирає з-поміж надісланих йому документів ті, що будуть розглянуті засіданням.

Після того як секретар завершив процес відбору документів він надсилає їх дані системі, яка згодом автоматично асемблює готовий файл протоколу засідання, завантажує його в хмару та надсилає сформований файл секретареві та директору інституту задля отримання підпису. Після того як документ розміщено в хмарному середовищі будь-хто з авторизованих осіб може доступитись до нього, та завантажити його на власний комп'ютер для повного його перегляду.

- 13) Після формування протоколу, секретар переглядає список доступних йому документів та підписує потрібні.

Утворений підпис секретаря буде збережено в БД для подальшої верифікації підписаних ним документів.

- 14) Після формування протоколу, ректор переглядає список доступних йому документів та підписує потрібні.

Утворений підпис ректора буде збережено в БД для подальшої верифікації підписаних ним документів.

- 15) На етапі декомпозиції протоколу система перевіряє присутність



підписів секретаря та ректора в базі даних для верифікації цілісності та автентичності документу.

Після перевірки підписів алгоритм проводить парсинг файлу з маркування окремих блоків документу (список присутніх, порядок денний, список рішень ухвалених засіданням) для подальшого формування витягів з протоколу.

- 16) На етапі формування витягу з протоколу система створює окремий документ (витяг) і переносить туди дані розміщені в певному блоці протоколу, який було промарковано на попередньому кроці.

Новостворений файл буде збережено в хмарному середовищі та надіслано секретареві засідання і ректорові задля отримання підпису.

- 17) Після формування витягів з протоколу, секретар переглядає список надісланих йому витягів та підписує потрібні.

Утворений підпис секретаря буде збережено в БД для подальшої верифікації підписаних ним документів.

- 18) Після формування витягів з протоколу, ректор переглядає список надісланих йому витягів та підписує потрібні.

Утворений підпис ректора буде збережено в БД для подальшої верифікації підписаних ним документів.

4.2.2 Процеси асемблювання та реасемблювання

Процеси реасемблювання – це процес розкладання документу на частини, використовуючи спеціальні маркування та регулярні вирази задля подальшого парсингу цих частин програмою. Процес реасемблювання передбачає перетворення документу на програмні об'єкти для подальшого їх маніпулювання системою. Візуалізація процесу реасемблювання наведено на рисунку 6.

Під час процесу реасемблювання система розбирає наданий протокол та автоматично формує витяги для нього. В даному випадку програмно ми розбиваємо протокол на 4 частини:

- 1) Першою частиною є заголовок протоколу, що містить його номер. Ця частина використовується для визначення номеру протоколу. Згодом



цей номер буде розміщено у верхній частині витягу для подальшої ідентифікації протоколу з якого витяг було сформовано.

- 2) Наступною частиною є блок з датою проведення засідання. Він згодом буде використовуватись для визначення дати, що буде розміщуватись у верхній частині документу-витягу.
- 3) Третьою частиною є опис питання, що було розглянуто засіданням і є предметом створення витягу. Ця частина розміщується програмою в такий самий спосіб як вона була б розміщена в рчну (вище середини документу, після шапки витягу)
- 4) Четвертою частиною є рішення прийняте засіданням стосовно питання, що розміщувалося в третьому блоці і описане детальніше в попередньому пункті. Частина з рішенням розміщується у витязі одразу під питанням стосовно якого воно було винесене.

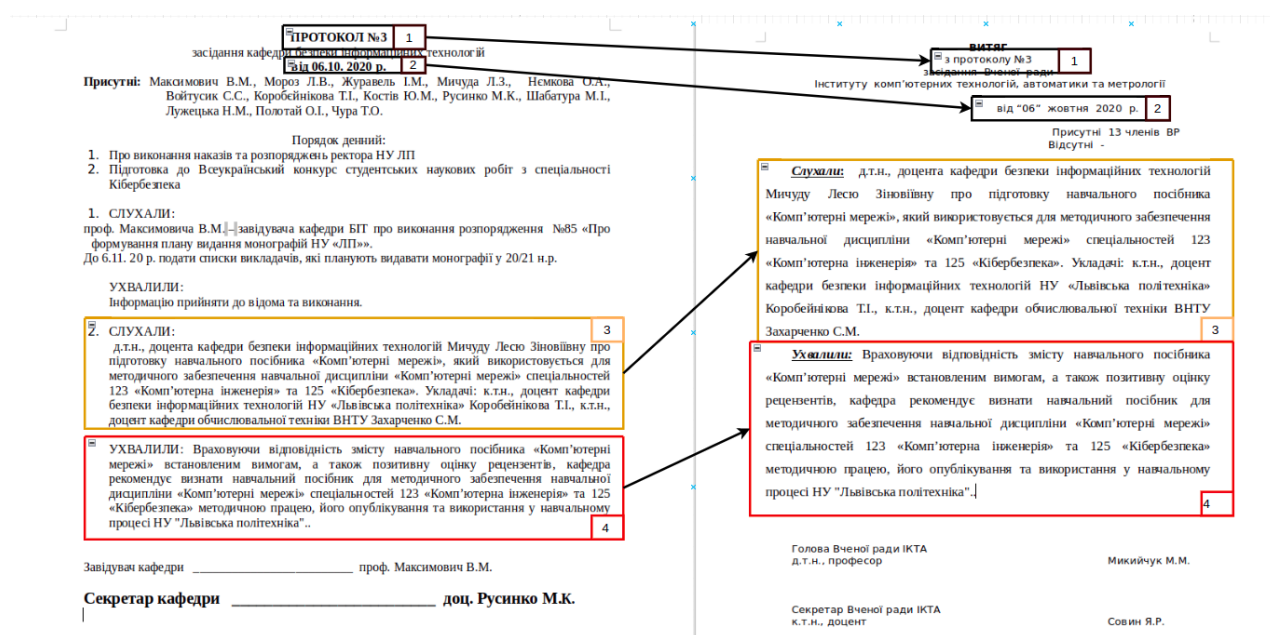


Рисунок 6 – Візуалізація процесу реасемблювання

Авторська розробка

Процес асемблювання – це процес, що є протидежним процесу реасемблювання і має на меті конвертування документу із програмного стану в фізичний для подальшої обробки. Зазвичай в процесі асемблювання також



задіяний пустий (незаповнений) зразок документу, який програма використовує для наповнення даними. Процес асемблювання передбачає утворення документу, використовуючи дані та об'єкти, що є у розпорядженні програми. Візуалізація процесу асемблювання наведено на рисунку 7.

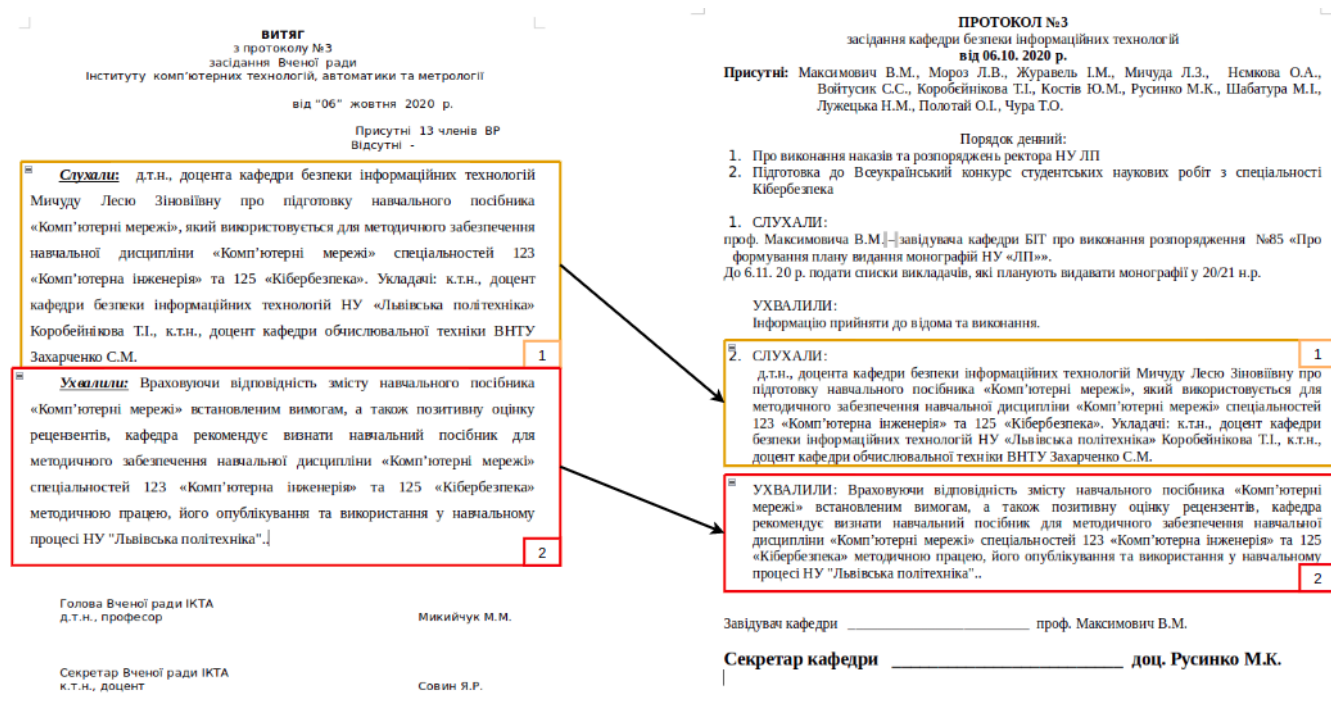


Рисунок 7 – Візуалізація процесу асемблювання

Авторська розробка

Під час процесу асемблювання система обирає витяги, питання яких мають бути включені в протокол засідання і покроково додає дані з витягів до документу згодом формуючи власне прокол. Опишемо як програма розкладає витяг на частини для подальшого їх перенесення до протоколу:

- 1) Першою частиною у витязі є опис питання, що є предметом сформованого витягу. Цей блок використовується для питання до протоколу і розміщення його у відповідності до порядку денного.
- 2) Другою частиною є рішення прийняте засіданням стосовно питання, що описане детальніше в попередньому пункті. Частина з рішенням розміщується в протоколі одразу під питанням стосовно якого воно було винесене.



4.2.3 Відповідність розробки основним принципам ЕСД

Оголошені в першому розділі роботи основні принципи ЕСД знайшли своє відображення у запропонованому технологічному ланцюжку спеціалізованої автоматизованої системи документообігу (таблиця 3 та рисунок 8).

- 1) Однозначну ідентифікацію документу забезпечено процесом присвоєння кожному з документів унікального значення ID. ID – поле строкового типу, що складається з 12 символів та може містити цифри та літери латинського алфавіту.
- 2) Скорочення часу руху документів і підвищення оперативності їх виконання забезпечено автоматизованим процесом генерації протоколів та витягів з протоколів.
- 3) Безперервність руху документа забезпечено автоматизованим процесом надсилання документів до департаментів для подальшої їх обробки та генерації підписів.
- 4) Унеможливлення дублювання документів забезпечено алгоритмом хешування, що генерує унікальну строку, що містить набір символів, які відповідають документу тільки з таким самим вмістом як і хешований оригінал.
- 5) Система звітності забезпечена автоматизованим процесом генерації підпису секретарів та завідувачів засідань. Підпис імплементований на базі алгоритму асинхронного шифрування RSA. Кожен користувач має власну унікальний приватний ключ, що формується на базі ID користувача та секретної строки, яка зберігається на сервері.

Процес створення підпису документу використовується для надання автентичності документу та забезпечення його цілісності. Використовуючи згадані підписи згодом автор може надати підтвердження того, що документ був підписаний відповідними особами.

Виходячи з даних наведених в таблиці 3 можна зробити висновок, що запропонована САСД відповідає основним принципам ЕСД на 8% краще за найближчий аналог.



Таблиця 3 – Відповідність розробки основним принципам ЕСД

	Дія	PandaDoc	GoogleDocs	САСД
Однозначна ідентифікація документу	8	9	9	9
Скорочення часу руху документів	10	7	8	9
Безперервність руху документа	10	7	9	10
Унеможливлення дублювання документів	9	8	8	10
Система звітності	7	7	8	10

Авторська розробка

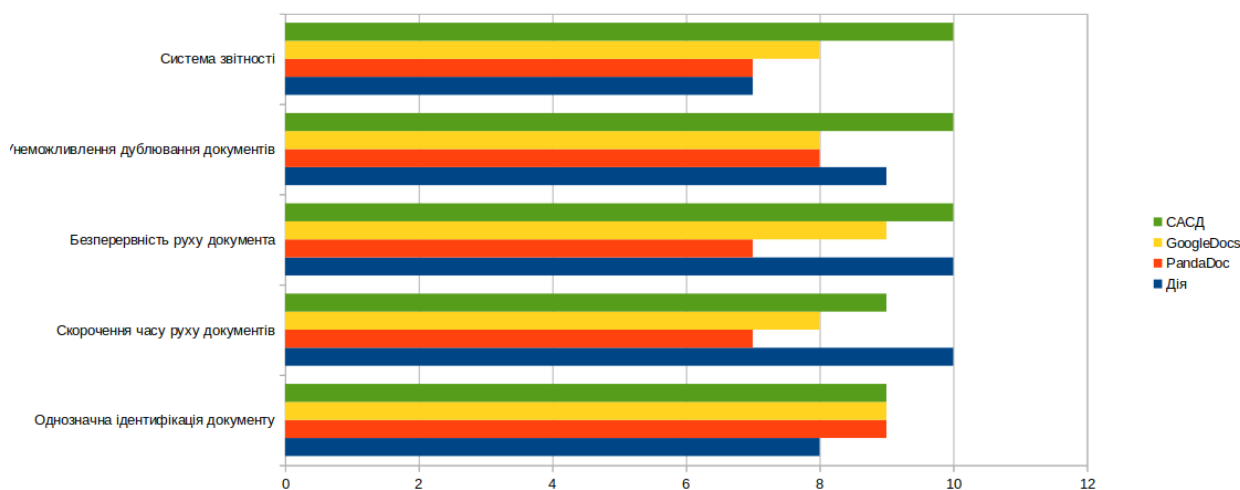


Рисунок 8– Візуалізація відповідності САСД основним принципам ЕСД

Авторська розробка

Такий ефект досягнуто за рахунок запобігання дублюванню документів. Механізм перевірки унікальності документів імплементований задля уникнення повторного розгляду однаких документів засіданнями з метою економії часу. Перевірка документів на предмет дублювання відбувається шляхом хешування вмісту кожного з них алгоритмом SHA256. Результатом хешування файлу є унікальна строка, що містить набір, які відповідають документу тільки з таким самим вмістом як і хешований оригінал. Стрічка хешу зберігається системою в



базі і є прив'язаною до документа, що використовувався для хешування.

4.2.4 Аналітичний опис процедур асемблювання та реасемблювання

Опишемо структуру протоколу засідання кафедри (тобто структурного підрозділу першого рівня $СП^I$) як множину Pr^I складових цього документа (1):

$$Pr^I = \{N^I, SP^I, D^I, Pres^I, Agenda^I, Sign^I\} \quad (1)$$

де

N^I – ім'я документа, тут це «протокол засідання кафедри»;

SP^I – назва структурного підрозділу першого рівня $СП^I$;

D^I – дата засідання $СП^I$;

$Pres^I$ – список присутніх $СП^I$;

$Agenda^I$ – порядок денний $СП^I$;

$Sign^I$ – підписанти $СП^I$.

Опишемо список присутніх структурного підрозділу першого рівня $СП^I$ множиною $Pres^I$, що міститиме ПІБ працівників (2). Тут E_1^I, E_2^I – ПІБ головуєчого та секретаря відповідно.

$$Pres^I = \{E_1^I, E_2^I, E_3^I, \dots E_N^I\} \quad (2)$$

Для кожного працівника передбачено вказання його регалій R , як матрицю впорядкованих складових, що міститиме значення ПІБ E_N^I , посаду Pos_P^I та науковий ступінь Sc_S^I (3).

$$R^I = \begin{pmatrix} E_1^I & Pos_1^I & Sc_1^I \\ \dots & \dots & \dots \\ E_N^I & Pos_P^I & Sc_S^I \end{pmatrix} \quad (3)$$

Опишемо порядок денний $Agenda^I$ як матрицю впорядкованих складових, що міститиме значення заслуханих питань «слухали» Q_M^I та значення відповідних ухвал «ухвалили» D_M^I (4).



$$Agenda^I = \begin{pmatrix} Q_1^I & D_1^I \\ \dots & \dots \\ Q_M^I & D_M^I \end{pmatrix} \quad (4)$$

Опишемо множину підписантів структурного підрозділу першого рівня $СП^I$, як $Sign^I$, що міститиме значення цифрових підписів (5).

$$Sign^I = \{DS_1^I, DS_2^I\} \quad (5)$$

За ідеєю декомпозиції документу відбувається процедура реасемблювання протоколу $СП^I$, і тоді за процедурою асемблювання у витяг з протоколу $СП^I Pr_{EX}^I$ надійдуть елементи Pr^I , що допоможуть САСД сформувати витяг: $SP^I, D^I, Q_m^I, D_m^I, DS_1^I, DS_2^I, E_1^I, Pos_1^I, Sc_1^I, E_2^I, Pos_2^I, Sc_2^I$. Опишемо структуру витягу протоколу засідання $СП^I$ як множину Ex^I складових цього документу (6):

$$Ex^I = \{Ex_{name}^I, SP^I, D^I, Q_m^I, D_m^I, \langle E_1^I, D_1^I \rangle, \langle E_2^I, D_2^I \rangle\} \quad (6)$$

де

Ex_{name}^I – ім'я документу, тут це «витяг з протоколу засідання кафедри»;

SP^I – назва структурного підрозділу першого рівня $СП^I$;

D^I – дата засідання;

Q_m^I, D_m^I – значення заслуханого питання, що винесене у витяг і його відповідна ухвала;

$\langle E_1^I, D_1^I \rangle$ та $\langle E_2^I, D_2^I \rangle$ – кортежі, що містять ППБ, регалії та цифрові підписи головуючого та секретаря $СП^I$.

Тепер опишемо структуру протоколу засідання Вченої ради інституту ($ВРІ$, структурного підрозділу другого рівня $СП^{II}$) як множину Pr^{II} складових цього документу (7):

$$Pr^{II} = \{N^{II}, SP^{II}, D^{II}, Pres^{II}, Agenda^{II}, Sign^{II}\} \quad (7)$$

де

N^{II} – ім'я документу, тут це «протокол засідання ВРІ»;

SP^{II} – назва структурного підрозділу другого рівня $СП^{II}$;

D^{II} – дата засідання $СП^{II}$;

$Pres^{II}$ – список присутніх $СП^{II}$;

$Agenda^{II}$ – порядок денний $СП^{II}$;



$Sign^I$ – підписанти $СП^I$.

За аналогією з (2) та (3), список присутніх $Pres^I$ засідання ВРІ та регалії учасників опишемо (8):

$$Pres^I = \{E_1^I, E_2^I, E_3^I, \dots, E_T^I\} \text{ та } R^I = \begin{pmatrix} E_1^I & Pos_1^I & Sc_1^I \\ \dots & \dots & \dots \\ E_U^I & Pos_V^I & Sc_W^I \end{pmatrix} \quad (8)$$

Порядок денний тут (за процедурою асемблювання) може формуватися із питань, розглянутих на засіданнях довільної кількості різних $СП^I$ і доповнюватися питаннями, введених секретарем засідання ВРІ вручну, тоді маємо (9):

$$Agenda^I = \begin{pmatrix} Q_1^I & D_1^I \\ \dots & \dots \\ Q_A^I & D_A^I \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} Q_1^I & D_1^I \\ \dots & \dots \\ Q_B^I & D_B^I \end{pmatrix} \quad (9)$$

За аналогією з (5) опишемо множину підписантів $СП^I$, як $Sign^I$, що міститиме значення цифрових підписів головуєчого та секретаря ВРІ відповідно (10).

$$Sign^I = \{DS_1^I, DS_2^I\} \quad (10)$$

За ідеєю декомпозиції документу відбувається процедура реасемблювання протоколу $СП^I$, і тоді за процедурою асемблювання у витяг з протоколу $СП^I$ Pr_{EX}^I надійдуть такі елементи Pr^I , що допоможуть запропонованій тут САСД сформувати витяг з протоколу засідання ВРІ: $SP^I, D^I, Q_a^I, D_a^I, Q_b^I, D_b^I, DS_1^I, DS_2^I, E_1^I, Pos_1^I, Sc_1^I, E_2^I, Pos_2^I, Sc_2^I$. Опишемо структуру витягу протоколу засідання $СП^I$ як множину Ex^I складових цього документу (11):

$$Ex^I = \{Ex_{name}^I, SP^I, D^I, Q_x^I, D_x^I, \langle E_1^I, D_1^I \rangle, \langle E_2^I, D_2^I \rangle\} \quad (11)$$

де

Ex_{name}^I – ім'я документу, тут це «витяг з протоколу засідання ВРІ»;

SP^I – назва структурного підрозділу другого рівня $СП^I$;

D^I – дата засідання;

Q_x^I, D_x^I – значення заслуханого питання, що винесене у витяг ВРІ і його



відповідна ухвала;

$\langle E_1^{II}, D_1^{II} \rangle$ та $\langle E_2^{II}, D_2^{II} \rangle$ – кортежі, що містять ПІБ, регалії та цифрові підписи головуючого та секретаря $СП^{II}$ відповідно.

Тоді структуру протоколу засідання Вченої ради Університету (ВРУ, структурного підрозділу другого рівня $СП^{III}$) можна описати як множину Pr^{III} складових цього документу (12):

$$Pr^{III} = \{N^{III}, SP^{III}, D^{III}, Pres^{III}, Agenda^{III}, Sign^{III}\} \quad (12)$$

де

N^{III} – ім'я документу, тут це «протокол засідання ВРУ»;

SP^{III} – назва структурного підрозділу другого рівня $СП^{III}$;

D^{III} – дата засідання $СП^{III}$;

$Pres^{III}$ – список присутніх $СП^{III}$;

$Agenda^{III}$ – порядок денний $СП^{III}$;

$Sign^{III}$ – підписанти $СП^{III}$.

Тоді витяг з протоколу засідання ВРУ можна описати як (13)

$$Ex^{III} = \{Ex_{name}^{III}, SP^{III}, D^{III}, Q_y^{III}, D_y^{III}, \langle E_1^{III}, D_1^{III} \rangle, \langle E_2^{III}, D_2^{III} \rangle\} \quad (13)$$

де

Ex_{name}^{III} – ім'я документу, тут це «витяг з протоколу засідання ВРУ»;

SP^{III} – назва структурного підрозділу 3-го рівня (університету) $СП^{III}$;

D^{III} – дата засідання ВРУ;

Q_y^{III}, D_y^{III} – значення заслуханого питання, що винесене у витяг ВРУ і його

відповідна ухвала;

$\langle E_1^{III}, D_1^{III} \rangle$ та $\langle E_2^{III}, D_2^{III} \rangle$ – кортежі, що містять ПІБ, регалії та цифрові підписи ректора та секретаря ВРУ відповідно.

Таким чином, у другій частині роботи розроблено технологічний ланцюжок спеціалізованої автоматизованої системи документообігу, який на відміну від конкурентів містить покращений алгоритм запобігання дублікації документів, покращену систему звітності побудовану на базі електронно-цифрових підписів.

Також розглянуто процеси асемблювання та реасемблювання, зокрема дано



визначення цим процесам, візуалізовано їх та описано.

Проведено дослідження щодо відповідності розробки, викладеній в даній роботі, основним принципам електронної системи документообігу, які відображені у першій частині і виявлено, що запропонована САСД відповідає основним принципам ЕСД на 8% краще за найближчий аналог. Також розроблено аналітичний опис технологічного ланцюжка САСД.

Висновки

Представлена робота використовувала системний підхід до вирішення задачі асемблювання та реасемблювання документів у спеціалізованій системі документообігу. Зокрема, основна увагу приділена аналізу та вдосконалення методів обробки документів, зокрема методів збереження цілісності та автентичності документів та їх автоматизованої генерації. У даній роботі досягнуто підвищення рівня ефективності обробки документів в межах електронної системи документообігу на 8% за рахунок автоматизації процесів асемблювання та реасемблювання документів, покращеного підходу до збереження цілісності та автентичності документів.

Зокрема, в роботі виконані такі завдання: проведено огляд сучасних електронних систем документообігу, проаналізовано їх переваги та недоліки; розроблено технологічний ланцюжок спеціалізованої автоматизованої системи документообігу; побудовано аналітичний опис технологічного ланцюжка САСД; перевірено розробку на предмет відповідності основним принципам ЕСД.



KAPITEL 5 / CHAPTER 5 ⁵

EXACT EQUATIONS OF MOTION OF TURBULENT LIQUID FLOW

DOI: 10.30890/2709-2313.2024-26-00-014

Introduction

Turbulent and laminar flows have a great influence on natural processes, as well as on energy and transport. To effectively use the capabilities of these processes, it is necessary to have the most accurate mathematical description of the movement of continuous media. This description is based on the law of conservation of momentum and uses partial differential equations. The most common flow regime is turbulent, which is characterized by the presence of three types of motion - translational, rotational and oscillatory. Currently, mathematical models are used, implemented in the form of a combination of exact and semi-empirical equations that do not take into account rotational motion [1–4]. In this paper, problems are considered within the framework of an averaged turbulence model, which takes into account the influence of translational and rotational motion [1, 2, 4].

The laws of motion of working bodies as a continuous medium are studied in fluid mechanics, the mathematical basis of which is the equations of motion in stresses (Navier).

In the classical literature, there are two exact three-dimensional special cases of these equations: the equation of motion for a rigid body (elasticity theory) and the Navier-Stokes equation for a liquid. The theory of elasticity has proven the high quality of calculations and has a clear structure of equations [5, 6]. In fluid mechanics there is no similar structure for all flow regimes, which led to a large share of experimentation and, accordingly, to a high labor intensity of research.

Writing accurate equations requires accepting the point of view that the general equation of motion must describe the most general (turbulent) flow regime.

The implementation of this point of view became possible by applying the operation of extracting the rotor of velocity from the gradient of velocity and from the Laplace operator from velocity to the Navier and Navier-Stokes equations. In this case,

⁵*Authors: Budarin Vitalii*



the second form of the equation was used for the total acceleration of a liquid particle in the Gromeka-Lamb form, which includes the angular velocity of rotation of the particles [4].

The equations are derived for continuous media in which shear stresses are described by the velocity gradient function - two models of a Newtonian fluid and one model of a non-Newtonian fluid with a power rheological law.

Thus, the main task of the derivation was to find the term characterizing the influence of the viscous friction force on the turbulent flow regime.

In any version of the derivation, the initial equation is the motion of a continuous medium in stresses.

$$\begin{aligned} X + \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial p_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \right) &= \frac{du_x}{dt} \\ Y + \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial p_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} \right) &= \frac{du_y}{dt} \\ Z + \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial p_{zz}}{\partial z} \right) &= \frac{du_z}{dt}, \end{aligned} \quad (1)$$

where p_{xx}, p_{yy}, p_{zz} are normal stresses, $\tau_{yx}, \tau_{zx}, \tau_{yz}$ are shear stresses,

X, Y, Z - specific mass force, u_x, u_y, u_z - velocity projections, t - time.

The search for general integrals and partial solutions was carried out for two problems: flow around a horizontal plate and flow in a straight circular pipe in turbulent and laminar flow regimes. Particular solutions were compared with known analytical and semi-empirical equations.

The differential equations in this work were obtained for an incompressible fluid; the influence of pulsations of all thermodynamic quantities was not taken into account.

5.1. Non-Newtonian fluid

Let us apply system (1) to derive the equation of motion of one group of Non-Newtonian liquids (Ostwald de Waele model), which has a power-law rheological



equation $\tau = k \cdot \varepsilon''$, (where $\varepsilon = \text{grad } u$, $k = \text{const}$, $n = \text{const}$) [7, 8].

Transformation conditions:

1. Normal stress P_{ii} and pressure P_i have opposite directions.

$P_{xx} = -P_x$, $P_{yy} = -P_y$, $P_{zz} = -P_z$ (where are P_x, P_y, P_z – the pressure projections).

2. Let's accept meaning constants $k = \mu$, (where μ is the dynamic viscosity of the liquid).

3. Let us express the total acceleration of a liquid particle using Gromek -Lamb equation.

This form is equivalent to the standard formula, but allows one to establish the influence of linear and angular velocity on the total acceleration of a fluid particle (du/dt).

In vector form, this equation looks like:

$$\frac{du}{dt} = \frac{\partial u}{\partial t} + \text{grad} \left(\frac{u^2}{2} \right) + 2 \cdot [\vec{\omega} \times \vec{u}]. \quad (2)$$

In projections on the coordinate axes:

$$\begin{aligned} \frac{du_x}{dt} &= \frac{\partial u_x}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{u^2}{2} \right) + 2 \cdot (u_z \omega_y - u_y \omega_z) \\ \frac{du_y}{dt} &= \frac{\partial u_y}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{u^2}{2} \right) + 2 \cdot (u_x \omega_z - u_z \omega_x) \\ \frac{du_z}{dt} &= \frac{\partial u_z}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{u^2}{2} \right) + 2 \cdot (u_y \omega_x - u_x \omega_y). \end{aligned}$$

The convective part of the total acceleration in (2) also follows from the formula vector analysis $(\vec{u} \cdot \nabla) \vec{u} = \text{grad} (u^2 / 2) + \text{rot } \vec{u} \times \vec{u}$

4. Let us transform the terms characterizing viscous friction using the X axis as an example (1).

Let's add zero to the derivatives inside the brackets, presenting it in the form of two specially selected terms with opposite signs.

Then we get:



$$X - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p_x}{\partial x} + \nu \left[\frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial u_y}{\partial x} + \frac{\partial u_x}{\partial y} - \frac{\partial u_x}{\partial y} + \frac{\partial u_x}{\partial y} \right)^n + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial u_x}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial x} - \frac{\partial u_z}{\partial x} + \frac{\partial u_z}{\partial x} \right)^n \right] =$$

$$= \frac{\partial u_x}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{u^2}{2} \right) + 2(u_z \omega_y - u_y \omega_z).$$

Or

$$X - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p_x}{\partial x} + 2^n \cdot \nu \cdot \left[\frac{\partial}{\partial y} \left(\omega_z + \frac{\partial u_x}{\partial y} \right)^n + \frac{\partial}{\partial z} \left(\omega_y + \frac{\partial u_x}{\partial x} \right)^n \right] - \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{u^2}{2} \right) = \frac{\partial u_x}{\partial t} + 2(u_z \omega_y - u_y \omega_z).$$

Where - for tangential stresses [1, 2, 4]:

- for the speed rotor:

$$\tau_{yx} = \mu \left(\frac{\partial u_y}{\partial x} + \frac{\partial u_x}{\partial y} \right),$$

$$2\omega_y = (\text{rot } u)_y = \frac{\partial u_x}{\partial z} - \frac{\partial u_z}{\partial x},$$

$$\tau_{zx} = \mu \left(\frac{\partial u_x}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial x} \right),$$

$$2\omega_z = (\text{rot } u)_z = \frac{\partial u_y}{\partial x} - \frac{\partial u_x}{\partial y}$$

$$\tau_{yz} = \mu \left(\frac{\partial u_z}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial z} \right)$$

$$2\omega_x = (\text{rot } u)_x = \frac{\partial u_z}{\partial y} - \frac{\partial u_y}{\partial z}$$

After similar transformations for other coordinate axes we get :

$$G - \frac{1}{\rho} \text{div} p + 2^n \cdot \nu \cdot f(u, \omega, n) - \text{grad} \left(\frac{u^2}{2} \right) = \frac{\partial u}{\partial t} + 2[\omega \times u], \quad (3)$$

where the projections of the friction function $f(u, \omega, n)$ have the form:

$$f_x(u, \omega, n) = \frac{\partial}{\partial y} \left(\omega_z + \frac{\partial u_x}{\partial y} \right)^n + \frac{\partial}{\partial z} \left(\omega_y + \frac{\partial u_x}{\partial x} \right)^n$$

$$f_y(u, \omega, n) = \frac{\partial}{\partial z} \left(\omega_x + \frac{\partial u_y}{\partial z} \right)^n + \frac{\partial}{\partial x} \left(\omega_z + \frac{\partial u_y}{\partial y} \right)^n \quad (4)$$

$$f_z(u, \omega, n) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\omega_y + \frac{\partial u_z}{\partial x} \right)^n + \frac{\partial}{\partial y} \left(\omega_x + \frac{\partial u_z}{\partial z} \right)^n$$

Accounting influence linear (u) and angular speed (ω) rotation particles



indicates that equation (3) describes turbulent regime within the framework of the averaged turbulence model.

5.1.1. Analysis of the equation of motion (3)

Equation (3) has three special cases:

1. $n = 1$.

This special case describes the flow of a Newtonian fluid with a rheological equation $\tau = \mu \cdot \text{grad } u$ and has the form:

$$G - \frac{1}{\rho} \text{div} p + 2 \cdot v \cdot f(u, \omega) - \text{grad} \left(\frac{u^2}{2} \right) = \frac{\partial u}{\partial t} + 2[\omega \times u]. \quad (5)$$

This equation was obtained in a different way in [9].

Equation (5) breaks down into two special cases:

- for laminar flow regime ($\omega = 0$).

$$G - \frac{1}{\rho} \text{div} p + 2 \cdot v \cdot f(u) - \text{grad} \left(\frac{u^2}{2} \right) = \frac{\partial u}{\partial t}. \quad (6)$$

- for the vortex flow regime ($u = 0$).

$$G - \frac{1}{\rho} \text{div} p + 2 \cdot v \cdot f(\omega) = \frac{\partial(\omega \cdot r)}{\partial t}.$$

2. $\omega = 0$.

After eliminating the angular velocity ω from (3), we obtain:

$$G - \frac{1}{\rho} \text{div} p + 2^n \cdot v \cdot f(u, n) - \text{grad} \left(\frac{u^2}{2} \right) = \frac{\partial u}{\partial t}.$$

By definition (6) describes the laminar flow regime of a Non-Newtonian fluid.

3. $u = 0$.

After eliminating the linear velocity u from (3), we obtain:

$$G - \frac{1}{\rho} \text{div} p + 2^n \cdot v \cdot f(\omega, n) = \frac{\partial(\omega \cdot r)}{\partial t}.$$

This equation describes the vortex flow regime with a fixed axis of rotation.

In Fig. 1 shows the place of these equations among other equations of motion of a continuous medium.

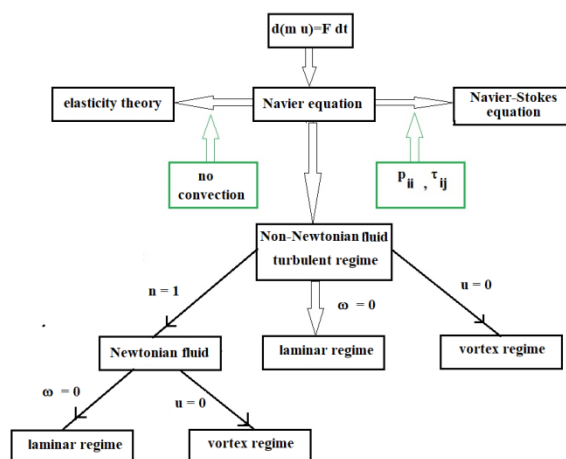


Fig. 1. Connections between various equations of motion of a continuous medium.

In the fig. 1 shows two versions of the Newtonian fluid, which differ in the system of assumptions. When deriving the Navier-Stokes equation, restrictions are imposed on the tangential (τ_{ij}) and normal stresses (For example $p_{xx} = -p + 2 \cdot \mu \cdot du_x/dx$) [4]. Equation (5) describes flows in which the same Newton's rheological law is used, but normal stresses (pressure) can change arbitrarily.

The equation of motion (3) breaks down into two special cases when angular or linear velocity is excluded. This indicates the existence of a third flow regime, the dynamics of which depends on the particle rotation speed ω .

5.2. Newtonian fluid

5.2.1. Turbulent flow regime

Let us find the simplest special cases of equations (1, 5).

We will use two methods for finding the integrals for the velocity distribution on the plate and in the round pipe $u_x(y)$ and $u_z(r)$ [10].

1. Let's find a special case (1) for a one-dimensional flow, and then use Newton's rheological law.

2. Let's use (5), which in coordinate form has the form:



$$\begin{aligned}
 X - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p_x}{\partial x} + 2\nu \left[\frac{\partial^2 u_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u_z}{\partial x \partial z} + \frac{\partial \omega_z}{\partial y} + \frac{\partial \omega_y}{\partial z} \right] &= \frac{du_x}{dt}, \\
 Y - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p_y}{\partial y} + 2\nu \left[\frac{\partial^2 u_y}{\partial z^2} + \frac{\partial u_x}{\partial x \partial y} + \frac{\partial \omega_x}{\partial z} + \frac{\partial \omega_z}{\partial x} \right] &= \frac{du_y}{dt}, \\
 Z - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p_z}{\partial z} + 2\nu \left[\frac{\partial^2 u_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_y}{\partial y \partial z} + \frac{\partial \omega_y}{\partial x} + \frac{\partial \omega_x}{\partial y} \right] &= \frac{du_z}{dt}.
 \end{aligned} \tag{7}$$

Let us find a one-dimensional special case (7) and integrate it.

Flow on a horizontal plate

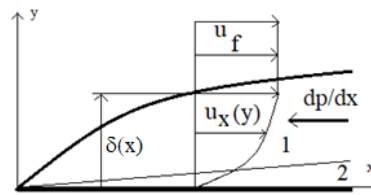


Fig. 2. Calculated flow diagram on a plate (1 – turbulent boundary layer, 2 – laminar sublayer).

Let us apply the Navier equation (1) to find the distribution of shear stress in the boundary layer (Fig. 2). For the x coordinate we have:

$$X - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p_x}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \right) = \frac{du_x}{dt}.$$

After simplification for one-dimensional and steady flow we obtain:

$$\frac{dp_x}{dx} = \frac{d\tau_{yx}}{dy}.$$

After integration with $dp_x/dx = \text{const}$ we find

$$\tau_x(y) = \frac{dp_x}{dx} y + c_1. \tag{8}$$

We find the velocity distribution normal to the surface of the plate using Newton's equation for viscous friction:



$$\tau_x(y) = \frac{dp_x}{dx} y + c_1 = \mu \frac{du_x}{dy}$$

after integration

$$u_x(y) = \frac{1}{2\mu} \frac{dp_x}{dx} y^2 + c_1 y + c_2. \quad (9)$$

Let us use the second method of finding the velocity distribution using (7) and taking into account the rotation of particles. Because speed u_x is changing only along the y axis:

$$2\mu \left(\frac{\partial \omega_z}{\partial y} + \frac{\partial^2 u_x}{\partial y^2} \right) = \frac{\partial p_x}{\partial x}.$$

By calculating the function ω_z you can get:

$$\frac{\partial^2 u_x}{\partial y^2} = \frac{1}{\mu} \frac{\partial p_x}{\partial x}. \quad (10)$$

Integrating (10) with $(1/\mu) \cdot dp_x/dx = \text{const}$ we find the general integral, which coincides with (9).

Flow in a round pipe

Let us use the general equation of motion of a continuous medium in stresses in coordinates (r, θ, z) . For the z coordinate, the general equation has the form [2, 4]:

$$Z - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p_z}{\partial z} + \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \tau_{zr}}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \tau_{\theta r}}{\partial \theta} + \frac{\tau_{zr}}{r} \right) = \frac{du_z}{dt}, \quad (11)$$

where $p_z = -p_{zz}$ – pressure along the z axis, which, according to the sign rule, is opposite to the normal stress p_{zz} .

Let us simplify (11), assuming that there are no mass forces and rotation around the pipe axis.

Then we get:

$$\frac{\partial \tau_{zr}}{\partial r} + \frac{\tau_{zr}}{r} = \frac{\partial p_z}{\partial z}.$$

With a constant pipe diameter $dp_z/dz = \text{const}$, the solution has the form:



$$\tau_{zr} = \frac{c_1}{r} + \frac{dp_z/dz \cdot r}{2}.$$

Because

$$\tau_{zr} = \mu \frac{du_z}{dr} = \frac{1}{2} \frac{dp_z}{dz} r + \frac{c_1}{r},$$

then after integration we get:

$$u_z(r) = \frac{1}{4\mu} \frac{dp_z}{dz} r^2 + c_1 \ln r + c_2. \quad (12)$$

Let us use the second solution method, for which (7) in a cylindrical coordinate system for the z axis takes the form:

$$Z - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p_z}{\partial z} + 2\nu \left(\frac{\partial}{\partial r} \left[\omega_\theta + \frac{\partial u_z}{\partial r} \right] + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} \left[\omega_r + \frac{\partial u_\theta}{\partial z} \right] + \frac{1}{r} \left[(\omega_\theta + \frac{\partial u_z}{\partial r}) \right] \right) = \frac{du_z}{dt}.$$

For this problem, the flow velocity changes only along the radius and the derivative along the z axis can be neglected. We will also assume that the speed does not change depending on the angle θ (the flow does not rotate around the pipe axis).

Then, calculating ω_r and making reductions, we find:

$$\frac{\partial^2 u_z}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u_z}{\partial r} = \frac{1}{\mu} \frac{\partial p_z}{\partial z}. \quad (13)$$

After integrating (13) with $(1/\mu) \cdot dp_z/dz = \text{const}$ we again obtain (12).

Thus, the general integral for the velocity distribution in a turbulent regime is equation (12).

In Fig. 3 shows a diagram for obtaining general integrals for finding tangential stresses and velocity distribution for a turbulent flow regime.

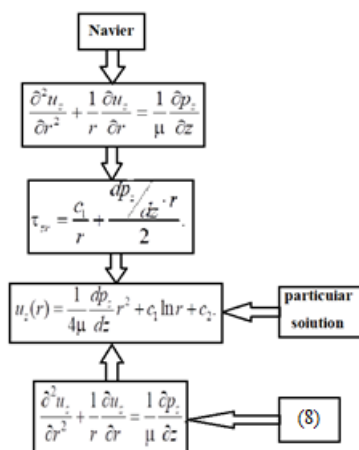


Fig. 3. Two ways to find the general integral for turbulent flow in a round pipe.

Table 1 - General integrals for turbulent flow

Mode	Pipe flow	Flow on the plate
Turbulent	$u_z(r) = \frac{1}{4\mu} \frac{dp_z}{dz} r^2 + c_1 \ln r + c_2$	$u_x(y) = \frac{1}{2\mu} \frac{dp_x}{dx} y^2 + c_1 y + c_2$

Private solutions

1. We will find a particular solution for the velocity distribution in the pipe from the general solution (12) using the variable y (Fig. 4).

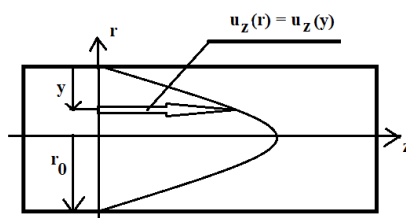


Fig. 4. Calculation scheme for searching for a particular solution ($y = r_0 - r$).

Let us apply to these equations the boundary conditions characteristic of the pipe axis:

for $y = r_0$, $\tau = 0$ and $u_z(y) = u_{\max}$.

Then we get:

$$u_z(y) = \frac{1}{4\mu} \frac{dp_z}{dz} \left(y^2 - r_0^2 + 2r_0^2 \ln \frac{r_0}{y} \right) + u_{\max}. \quad (14)$$

This solution is not applicable to calculating the velocity on the wall ($y = 0$),



since near the wall there is a laminar sublayer that separates the core of the turbulent flow from the wall.

In Fig. 5 shows a comparison of the velocity distribution constructed according to (14) and the semi-empirical equation $u_z(y) = u_{max} (y/r_0)^{0.16}$ [4].

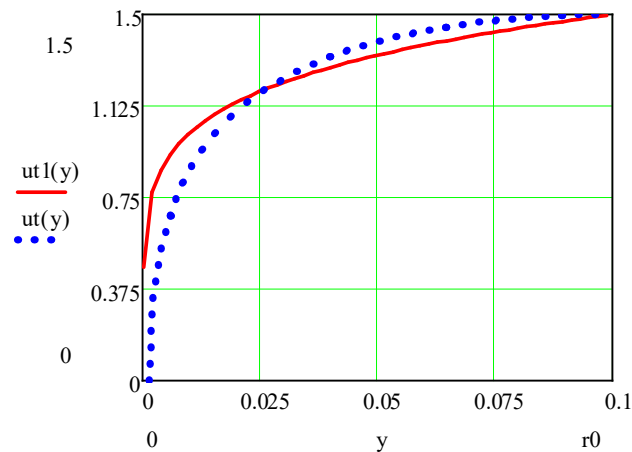


Fig. 5. Comparison of the theoretical velocity distribution in a pipe for a turbulent flow regime - solid , for a power-law semi-empirical equation - dots.

2. Let us consider a particular solution for turbulent flow on a plate. Let us set the conditions on the outer boundary of the boundary layer and apply them to the integral of Table 1.

When $y = \delta(x)$, $\tau_x(y) = 0$, and $u_x(y) = u_f$.

Then we get:

$$u_x(y) = \frac{1}{2\mu} \frac{dp_x}{dx} [y^2 + \delta(x)^2 - 2y \cdot \delta(x)] + u_f. \quad (15)$$

In Fig. 6 shows a comparison of the velocity distribution found from (16) and from the well-known semi-empirical equation $ue(y) = u_x(y) = u_f [y/\delta(x)]^{1/7}$ [4].

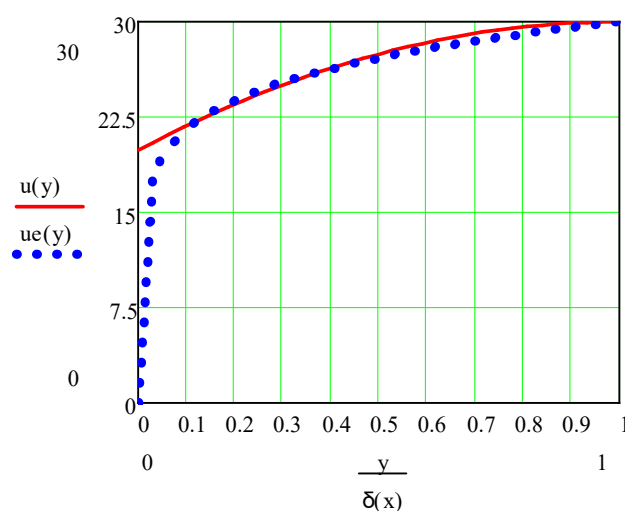


Fig. 6. Comparison of the theoretical velocity distribution for turbulent flow on a plate (15) – solid line and semi-empirical – points / $Re_x = 2 \cdot 10^5$, $dp_x/dx = -35$ Pa/m, air

As follows from a comparison of the curves, in the range $y/\delta(x) = 0 \dots 0.1$ there is a sharp discrepancy between the theoretical and semi-empirical dependence.

This is due to the presence of a laminar sublayer in which there is no rotation of particles and the velocity distribution in this range $y/\delta(x)$ must be calculated using a different equation.

In table 2 shows particular solutions that were obtained as a result of applying boundary conditions to the previously found general integrals.

Table 2 - Particular solutions for turbulent flow

Mode	Pipe flow	Flow on the plate
Turbulent	$u_z(y) = \frac{1}{4\mu} \frac{dp_z}{dz} \left(y^2 - r_0^2 + 2r_0^2 \ln \frac{r_0}{y} \right) + u_{\max}$	$u_x(y) = \frac{1}{2\mu} \frac{dp_x}{dx} \left[y^2 + \delta(x)^2 - 2y \cdot \delta(x) \right] + u_f$

Note: $\delta(x)$ is the thickness of the boundary layer.

5.2.2. Laminar flow regime.

Let's consider the flow on a horizontal plate and in a round pipe, find general integrals and particular solutions.



Flow on a horizontal plate

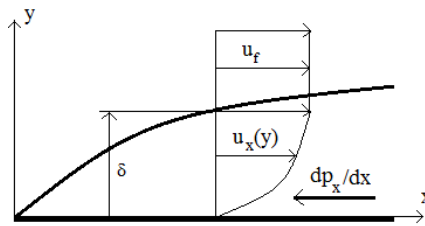


Fig. 7. Scheme of laminar flow on a plate.

To find the general integrals, we will use the well-known calculation scheme (Fig. 7) and (6) in coordinate form.

$$\begin{aligned} X - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p_x}{\partial x} + 2\nu \left[\frac{\partial^2 u_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u_x}{\partial x \partial z} \right] &= \frac{du_x}{dt}, \\ Y - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p_y}{\partial y} + 2\nu \left[\frac{\partial^2 u_y}{\partial z^2} + \frac{\partial u_x}{\partial x \partial y} \right] &= \frac{du_y}{dt}, \\ Z - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p_z}{\partial z} + 2\nu \left[\frac{\partial^2 u_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_y}{\partial y \partial z} \right] &= \frac{du_z}{dt}. \end{aligned} \quad (16)$$

Let us find a particular solution by simplifying (16) for a one-dimensional steady flow with its subsequent integration.

Then

$$\frac{d^2 u_x}{dy^2} = \frac{1}{2\mu} \frac{dp_x}{dx}$$

Let us assume that the dynamic viscosity is constant and the pressure drop along

the x axis does not change $\left(\frac{1}{2\mu} \frac{dp_x}{dx} = \text{const} \right)$.

After integration:

$$u_x(y) = \frac{1}{4\mu} \frac{dp_x}{dx} y^2 + c_1 y + c_2.$$

Private solution



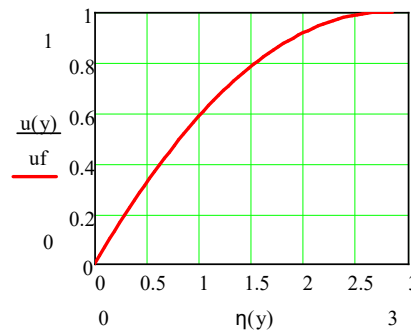
For a laminar flow regime, the boundary layer begins at the wall and the boundary conditions will be as follows: for $y = \delta(x)$, $u_x(y) = u_f$, and for $y=0$, $u_x(y)=0$. As a result, we obtain for laminar flow:

$$u_x(y) = \frac{1}{4\mu} \frac{dp_x}{dx} [y^2 - y \cdot \delta(x)] + \frac{y}{\delta(x)} u_f \quad (17)$$

Let us compare the solution (17) with the Blasius solution, which is presented in tabular form [4]. When constructing the graph, the dimensionless coordinates

$u_x(y)/u_f = f\left(\eta = \frac{y}{2} \sqrt{\frac{u_f}{\nu \cdot x}}\right)$ adopted in [4] were used. The numerical data correspond to the laminar flow regime at a distance x from the leading edge.

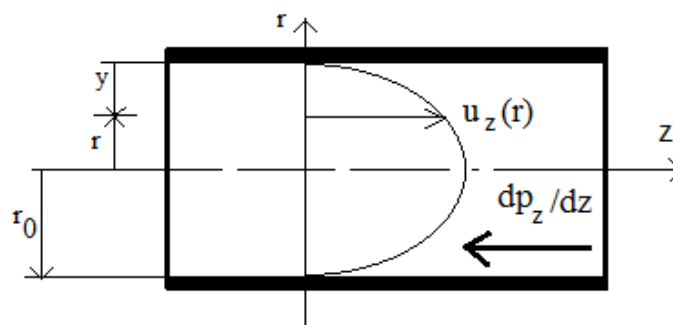
Comparison results of the graph in Fig. 8 and the table data for the Blasius solution show their satisfactory agreement.



Rice. 8. Theoretical velocity distribution over the thickness of the laminar boundary layer on the plate ($Re_x = 5.8 \cdot 10^3$, $dp_x/dx = -3.2 \text{ Pa/m}$, air).

Flow in a round pipe

In Fig. Figure 9 shows a design diagram of a stabilized flow in a round pipe.



Rice. 9. Calculation scheme for laminar flow in a round pipe.



A special case (16) for a one-dimensional flow in coordinates r, z has the form:

$$\frac{\partial^2 u_z}{\partial r^2} = \frac{1}{2\mu} \frac{\partial p_z}{\partial z}. \quad (18)$$

After double integration at $(1/2 \mu) dp_z / dz = \text{const}$ we find:

$$u_z(r) = \frac{1}{4\mu} \frac{dp_z}{dz} \cdot r^2 + c_1 r + c_2. \quad (19)$$

Table 3 - General integrals for laminar flow regime.

Mode	Pipe flow	Flow on the plate
Laminar	$u_z(r) = \frac{1}{4\mu} \frac{dp_z}{dz} \cdot r^2 + c_1 r + c_2$	$u_x(y) = \frac{1}{4\mu} \frac{dp_x}{dx} \cdot y^2 + c_1 y + c_2$

Private solution

Let us find a particular solution for pipe (19) under the following boundary conditions:

If $r=0$, then $du_z/dr=0$, and when $r=r_0$, $u_z=0$. Then we obtain the velocity distribution along the radius, which coincides with the known equation Poiseuille [1, 2, 4].

$$u_z(r) = \frac{1}{4\mu} \frac{\partial p_z}{\partial z} \cdot (r_0^2 - r^2),$$

In Fig.11 shows a diagram for deriving the general equation of motion (5) and obtaining particular solutions for flow in a pipe and on a plate.

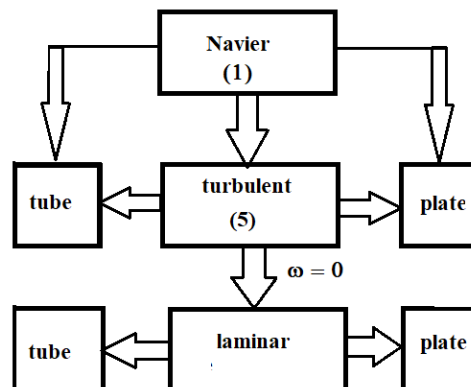


Fig. 11. Scheme for obtaining private solutions



Thus, to find exact solutions for the laminar flow regime, it is necessary to use equation (6).

5.3. Stokes liquid

5.3.1. Analysis of Assumptions

The Stokes equation is derived in two ways: using general theorems of mathematics and using the equation of motion in stresses (1) [2, 4]. Let's consider the analysis of assumptions for the second option for deriving the equation.

Table 5. Constraints for deriving equation (20).

N	Restrictions	Stress
1 .	$p_{xx} = -p + 2\mu \frac{\partial u_x}{\partial x}$	Normal
2 .	$p_{yy} = -p + 2\mu \frac{\partial u_y}{\partial y}$	Normal
3 .	$p_{zz} = -p + 2\mu \frac{\partial u_z}{\partial z}$	Normal
4 .	$\tau = \mu \cdot \text{grad } u$	Tangents
5 .	$\rho = \text{const}$	

From Table 5 it follows that the restrictions in the Stokes equation apply to all components of the surface force. This means that normal and shear stresses must change according to certain rules. (In equation (5), normal stresses can change arbitrarily.)

Let us analyze the Stokes equation for an incompressible fluid:

$$G - \frac{1}{\rho} \text{grad } p + \nu \cdot \nabla^2 u = \frac{du}{dt}, \quad (20)$$

From (20) it follows that the main factor taking into account the dynamics of the flow is the linear velocity, which affects the terms of the force of viscous friction and



inertia.

5.3.2. Second form and special cases

Let us reduce the Stokes equation to a form more convenient for subsequent analysis and combine the terms that take into account viscosity. Let's perform the transformation using the x coordinate as an example.

– From the limit for normal stress (Table 5):

$$p_{xx} = -p + 2\mu \frac{\partial u_x}{\partial x} = -p_x \quad \text{or} \quad p = p_x + 2\mu \frac{\partial u_x}{\partial x},$$

where normal stress $p_{xx} = -p_x$ according to the sign rule.

Then the pressure term will take the form:

$$-\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x} \left(p_x + 2\mu \frac{\partial u_x}{\partial x} \right) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p_x}{\partial x} - 2\nu \frac{\partial^2 u_x}{\partial x^2}. \quad (21)$$

– Let us transform the Laplace operator and select terms that take into account the influence of linear and angular velocity.

$$\text{Then} \quad \nabla^2 u_x = \frac{\partial^2 u_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u_x}{\partial z^2}.$$

Let's express the second and third terms in terms of the first derivative, add a zero in parentheses and present it in the form of two identical terms with different signs.

$$\frac{\partial^2 u_x}{\partial y^2} = \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial u_x}{\partial y} - \frac{\partial u_y}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial x} \right) = \frac{\partial^2 u_y}{\partial x \partial y} - \frac{\partial(\text{rot } u)_z}{\partial y} = \frac{\partial^2 u_y}{\partial x \partial y} - 2 \frac{\partial \omega_z}{\partial y}$$

$$\frac{\partial^2 u_x}{\partial z^2} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial u_x}{\partial z} - \frac{\partial u_z}{\partial x} + \frac{\partial u_z}{\partial x} \right) = \frac{\partial^2 u_z}{\partial x \partial z} + \frac{\partial(\text{rot } u)_y}{\partial z} = \frac{\partial^2 u_z}{\partial x \partial z} + 2 \frac{\partial \omega_y}{\partial z}.$$



From these equations it follows that there is a function $\psi(u, \omega)$, which depends on two arguments and has a component on the x axis in the form:

$$\psi_x(u, \omega) = \frac{\partial^2 u_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_y}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 u_z}{\partial x \partial z} + 2 \left(\frac{\partial \omega_y}{\partial z} - \frac{\partial \omega_z}{\partial y} \right).$$

Taking into account the last equation and (21), we obtain:

$$-\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \cdot \nabla^2 u_x = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p_x}{\partial x} + \nu \left[-\frac{\partial^2 u_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_y}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 u_z}{\partial x \partial z} + 2 \left(\frac{\partial \omega_y}{\partial z} - \frac{\partial \omega_z}{\partial y} \right) \right].$$

Carrying out similar transformations for the y and z axes we get:

$$\begin{aligned} \varphi_x(u, \omega) &= -\frac{\partial^2 u_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_y}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 u_z}{\partial x \partial z} - 2(\text{rot } \omega)_x \\ \varphi_y(u, \omega) &= \frac{\partial^2 u_x}{\partial x \partial y} - \frac{\partial^2 u_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u_z}{\partial y \partial z} - 2(\text{rot } \omega)_y \\ \varphi_z(u, \omega) &= \frac{\partial^2 u_x}{\partial x \partial z} + \frac{\partial^2 u_y}{\partial y \partial z} - \frac{\partial^2 u_z}{\partial z^2} - 2(\text{rot } \omega)_z, \end{aligned} \quad (22)$$

Where - $(\text{rot } \omega)_x = \frac{\partial \omega_z}{\partial y} - \frac{\partial \omega_y}{\partial z}; (\text{rot } \omega)_y = \frac{\partial \omega_x}{\partial z} - \frac{\partial \omega_z}{\partial x}; (\text{rot } \omega)_z = \frac{\partial \omega_y}{\partial x} - \frac{\partial \omega_x}{\partial y}.$

Taking into account (22) and the total derivative in form (2), the Stokes equation can be written:

$$\begin{aligned} X - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p_x}{\partial x} + \nu \cdot \left[-\frac{\partial^2 u_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_y}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 u_z}{\partial x \partial z} - 2(\text{rot } \omega)_x \right] - \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{u^2}{2} \right) &= \frac{\partial u_x}{\partial t} + 2(u_z \omega_y - u_y \omega_z) \\ Y - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p_y}{\partial y} + \nu \cdot \left[\frac{\partial^2 u_x}{\partial x \partial y} - \frac{\partial^2 u_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u_z}{\partial y \partial z} - 2(\text{rot } \omega)_y \right] - \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{u^2}{2} \right) &= \frac{\partial u_y}{\partial t} + 2(u_x \omega_z - u_z \omega_x) \\ Z - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p_z}{\partial z} + \nu \cdot \left[\frac{\partial^2 u_x}{\partial x \partial z} + \frac{\partial^2 u_y}{\partial y \partial z} - \frac{\partial^2 u_z}{\partial z^2} - 2(\text{rot } \omega)_z \right] - \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{u^2}{2} \right) &= \frac{\partial u_z}{\partial t} + 2(u_y \omega_x - u_x \omega_y). \end{aligned} \quad (23)$$

In this form of recording, the terms taking into account viscous friction and inertia have the same influencing factors - (u, ω) . In brief form, system (23) can be written:



$$G - \frac{1}{\rho} \operatorname{div} p + \nu \cdot \varphi(u, \omega) - \operatorname{grad} \left(\frac{u^2}{2} \right) = \frac{\partial u}{\partial t} + 2[\vec{\omega} \times \vec{u}]. \quad (24)$$

From (24) it follows that the Stokes equation describes the turbulent flow regime within the framework of an averaged model.

The derivation of this equation was carried out without the use of additional restrictions. This means that (24) can be considered the second form of writing the Stokes equation (20).

Let's consider some special cases (24).

1. By eliminating viscosity ($\nu = 0$), we obtain a general equation for inviscid flow from which we can obtain the Bernoulli equation for an ideal fluid:

$$G - \frac{1}{\rho} \operatorname{div} p - \operatorname{grad} \left(\frac{u^2}{2} \right) = \frac{\partial u}{\partial t} + 2[\vec{\omega} \times \vec{u}]. \quad (25)$$

2. For a laminar flow regime, the angular velocity $\omega(x, y, z) = 0$ and equation (24) will take the form:

$$\begin{aligned} X - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p_x}{\partial x} + \nu \cdot \left(-\frac{\partial^2 u_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_y}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 u_z}{\partial x \partial z} \right) - \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{u^2}{2} \right) &= \frac{\partial u_x}{\partial t} \\ Y - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p_y}{\partial y} + \nu \cdot \left(\frac{\partial^2 u_x}{\partial x \partial y} - \frac{\partial^2 u_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u_z}{\partial y \partial z} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{u^2}{2} \right) &= \frac{\partial u_y}{\partial t} \\ Z - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p_z}{\partial z} + \nu \cdot \left(\frac{\partial^2 u_x}{\partial x \partial z} + \frac{\partial^2 u_y}{\partial y \partial z} - \frac{\partial^2 u_z}{\partial z^2} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{u^2}{2} \right) &= \frac{\partial u_z}{\partial t}. \end{aligned} \quad (26)$$

In short form, system (26) has the form:

$$G - \frac{1}{\rho} \operatorname{div} p + \nu \cdot \varphi(u) - \operatorname{grad} \left(\frac{u^2}{2} \right) = \frac{\partial u}{\partial t}. \quad (27)$$

3. When $u(x, y, z) = 0$ from (24) we obtain the equation for a standing vortex

$$G - \frac{1}{\rho} \operatorname{div} p - \nu \cdot \varphi(\omega) = \frac{\partial(\omega r)}{\partial t}.$$

Particular problems

Let us find the integrals for the cases of flow on a horizontal plate and in a straight circular pipe.

Flow on a horizontal plate



The goal of solving the problem is to find the velocity distribution normal to the surface.

Finding solutions is done in two ways. The first method uses the Navier equation (1), and the second uses the Stokes equation (20).

Using the first method, the shear stress distribution is found, and then the velocity distribution is found using Newton's law for viscous friction. Using the second method, the velocity distribution is found by integrating the one-dimensional second-order equation of motion. Both methods complement each other and should give the same result.

The first method was implemented earlier (section 2.1) and as a result the integral (9) was obtained.

Let us use the Stokes equation in the form (20), which after simplification takes the form:

$$\frac{d^2 u_x}{dy^2} = \frac{1}{\mu} \frac{dp}{dx}.$$

After double integration, we obtain the equation of motion for turbulent flow (9):

$$u_x(y) = \frac{1}{2\mu} \frac{dp}{dx} y^2 + c_1 y + c_2.$$

In Fig.12 shows a diagram for finding general integrals for the distribution of tangential stress and velocity during flow on a plate.

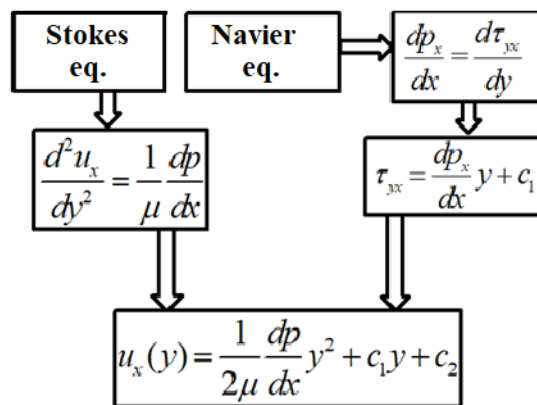


Fig. 12. Scheme for finding integrals for turbulent flow on a plate.



To find the velocity distribution in the laminar sublayer, it is necessary to use equation (27), but there is no term d^2u_x/dy^2 . This means that it is impossible to find the velocity distribution for laminar flow.

Let us find a particular solution to equation (9), excluding the assumption that the flow sticking hypothesis on the wall is fulfilled. Let us use the boundary conditions only on the outer boundary of the boundary layer: for $y = \delta(x)$, $\tau_x(y) = 0$, and $u_x(y = \delta) = u_f$.

Then we get:

$$u_x(y) = \frac{1}{2\mu} \frac{dp_x}{dx} \left[y^2 + \delta(x)^2 - 2y \cdot \delta(x) \right] + u_f. \quad (28)$$

Equation (28) coincides with (15).

Flow in a round pipe

Let us consider the flow in a straight circular pipe and find the general integrals for the distribution of tangential stress and velocity along the radius of the pipe (Fig. 13).

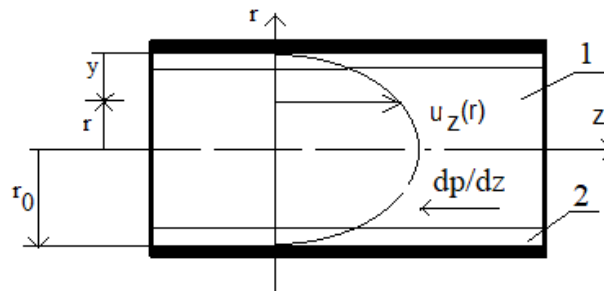


Fig. 13. Calculation scheme of flow in a pipe (1-turbulent core, 2-laminar sublayer)

Let us use the Stokes equation in the form (20) in (r, z) coordinates. Since the flow is steady and one-dimensional, the equation has the form:

$$\frac{d^2u_z}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{du_z}{dr} = \frac{1}{\mu} \frac{dp}{dz}.$$



After double integration we get $\left[(1/\mu)(dp/dz) = \text{const} \right]$:

$$u_z(r) = \frac{1}{4\mu} \frac{dp}{dz} r^2 + c_1 \ln r + c_2. \quad (29)$$

Let's solve the same problem using the Navier equation .

From the equation (1):

$$Z - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p_z}{\partial z} + \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \tau_{zr}}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \tau_{\theta r}}{\partial \theta} + \frac{\tau_{zr}}{r} \right) = \frac{du_z}{dt}, \quad (30)$$

where p_z – pressure along the z axis, which, according to the sign rule, is opposite to the normal stress p_{zz} .

Let us simplify (30), assuming that there are no mass forces and rotation of the flow around the pipe axis.

Then we get:

$$\frac{\partial \tau_{zr}}{\partial r} + \frac{\tau_{zr}}{r} = \frac{\partial p_z}{\partial z}. \quad (31)$$

At a constant pipe diameter ($dp_z/dz = \text{const}$), solution (31) has the form:

$$\tau_{zr} = \frac{c_1}{r} + \frac{dp_z/dz \cdot r}{2}.$$

Let's use Newton's equation $\tau_{zr} = \mu \cdot \frac{du_z}{dr}$:

$$\mu \frac{du_z}{dr} = \frac{1}{2} \frac{dp_z}{dz} r + \frac{c_1}{r}.$$

After integration we obtain equation (29).

In Fig. 14 shows a diagram for finding integral (29) in two ways.

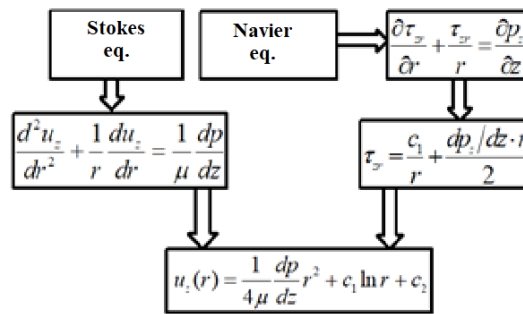


Fig. 14. Scheme for finding the integral for turbulent flow in a pipe.

Private solutions

Let's find the quotient solution equation (29) for the following boundary conditions : at $y = r_0$, $\tau = 0$ and $u_z = u_{\max}$.

Then we get:

$$u_z(y) = \frac{1}{4\mu} \frac{dp_z}{dz} \left(y^2 - r_0^2 + 2r_0^2 \ln \frac{r_0}{y} \right) + u_{\max}. \quad (32)$$

The result coincides with (14).

Thus, particular solutions of the Stokes equation coincide with similar solutions for a Newtonian fluid in a turbulent flow regime.

Laminar flow regime

For the laminar flow regime there are no derivatives $\frac{\partial^2 u_x}{\partial y^2}$ and $\frac{\partial^2 u_z}{\partial r^2}$ and it is not possible to find the speed distribution.

This property can be interpreted as the absence of a laminar flow regime.

Thus, in a Stokes fluid only a turbulent regime is possible and the velocity distribution is described by equation (14, 15) and Fig. 5, 6. A similar nature of the velocity distribution is observed in rarefied gas (Fig. 15 for different Knudsen numbers (Kn)) [11].

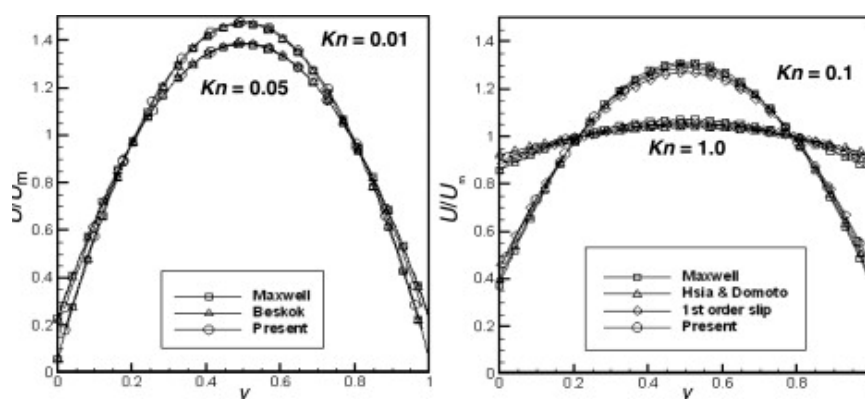


Fig. 15. Velocity distribution in a rarefied gas flow in a channel.

To determine the compliance/inconsistency of equations (14, 15) with this flow property, it is necessary to conduct additional experiments.

In Fig. 16 shows a diagram for transforming the classical version of the Stokes equation for an incompressible fluid and obtaining partial solutions.

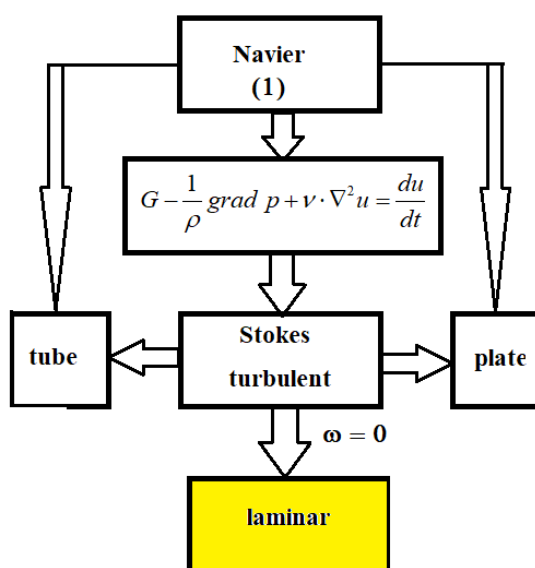


Fig. 16. Scheme for obtaining partial solutions of the Stokes equation

From Fig. 16 it follows that the equations of motion for particular problems can be obtained in two ways.



Conclusion

The three-dimensional equations found use the same system of forces and have the same structure. A comparison of these equations for various models of turbulent flow shows that they differ in only one term - for viscous friction.

The breakdown of these equations according to physically known conditions allows us to assume that there are three flow regimes - turbulent, laminar and vortex. In Fig. 17 shows an example of the third flow regime over the surface of boiling water.



Fig. 17. Vortex tube compressing a cloud of water vapor.

Despite the large amount of information, the properties of the vortex tube have not been sufficiently studied and require research from low to the maximum possible rotation speeds [12, 13].

Further progress in energy is associated with the theoretical and experimental study of the third (vortex) flow mode, which has an increased energy density. The mechanical properties of this flow regime make it possible to reduce the requirements for the thermal properties of the solid wall of the channel, which can lead to an increase in the temperature of the working fluid and will favorably affect the efficiency of the heat engine.

General equations have nine or six unknowns and are not closed. In fluid mechanics there are no exact equations for solving the closure problem, but such equations exist in another area of continuum mechanics - the theory of elasticity. The role of closing equations is played by six second-order Saint-Venant equations, written in the form of deformations. This form of recording does not allow these equations to be used to describe the movement of a fluid, because The dynamics of the flow depends



on the strain rates. The transformation of these equations for a fluid medium was carried out in [14], which made it possible to obtain six third-order equations, which break down into two special cases according to the same physical conditions.

Saint-Venant's equations refer to a different way of describing motion and are derived using the rules of geometry. This allows them to be used for any continuous medium.

Solving the closure problem will allow the use of general equations to improve application programs in the field of fluid dynamics. In addition, the possibility of drawing up an equation of motion for the electrolyte opens up.

The analysis of the possibilities of general equations of motion was carried out using the example of two well-known one-dimensional problems - flow around a horizontal plate (external problem of hydrodynamics) and flow in a straight round pipe (internal problem of hydrodynamics). General integrals and some particular solutions are found.

A comparison of these solutions with known data showed that for a laminar flow regime the velocity distribution coincides with the Blasius solution for a plate and with the Poiseuille equation for flow in a round pipe. The velocity distribution for the turbulent flow regime is in satisfactory agreement with semi-empirical equations, but requires additional experimental verification.

Integrals for the turbulent regime were obtained in two ways:

1. From the equation of motion in stresses (Navier) taking into account Newton's rheological equation.
2. By simplifying three-dimensional equations for various fluid models and integrating special cases. Both paths lead to the same results.

Analysis of the Stokes equation showed that it has a second form of notation, which includes the angular velocity of particle rotation. This form of the equation breaks down into two special cases, similar to other flow models.

The search for partial solutions turned out to be possible only for the turbulent flow regime. For laminar mode, there are no differential equations for the velocity distribution on the plate and in the pipe. This property of the Stokes equation can apply



to flows in which the laminar regime does not exist. This may mean that the sticking hypothesis is not satisfied for solutions of the Stokes equation and the flow velocity on the wall is not zero. This conclusion follows from the analysis of equations (28) and (32).

One of the possible variants of such a flow is the movement of a rarefied gas in the presence of particle sliding [4,11]. Testing this assumption will make it possible to clarify the physical meaning of the Stokes equation and will have a positive impact on progress in many areas of energy.

It is characteristic that special cases of the Navier equation (3, 5, 6) are more complex versions of the Bernoulli equation for an ideal fluid. The same applies to the second form of the Stokes equation (24).



Verweise / References

Chapter 1.

1. Готра З. Ю. Мікроелектронні сенсори фізичних величин. Том 2 / З. Ю. Готра. – Львів : Ліга-Прес, 2003. – 595 с.
2. Ashis Tripathy. Design and Development for Capacitive Humidity Sensor Applications of Lead-Free Ca, Mg, Fe, Ti-Oxides-Based Electro-Ceramics with Improved Sensing Properties via Physisorption / Ashis Tripathy, Sumit Pramanik, Ayan Manna, Satyanarayan Bhuyan, Nabila Farhana Azrin Shah, Zamri Radzi, Noor Azuan Abu Osman // *Sensors*. – 2016. – № 16. – P. 1135; doi: 10.3390/s16071135.
3. Nathan Lazarus. CMOS-MEMS Capacitive Humidity Sensor / Nathan Lazarus, Sarah S. Bedair, Chiung-C. Lo, and Gary K. Fedder // *Journal of microelectromechanical system*. – february 2010. – Vol. 19, – № 1. – P.183 –191; doi: 10.1109/JMEMS.2009.2036584.
4. Осадчук В. С. Сенсори вологості / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, Л. В. Крилик. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2003. – 208 с.
5. Осадчук О. В. Математична модель мікроелектронного автогенераторного засобу для вимірювання вологості / О. В. Осадчук, Л. В. Крилик, О. С. Звягін, Я. О. Осадчук // *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. – 2021. – Т.32(71), № 4. – С. 289 –296.
6. Осадчук В. С. Дослідження ємнісних вологочутливих елементів / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, Л. В. Крилик, М. В. Євсєєва // *Вісник ВПІ*. – 2002. – №5. – С. 65–71.
7. Осадчук В. С. Ємнісний сенсор вологості гребінцевої структури на основі полімерних матеріалів / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, Л. В. Крилик, М. В. Євсєєва // *Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. Міжнародний науково-технічний журнал*. – 2006. – №2(12).– С. 222–227.



8. Шуть О. Теоретико-методологічні аспекти статистичних досліджень / О. Шуть // Збірник наукових праць ДЕТУТ. Серія «Економіка і управління». – 2012. – Вип. 22–21, Ч. 2. – 305–311.
9. Крилик Л. В. Застосування регресійного аналізу в процесі оцінювання впливу фактора на чутливість ємнісного сенсора вологості / Л. В. Крилик, М. В. Євсєєва // Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки. – 2022. – № 4(311). – С. 119–124.
10. Крилик Л. В. Практичне застосування регресійного аналізу для оцінювання впливу факторів на чутливість ємнісного сенсора вологості двошарової структури / Л. В. Крилик // Вісник Хмельницького національного університету. – 2023. – № 3(321). – С. 109 –114.
11. Єріна А. М. Поєднання моделей регресійного і дисперсійного аналізу в соціально-економічних дослідженнях/ А. М. Єріна // Наукові записки НаУКМА. Серія: Економічні науки. – 2000. – Том 18. – С.12–17.
12. Ляшок А. В. Планування багатофакторного експерименту при дослідженні процесу ультразвукового розпилення в тонкому шарі / А. В. Ляшок // Вісник НТУУ «КПІ». Серія машинобудування. – 2013. – №3. – С. 13–17.
13. Павлюк К. В. Методичні підходи до розроблення нормативів і оцінки науково-дослідної праці на основі багатофакторного кореляційно-регресійного аналізу / К. В. Павлюк // Наукові праці НДФІ. – 2020.– № 3(92). – С. 5–19.
14. Аксьончиков С. О. Регресійний аналіз тенденцій розвитку кібератак / С. О. Аксьончиков, І. В. Ємельянова, К. Д. Маркова, І. І. Сватовський // Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія: Мат. моделювання. Інформаційні технології. Автоматизовані системи управління. – 2017. – Вип. 36. – С. 5–13.
15. Кучернюк П. В. Модель загроз безпеки в інформаційно-комунікаційних системах на основі регресійного аналізу / П. В. Кучернюк, А. О. Довгаль // Інформаційні та телекомунікаційні системи та технології, захист інформації.



- 2017. – Вип. 22, №2. – С. 79–84.
16. Самарець Н. М. Використання інформаційних технологій у статистичному аналізі даних для аграрних підприємств / Н. М. Самарець, Є. М. Харченко, Н. О. Чорна // АГРОСВІТ. – 2013. – № 20. – С. 14–20.
17. Крилик Л. В. Застосування багатофакторного дисперсійного аналізу з метою якісного оцінювання впливу факторів на чутливість ємнісного сенсора вологості / Л. В. Крилик // Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки. – 2022. – № 5(313). – С. 122–127.
18. Крилик Л. В. Визначення якісного впливу факторів на чутливість ємнісного сенсора вологості двошарової структури, оснований на багатофакторному дисперсійному аналізі / Л. В. Крилик // Вісник Хмельницького національного університету. – 2023. – № 2(319). – С. 175–180.
19. Левченко Д. В. Вибір та обґрунтування математичного плану 6-ти факторного експерименту при дослідженні пускових якостей ДВЗ / Д. В. Левченко // Двигуни внутрішнього згоряння. – 2021. – № 2. – С. 86–92.
20. Стеценко І. В. Моделювання систем / І. В. Стеценко. – Черкаси : ЧДТУ, 2010. – 399 с.
21. Горват А. А. Методи обробки експериментальних даних з використанням MS Excel : навч. посіб. / А. А. Горват, О. О. Молнар, В. В. Мінкович. – Ужгород : Видавництво УжНУ «Говерла», 2019. – 160 с.
22. Грищук Ю. С. Основи наукових досліджень : навч. посіб. / Ю. С. Грищук. – Харків : НТУ «ХПІ», 2008. – 232 с.
23. Дробовий факторний експеримент [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://wiki.tntu.edu.ua/%D0%94%D1%80%D0%BE%D0%B1%D0%BE%D0%B2%D0%B8%D0%B9_%D1%84%D0%B0%D0%BA%D1%82%D0%BE%D1%80%D0%BD%D0%B8%D0%B9_%D0%B5%D0%BA%D1%81%D0%BF%D0%B5%D1%80%D0%B8%D0%BC%D0%B5%D0%BD%D1%82



Chapter 3.

1. Jayachandran S. Digital Imaging in Dentistry: A Review /S. Jayachandran// Contemp Clin Dent. – 2017. – Vol. 8(2) – P. 193-4.
2. Digital dental X-ray database for caries screening /A.E. Rad, M.S. Rahim, A. Rehman, T. Saba// 3D Research. – 2016. – Vol. 7. – P. 1-5.
3. Koff D.A. An overview of digital compression of medical images: can we use lossy image compression in radiology? /D.A. Koff, H. Shulman// Can Assoc Radiol J. – Oct. 2006. – Vol. 57(4). – P.211-7.
4. METHODS OF INTELLECTUAL IMAGE AND VIDEO PROCESSING BASED ON VISUAL QUALITY METRICS FOR EMERGING APPLICATIONS / S. Abramov, Y. Fastowicz, O. Krzysztof-K Okarma, V. Lukin, V. Abramova, O. Rubel, O. Krzysztof, O. Ieremeiev// European Science. – 2023. – Vol. 20-02. – P. 51-98.
5. Analysis of HVS-metrics' properties using color image database TID2013 /N. Ponomarenko, V. Lukin, J. Astola, K. Egiazarian// In Advanced Concepts for Intelligent Vision Systems: 16th International Conference, ACIVS 2015. – 2015. – P. 613-624.
6. A Fast and Accurate Prediction of Distortions in DCT-Based Lossy Image Compression /V. Abramova, V. Lukin, S. Abramov, S. Kryvenko, P. Lech, K. Okarma// Electronics. – 2023. – Vol. 12(11). – P. 2347.
7. Still image/video frame lossy compression providing a desired visual quality /A. Zemliachenko, V. Lukin, N. Ponomarenko, K. Egiazarian, J. Astola// Multidim Syst Sign Process. – Jul. 2016. – Vol. 27(3). – P. 697–718.
8. Li, F. Two-step providing of desired quality in lossy image compression by SPIHT /F. Li, S. Krivenko, V. Lukin// Radioelectronic and computer systems. – 2020. – Vol. 2. – P. 22-32.
9. A Fast Noniterative Visually Lossless Compression of Dental Images Using AGU-M Coder /O. Krylova, L. Kryvenko, S. Krivenko, V. Lukin// In 2021 IEEE 16th International Conference on the Experience of Designing and Application of CAD Systems (CADSM). – 2021. – P. 6-10.



10. Just Noticeable Difference Prediction and Image Quality Assessment /N. Stojanović, B. Bondžulić, B. Pavlović, V. Petrović, O. Zelmati// In 2022 IEEE Zooming Innovation in Consumer Technologies Conference (ZINC). – 2022. – P. 234-238.

Chapter 4.

1. На шляху до Індустрії 4.0: інформаційні технології, моделювання, штучний інтелект, автоматизація : монографія / кол. авт. : В. Б. Артеменко, Л. В. Артеменко, О. В. Артеменко [та ін.]; за заг. ред. С. В. Котлика. – Одеса : Астропринт, 2021. – 544 с. ISBN 978–966–927–702–2.
2. Wissenschaft für den modernen Menschen 2021 / Science for modern man 2021. – Innovative engineering and technology, informatics, security systems, transport development, architecture. – Book 4. Part 4. : monograph. – ScientificWorld-NetAkhatAV Lußstr 13, Karlsruhe, Germany, 2021 – 236 p. ISBN 978-3-949059-12-4 DOI: 10.30890/2709-2313.2021-04-04.
3. Big Data Processing: methods, models and information technologies: monograph. – edited by Oleg I. Pursky. – Shoida GmbH, Steyr, Austria, 2019. – 234 p. ISBN 978-3-953794-29-8.
4. Удосконалений метод розробки API підвищеної швидкодії / Т. І. Коробейнікова, Л. А. Савицька // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія. – Вінниця, 2021. – №1 (том 50), С. 31-35.
5. Засіб створення каталогу електронних посилань на основі користувацької системи категоризації [Текст] / Коробейнікова Т.І., Мичуда Л.З., Савицька Л.А. // «Електронні інформаційні ресурси: створення, використання, доступ» : Збірник матеріалів Міжнародної науково-практичної Інтернет конференції 9-10 листопада 2020 р. – Суми/Вінниця : НІКО/ВНТУ, 2020. – С. 144-151. ISBN 978-617-7422-13-5.
6. Метод та програмний засіб застосування метаданих в процесах пошуку / Т. І. Коробейнікова, Л. А. Савицька, Д. В. Тягун // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія – 2020. – №46, с. 21-27.



7. Метод та кроссплатформений засіб архівації однотипних файлів / Т. І. Коробейнікова, Савицька Л.А, П. О. Чирва // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія – 2020. – №47, с. 14-21.
8. Рівень розвитку техніки і технологій в ХХІ столітті. Частина 1: Серія монографій / [авт.кол. : М.В. Князева, В.М. Крамар, І.Я. Львович, А.П. Преображенський, О.Н. Романюк і ін.]. - Одеса: КУПРІЄНКО СВ, 2019 - 227 с. : іл., табл. - (Серія «Рівень розвитку техніки і технологій в ХХІ столітті», Частина 1) ISBN 978-617-7414-75-8.
9. Савицька Л. А. Методи та засоби захисту ресурсів в комп'ютерній SDN-мережі / Л.А. Савицька, Т.І. Коробейнікова, І.В. Леонтьєв, С.В. Богомолів // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія – 2023. – № 3. – С. 41–51. – ISSN 1999–9941.
10. Захарченко С. М. Застосування односторінкових веб-орієнтованих інтерфейсів в соціально значущих проектах. / С. М. Захарченко, Т. І. Трояновська, О. В. Бойко В. С. Рибаченко // Вісник ХНУ, №3, 2016р., с. 33-39.
11. Коробейнікова Т.І. Аналіз сучасних систем документообігу / Т. І. Коробейнікова, І. К. Пустовіт // Modern systems of science and education in the USA, EU and other countries (25-26 січня, 2022). Seattle, Washington, USA. 2022. – С. 19-22. – ISBN 979-8-4435989-0-1. DOI: 10.30888/2709-2267.2022-9.
12. Гороховський О. І. Моделювання, створення та практика автоматизованих систем дистанційного навчання / О. І. Гороховський, Т. І. Трояновська // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія – 2007. – № 1(8). – С. 235–239. – ISSN 1999–9941.
13. Трояновська Т. І. Інформаційна технологія доставки контенту у системах комп'ютеризованої підготовки спеціалістів. // Гороховський О. І., Трояновська Т. І., Азаров О. Д. Монографія. Вінниця : ВНТУ, 2016.–160 с.
14. Мобільний застосунок Дія: переваги та недоліки [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <http://gromhvylya.org.ua/facebook/mobilnij-zastosunok-dija-perevagi-ta-nedoliki/>.



15. Pros & Cons of PandaDoc: Analysis of document management software [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://financesonline.com/pros-cons-pandadoc-analysis-document-management-software>.
16. Google Docs: A Good Fit for Your Business? [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://trackvia.com/blog/excelling-at-work/google-docs-a-good-fit-for-your-business/>.
17. T. Korobeinikova, R. Chekhmestruk, P. Mykhaylov, O. Romanyuk, O. Romanyuk and H. Achanyar, "The Fault-Resistant Web Application Infrastructure Using Autoscaling," 2023 13th International Conference on Advanced Computer Information Technologies (ACIT), Wrocław, Poland, 2023, pp. 479-482, doi: 10.1109/ACIT58437.2023.10275448.
18. T. Korobeinikova, V. Maidaniuk, O. Romanyuk, R. Chekhmestruk, O. Romanyuk and S. Romanyuk, "Web-applications Fault Tolerance and Autoscaling Provided by the Combined Method of Databases Scaling," 2022 12th International Conference on Advanced Computer Information Technologies (ACIT), 2022, pp. 27-32, doi: 10.1109/ACIT54803.2022.9913098.
19. Відмовостійкість та автомасштабування веб-ресурсу. / Коробейнікова Т.І., Захарченко С. М. // International scientific journal «Grail of Science» – 2022. – № 14-15 (May, 2022). – С. 312–319. ISSN: 2710–3056. ISBN 979-8-88526-799-1.
20. Комбінований метод масштабування баз даних / Коробейнікова Т.І., Захарченко С. М. // International scientific journal «Grail of Science» – 2022. – № 14-15 (May, 2022). – С. 320–326. ISSN: 2710–3056. ISBN 979-8-88526-799-1.
21. AWS RDS [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://aws.amazon.com/ru/rds/>.
22. Cherniak I. Algorithm of work of specialized document management system / I. Cherniak, I. Pustovit, T. Korobeinikova, N. Luzhetska // “Information protection and information systems security” : Materials of VIII-th International Scientific



and Technical Conference, November 11 – 12, 2021. – Lviv: NULP, 2021 – C. 27-29.

Chapter 5.

1. Kundu PK, IM Cohen , DR Dowling . Fluid mechanics . Elsevier _ 2012.
2. Genick , Bar – Meir . Basic of Fluid Mechanics . Chicago , 2013. 604 p .
3. Blazec J. Computational fluid dynamics : Principles and applications . Elsevier. 2001. 470 p.
4. Loitsyansky, L.G. Mechanics liquids and gases . –M. Bustard , 2003. 842 p. – ISBN 5 – 7107 – 6327 – 6.
5. Кац А.М. Теория упругости. – Санкт-Петербург: Лань, 2002. 208 с.
6. Самуль В.И. Основы теории упругости и пластичности. – М.: Высшая школа, 1982. 264 с.
7. Chhabra RP, Richardson JF Non-Newtonian Flow in the Process Industries. Fundamentals and Engineering Applications. 1999, 421 p.
8. Wilkinson W.L. Non-Newtonian liquids _ M. World, 1960 . 216 p.
9. Budarin , V.A. Transformation of the equation of motion in stresses for incompressible fluid _ Eastern-European Journal of enterprise technologies . /7 (74). 2015 . p. 38 - 41. DOI : <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2015.39886>
10. Budarin , VA Analytical description of the Newtonian flow liquids in a round tube and on a horizontal plate. Eastern European Journal of Advanced Technologies. 2016. T.6 /7 (80). pp. 43 – 49. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.85468> eleven .
11. Lockerby , D.A., J. Reese , M., Gallis , M.A. Capturing the Knudsen layer in continuum-fluid models of nonequilibrium gas flows . AIAA Journal . – 2005. V. 43. N. 6. p. 1391 -1393 .
12. Budarin , V. Analyzing the rotation of an inviscid vortex tube. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies – 2015 . V. 5, N. 7 (77). DOI: 10.15587/1729-4061.2015.51081 .



13. Mulligan, S. Experimental and Numerical Analysis of Three-Dimensional Free-Surface Turbulent Vortex Flows with Strong Circulation. Sligo, 2015, p. 299
- 14 . Budarin , V. Method of closing the equations of fluid motion. (preprint).RG. 2022, 10 p.m. DOI



SCIENTIFIC EDITION

MONOGRAPH
WISSENSCHAFT FÜR DEN MODERNEN MENSCHEN
INFORMATIK, KYBERNETIK UND AUTOMATISIERUNG, SICHERHEITSSYSTEME,
PHYSIK UND MATHEMATIK

SCIENCE FOR MODERN MAN
COMPUTER SCIENCE, CYBERNETICS AND AUTOMATION, SECURITY SYSTEMS,
PHYSICS AND MATHEMATICS
MONOGRAPHIC SERIES «EUROPEAN SCIENCE»
BOOK 26. PART 2

Authors:

Krylik L.V. (1), Antonenko A.V. (2), Buchenko I.A. (2), Korotkov S.S. (2),
Balvak A.A. (2), Tsvyk O.S. (2), Tverdokhlebov A.O. (2),
Korotin D.S. (2), Ziniar D.A. (2), Solobaiev S.G. (2), Mishkur Y.V.
Danevych O.V. (2), Chupakhin M.S. (2), Lukin V.V. (3), Kryvenko S.S. (3),
Kryvenko L.S. (3), Krylova O.V. (3), Korobeinikova T.I. (4),
Budarin V. (5)

The scientific achievements of the authors of the monograph were also reviewed and recommended for publication at the international scientific symposium
«Wissenschaft für den modernen Menschen / Science for modern man '2024»
(January 30, 2024)

Monograph published in the author's edition

The monograph is included in
International scientometric databases

500 copies
January, 2024

Published:
ScientificWorld-NetAkhatAV
Lußstr 13,
Karlsruhe, Germany



e-mail: editor@promonograph.org
<https://desymp.promonograph.org>





ProMonograph

<https://desymp.promonograph.org>

e-mail: editor@scilook.eu