



#12 (40), 2018 część 1
Wschodnioeuropejskie Czasopismo Naukowe
(Warszawa, Polska)
Czasopismo jest zarejestrowane i publikowane w Polsce. W czasopiśmie publikowane są artykuły ze wszystkich dziedzin naukowych. Czasopismo publikowane jest w języku polskim, angielskim, niemieckim i rosyjskim.

Artykuły przyjmowane są do dnia 30 każdego miesiąca.
Częstotliwość: 12 wydań rocznie.
Format - A4, kolorowy druk
Wszystkie artykuły są recenzowane
Każdy autor otrzymuje jeden bezpłatny egzemplarz czasopisma.
Bezpłatny dostęp do wersji elektronicznej czasopisma.

Zespół redakcyjny
Redaktor naczelny - Adam Barczuk
Mikołaj Wiśniewski
Szymon Andrzejewski
Dominik Makowski
Paweł Lewandowski
Rada naukowa
Adam Nowicki (Uniwersytet Warszawski)
Michał Adamczyk (Instytut Stosunków Międzynarodowych)
Peter Cohan (Princeton University)
Mateusz Jabłoński (Politechnika Krakowska im. Tadeusza Kościuszki)
Piotr Michalak (Uniwersytet Warszawski)
Jerzy Czarnecki (Uniwersytet Jagielloński)
Kolub Frennen (University of Tübingen)
Bartosz Wysocki (Instytut Stosunków Międzynarodowych)
Patrick O'Connell (Paris IV Sorbonne)
Maciej Kaczmarczyk (Uniwersytet Warszawski)

#12 (40), 2018 part 1
East European Scientific Journal
(Warsaw, Poland)
The journal is registered and published in Poland. The journal is registered and published in Poland. Articles in all spheres of sciences are published in the journal. Journal is published in **English, German, Polish and Russian.**

Articles are accepted till the 30th day of each month.
Periodicity: 12 issues per year.
Format - A4, color printing
All articles are reviewed
Each author receives one free printed copy of the journal
Free access to the electronic version of journal

Editorial
Editor in chief - Adam Barczuk
Mikołaj Wiśniewski
Szymon Andrzejewski
Dominik Makowski
Paweł Lewandowski
The scientific council
Adam Nowicki (Uniwersytet Warszawski)
Michał Adamczyk (Instytut Stosunków Międzynarodowych)
Peter Cohan (Princeton University)
Mateusz Jabłoński (Politechnika Krakowska im. Tadeusza Kościuszki)
Piotr Michalak (Uniwersytet Warszawski)
Jerzy Czarnecki (Uniwersytet Jagielloński)
Kolub Frennen (University of Tübingen)
Bartosz Wysocki (Instytut Stosunków Międzynarodowych)
Patrick O'Connell (Paris IV Sorbonne)
Maciej Kaczmarczyk (Uniwersytet Warszawski)

**Dawid Kowalik (Politechnika
Krakowska im. Tadeusza Kościuszki)**
**Peter Clarkwood(University College
London)**
Igor Dziedzic (Polska Akademia Nauk)
**Alexander Klimek (Polska Akademia
Nauk)**
**Alexander Rogowski (Uniwersytet
Jagielloński)**
Kehan Schreiner(Hebrew University)
**Bartosz Mazurkiewicz (Politechnika
Krakowska im. Tadeusza Kościuszki)**
Anthony Maverick(Bar-Ilan University)
**Mikołaj Żukowski (Uniwersytet
Warszawski)**
**Mateusz Marszałek (Uniwersytet
Jagielloński)**
**Szymon Matysiak (Polska Akademia
Nauk)**
**Michał Niewiadomski (Instytut
Stosunków Międzynarodowych)**
Redaktor naczelny - Adam Barczuk

1000 kopii.

**Wydrukowano w «Aleje Jerozolimskie
85/21, 02-001 Warszawa, Polska»**

**Wschodnioeuropejskie Czasopismo
Naukowe**

**Aleje Jerozolimskie 85/21, 02-001
Warszawa, Polska**

E-mail: info@eesa-journal.com ,

<http://eesa-journal.com/>

**Dawid Kowalik (Politechnika
Krakowska im. Tadeusza Kościuszki)**
**Peter Clarkwood(University College
London)**
Igor Dziedzic (Polska Akademia Nauk)
**Alexander Klimek (Polska Akademia
Nauk)**
**Alexander Rogowski (Uniwersytet
Jagielloński)**
Kehan Schreiner(Hebrew University)
**Bartosz Mazurkiewicz (Politechnika
Krakowska im. Tadeusza Kościuszki)**
Anthony Maverick(Bar-Ilan University)
**Mikołaj Żukowski (Uniwersytet
Warszawski)**
**Mateusz Marszałek (Uniwersytet
Jagielloński)**
**Szymon Matysiak (Polska Akademia
Nauk)**
**Michał Niewiadomski (Instytut
Stosunków Międzynarodowych)**
Editor in chief - Adam Barczuk

1000 copies.

**Printed in the "Jerozolimskie 85/21, 02-
001 Warsaw, Poland»**

East European Scientific Journal

**Jerozolimskie 85/21, 02-001 Warsaw, Po-
land**

E-mail: info@eesa-journal.com ,

<http://eesa-journal.com/>

СОДЕРЖАНИЕ

ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ НАУКИ

Федорів В.В.

ПЕТРОФІЗИЧНА МОДЕЛЬ ВИЗНАЧЕННЯ ПОРИСТОСТІ ЗА ДАНИМИ АКУСТИЧНОГО КАРОТАЖУ З
ВРАХУВАННЯМ ГЛИНИСТОСТІ4

ИСТОРИЧЕСКИЕ НАУКИ

Крайнова Л.Н., Цыдэнэ Ш.Ц., Манжигеев А.Ф.

МОНГОЛЬСКИЙ ЯЗЫК В СИСТЕМЕ ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ИМПЕРИИ В XIX –НАЧАЛЕ XX В.12

НАУКИ О ЗЕМЛЕ

Кузьминова И.В.

АНАЛИТИЧЕСКАЯ КОНЦЕПЦИЯ ОБРАБОТКИ И ИНТЕРПРЕТАЦИИ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ
ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ В СТВОЛЕ СКВАЖИН СЛОЖНОЙ ГЕОМЕТРИИ МЕТОДАМИ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНО
ТЕЛЕМЕТРИИ.....16

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Vildanov R.G., Buzaeva E.K., Shirobokov E.D., Sayfutdinov R.F.

DEVELOPMENT OF AUTOMATIC SYSTEM FOR DETERMINING PARAMETERS DIAGNOSTIC INFORMATION25

Masikevych A. Yu., Heretsun H. M., Masikevych Yu. G., Kolotylo M. P., Yaremchuk V. M.,

ATMOSPHERIC PROTECTION AS A COMPOSITION OF ENVIRONMENTAL SAFETY OF THE REGION30

Каганов В.И., Буй Хыу Чык

БЕСПРОВОДНАЯ ПЕРЕДАЧА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ34

Гайдайчук В.В., Кошевий О.О.

ОПТИМІЗАЦІЯ ЦИЛІНДРИЧНОЇ ОБОЛОНКИ З УРАХУВАННЯМ СТАТИЧНИХ І ДИНАМІЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ.39

Володько О.В., Роговая Н.В.

РОЗРАХУНОК НАПРУЖЕНОГО СТАНУ НАГРІВНОГО ПОКРИТТЯ АЕРОДРОМІВ47

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ

Сандраков Г. В.

МОДЕЛЮВАННЯ ТА УСЕРЕДНЕННЯ ПРОЦЕСІВ ГІДРОДИНАМІКИ З ОСЦИЛЮЮЧИМИ ДАНИМИ56

Timofeev A.M., Malyshev A. V., Protodyakonova N.A., Stepanov A. A.

THE CALCULATION OF THE THERMAL CONDUCTIVITY OF MOIST THAWED AND FROZEN SOILS TYPICAL OF
YAKUTIA ON THE BASIS OF THE THEORY OF GENERALIZED CONDUCTIVITY.....62

ХИМИЧЕСКИЕ НАУКИ

Габбазова Л.З., Земский Д.Н., Линькова Т.С., Земский Н.И.

ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩАЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ СХЕМА ВЫДЕЛЕНИЯ ОКСИДА ПРОПИЛЕНА ИЗ
ЭПОКСИДАТА65

ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ НАУКИ

Fedoriv V.V.

*candidate of geological science, associate professor of the department of oil and gas geophysics,
Ivano-Frankivsk national technical university of oil and gas*

Федорів Володимир Васильович

*кандидат геологічних наук, доцент кафедри нафтогазової геофізики,
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу,*

PETROPHYSIC MODEL FOR DETERMINING POROSITY ACCORDING TO ACOUSTIC LOGGING WITH TAKING INTO ACCOUNT CLAYNESS

ПЕТРОФІЗИЧНА МОДЕЛЬ ВИЗНАЧЕННЯ ПОРИСТОСТІ ЗА ДАНИМИ АКУСТИЧНОГО КАРОТАЖУ З ВРАХУВАННЯМ ГЛИНИСТОСТІ

Annotation: The possibility of considering clay content according to the results of gamma-logging studies in determining the porosity according to the acoustic method is considered. In order to obtain reliable data on the determination of porosity, petrophysical modeling was carried out by statistical analysis. As a result of this modeling, a new petrophysical model for determining the porosity according to the acoustic method taking into account clay content for rocks-collectors of the Nariznianske gas condensate field has been obtained.

Key words: porosity, clayey, acoustic logging, gamma-logging, petrophysical model.

Анотація: Розглядається можливість врахування глинистості за результатами досліджень гамма-каротажу при визначенні пористості за даними акустичного методу. З метою отримання достовірних даних визначення пористості проведено петрофізичне моделювання шляхом статистичного аналізу. У результаті проведеного моделювання отримано нову петрофізичну модель визначення пористості за даними акустичного методу з врахуванням глинистості для порід-колекторів Нарізнянського газоконденсатного родовища.

Ключові слова: пористість, глинистість, акустичний каротаж, гамма-каротаж, петрофізична модель.

Актуальність. Підвищення інформативності результатів геофізичних досліджень свердловин при визначенні ємнісних властивостей порід-колекторів газових родовищ України є однією із актуальних проблем сьогодення. Вивчаючи геологічну будову продуктивних горизонтів газових родовищ Передкарпатського прогину та Дніпроводо-Донецької западини встановлено, що породи-колектори представлені пісковиками як чистими так і заглинизованими.

Проводячи аналіз літературних джерел та методичних рекомендацій, щодо визначення пористості, необхідно відмітити, що глинистість у значній мірі впливає як результати електричних, нейтронних методів дослідження свердловин так і на результати акустичного каротажу.

При значному вмісті глинистого матеріалу в породах-колекторах значення інтервального часу пробігу повздовжньої хвилі ΔT_p , яке знімається з діаграм, є суттєво завищеними у порівнянні з тими, що характеризують породу з тою ж пористістю та мінеральним складом скелету при відсутності глинистого матеріалу.

Аналіз опублікованих праць. Вплив глинистості на покази акустичного каротажу вивчено дуже слабо, однак враховуючи фізико-хімічні особливості глинистих мінералів, можна припустити, що важливими причинами аномальних значень інтервального часу пробігу повздовжньої хвилі в глинах є:

а) слабкий акустичний контакт глинистих частинок;

б) аномальні пружні властивості зв'язаної води у порівнянні з звичайною, яка заповнює пори колектора.

Вплив глинистості колекторів враховують, змінюючи рівняння середнього часу [1, 2, 3]:

$$\Delta T_n = \Delta T_{ск} (1 - K_n - K_{гн}) + \Delta T_{ф} \cdot K_n + \Delta T_{гн} \cdot K_{гн}, (1)$$

де ΔT_p , $\Delta T_{ск}$, $\Delta T_{ф}$, $\Delta T_{гн}$ – інтервальний час пробігу повздовжньої хвилі, відповідно, у породі, скелеті породи, флюїді, що насичує пори, та глинах; K_n – коефіцієнт пористості, $K_{гн}$ – коефіцієнт об'ємної глинистості.

Значення $\Delta T_{гн}$ набагато вище ΔT_p для інших породоутворюючих мінералів осадових порід. Величина $\Delta T_{гн}$ приймає різні значення для шаруватої, структурної і дисперсної глинистості. Її визначають за найближчим пластом глини у випадку явно вираженої шаруватої глинистості. Для дисперсної глинистості значення $\Delta T_{гн}$ прямує до $\Delta T_{ф}$ і займає проміжні значення між $\Delta T_{гн \text{ шар}}$ і $\Delta T_{ф}$ для порід із структурною глинистістю. Деякі відомості про розподіл глинистих частинок у колекторі можна отримати за відношенням V_p/V_s : значення $V_p/V_s < 2$ відповідає дисперсній глинистістю; $V_p/V_s > 2$ слугує ознакою структурної глинистості. На практиці визначення типу глинистості та значення $\Delta T_{гн}$ викликає значні труднощі, тому величину $\Delta T_{гн}$

часто розглядають як керовану. Використання рівняння (1) на практиці обмежується відомостями про значення $K_{\text{гл}}$.

На даний час існує дуже багато способів визначення $K_{\text{гл}}$, але всі вони наближені. Залежності “кern-геофізика” для конкретних родовищ, на жаль, pojawiaються вже на стадії підрахунку запасів. Крім того рівняння (1) дуже рідко використовується у практиці геофізичних досліджень свердловин через складність точної оцінки $K_{\text{гл}}$ та $\Delta T_{\text{гл}}$. Якщо коефіцієнт об’ємної глинистості ($K_{\text{гл}}$) можна наближено оцінювати за даними гамма-методу, при відсутності петрофізичних зв’язків, то величина $\Delta T_{\text{гл}}$, згідно наших досліджень та літературних даних [2, 4, 5, 6, 7], є доволі умовною. Дуже часто буває важко визначити дійсні значення $\Delta T_{\text{гл}}$, оскільки при проведенні досліджень, у більшості випадків, навпроти них мають місце каверни. Деякі дослідники [1, 2, 4] рекомендують величину $\Delta T_{\text{гл}}$ знімати з діаграм інтервального часу навпроти нерозмитих глин. Наші дослідження показують, що глини характеризуються доволі широким діапазоном зміни вищезгаданого параметра навіть в суміжних інтервалах залягання колектора. Це пов’язано, в першу чергу, із різним ущільненням глин. Глини (аргіліти) надзвичайно сильно відрізняються за ущільненістю та водневим містом, тому вони можуть бути покривками для вуглеводнів або ні. На цій основі розроблено низку методів випереджаючого прогнозу розкриття продуктивного колектора [1, 2]. Тому для оперативної інтерпретації необхідні інші підходи що до врахування впливу глинистості на коефіцієнт пористості порід-колекторів складнопобудованих розрізів.

Мета даної статті. Розробити петрофізичні моделі врахування глинистості при визначенні пористості за результатами акустичних досліджень складнопобудованих геологічних розрізів газових родовищ України.

Методи вирішення поставленої задачі. Приймаючи до уваги вищевикладене, при реалізації різних способів інтерпретації даних акустично-

го каротажу, врахування впливу глинистості доцільно проводити шляхом введення у формулу $K_n = f(\Delta T_n)$ геофізичного параметру, який буде характеризувати глинистість колектора. Якщо метод самочинної поляризації відмічається досить хорошою диференціацією розрізу, то вплив глинистості можна виключити за допомогою способу запропонованого спеціалістами фірми *Schlumberger* [8]. У рівняння середнього часу вводиться параметр, який залежить від відносної амплітуди самочинної поляризації, і дана модель набуває виду:

$$K_n = \frac{\Delta T_n - \Delta T_{\text{СК}}}{\Delta T_{\phi} - \Delta T_{\text{СК}}} \cdot \frac{1}{(2 - \alpha_{\text{ПС}})} \quad (2)$$

де $\alpha_{\text{ПС}}$ – відносна амплітуда самочинної поляризації.

Для розрахунку відносної амплітуди ПС вибирають опорні пласти, які можуть бути також використані при визначенні $\Delta T_{\text{СК}}$.

Впродовж десятиліть рівняння (2) успішно використовувалось при визначенні пористості теригенних порід-колекторів в діапазоні 1-28 %. На рисунку 1 для порід-колекторів Наріжнеського газоконденсатного родовища приведені співставлення пористостей визначених за даними вивчення керну та за даними рівняння 2.

Тіснота зв’язку є досить високою та прийнятною навіть у випадках підрахунку запасів вуглеводнів об’ємним методом. В даному випадку слід констатувати, що підхід до оцінки величини коефіцієнта пористості з врахуванням глинистості за даними ПС практично удосконалює рівняння середнього часу для пластів-колекторів даних відкладів. Складніша ситуація при визначенні пористості глинистих порід-колекторів у випадку малої відмінності мінералізації пластових вод та фільтрату бурового розчину, оскільки метод ПС у даному випадку не інформативний.

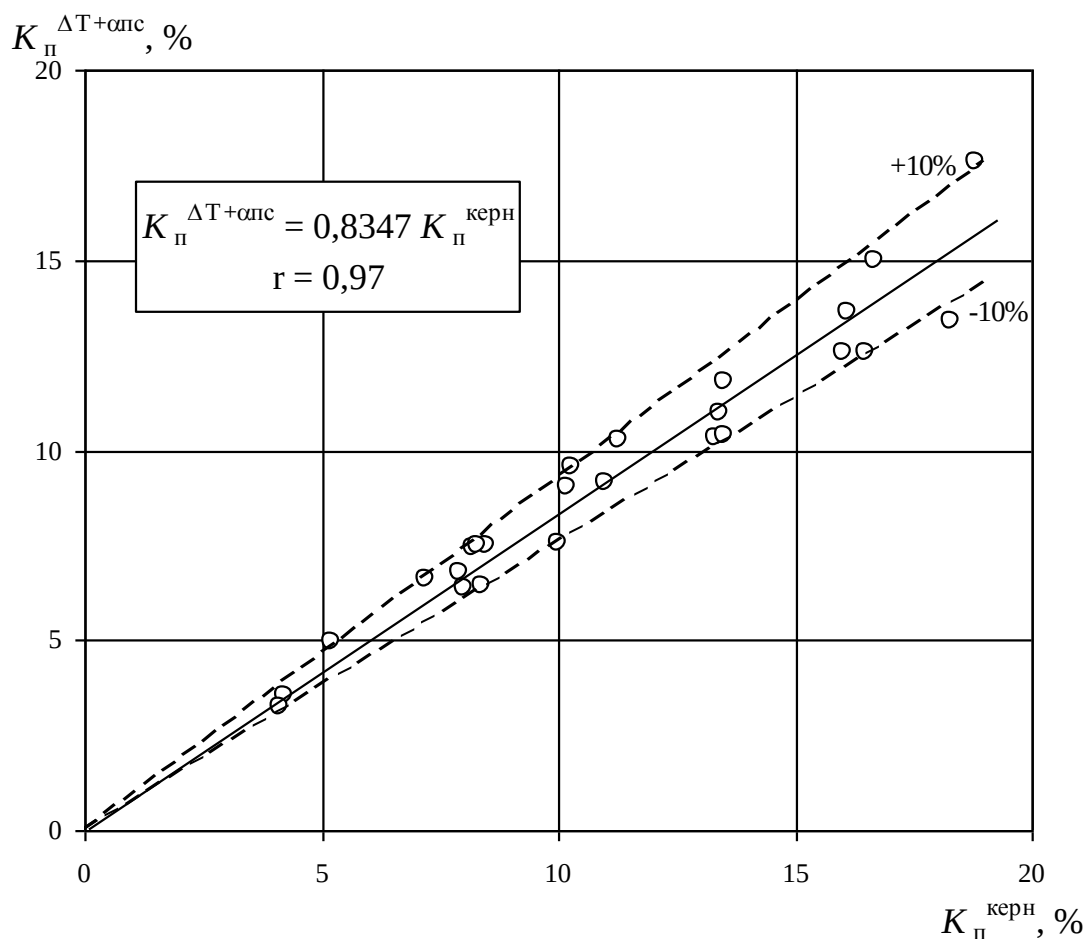


Рисунок 1 – Співставлення пористості, визначеної за даними дослідження керну, та за даними алгоритму 2 для пластів-колекторів Наріжнянського газоконденсатного родовища

Постає таке основне питання: як бути при відсутності методу ПС або його поганій диференціації розрізу. В даному випадку слід згадати, що основний метод, покази якого залежать від породотворюючих глинистих елементів є метод природної радіоактивності. Власне його використовують як поправку за глинистість у петрофізичних моделях отриманих при аналізі керну та ГДС при відсутності диференціювання розрізу методом ПС.

Ряд науковців у своїх працях, зокрема М.С. Бондаренко, В.В. Кармазинко, Г.О. Кашуба, В.В. Кулик [9], пропонують замінити відносний параметр самочинної поляризації на параметр, який характеризується природною радіоактивністю.

Даний спосіб полягає в тому, що пористість глинистих колекторів визначають у мультиплікативній формі:

$$K_n = R_{ГК} \cdot K_n^{AK} = K_n^{AK} \cdot \frac{1}{1 + \frac{\phi(\Delta I_\gamma)}{\phi(\Delta I_\gamma) + K_n^{AK}}}, \quad (3)$$

де $R_{ГК}$ – поправочний коефіцієнт за глинистість на основі методу ГК; ΔI_γ – подвійний різни-

цевий параметр ГК, який визначається об'ємною глинистістю $K_{ГЛ}$ і, на відміну від параметра $\alpha_{пс}$, не залежить від пористості; $\phi(\Delta I_\gamma)$ – відома апроксимація залежності $K_{ГЛ}$ і параметра $\Delta I_\gamma \in (0,1)$, яка отримана емпірично на основі кернових і свердловинних досліджень.

Очевидно, що для введення запропонованої поправки $R_{ГК}$ необхідно знати апроксиманту залежності параметра ГК від коефіцієнта глинистісті, а це потребує додаткових досліджень кернавого матеріалу, часто відсутнього або наявного в недостатній кількості, особливо на етапі оперативної інтерпретації.

С.Є. Муц (С.Є. Розловська) у своїх працях приводить припущення, що $\alpha_{пс} + \Delta I_\gamma \approx 1$ [10, 11]. Відповідно підставивши у рівняння (2), отримаємо:

$$K_n = \frac{\Delta T_n - \Delta T_{ск}}{\Delta T_\phi - \Delta T_{ск}} \cdot \frac{1}{(1 + \Delta I_\gamma)}. \quad (4)$$

Нами зроблено аналіз вищенаведених способів врахування впливу глинистісті при визначенні пористості за результатами досліджень акустичного методу. Слід відмітити, що способи врахування глинистісті, які запропоновані фірмою

Schlumberger та С.С. Муц, в апіорі є дещо узагальненим і в повній мірі не відображає дійсності врахування даного параметра за даними самочинної поляризації та гамма методу.

З метою аналізу достовірності використання даних способів нами було проведено моделювання

коефіцієнтів $1/(2-\alpha_{\text{ПС}})$ та $1/(1+\Delta I_{\gamma})$ (Табл. 1). Як видно з рисунків 2 та 3 і таблиці 1, коефіцієнти $1/(2-\alpha_{\text{ПС}})$ та $1/(1+\Delta I_{\gamma})$ змінюються в діапазоні від 1 до 0,5 і графіки залежностей (Рис. 2 і 3) є майже прямолінійні, що суперечить, у більшості випадків, зв'язку коефіцієнта глинистості з $\alpha_{\text{ПС}}$ та ΔI .

Таблиця 1

Результати моделювання коефіцієнтів врахування глинистості

$\alpha_{\text{ПС}}$	$1/(2-\alpha_{\text{ПС}})$	$1/e^{(1-\alpha_{\text{ПС}})}$	$1/10^{(1-\alpha_{\text{ПС}})}$	ΔI_{γ}	$1/(1+\Delta I_{\gamma})$	$1/e^{\Delta I_{\gamma}}$	$1/10^{\Delta I_{\gamma}}$
0,00	0,50	0,37	0,10	0,00	1,00	1,00	1,00
0,10	0,53	0,41	0,13	0,10	0,91	0,90	0,79
0,20	0,56	0,45	0,16	0,20	0,83	0,82	0,63
0,30	0,59	0,50	0,20	0,30	0,77	0,74	0,50
0,40	0,63	0,55	0,25	0,40	0,71	0,67	0,40
0,50	0,67	0,61	0,32	0,50	0,67	0,61	0,32
0,60	0,71	0,67	0,40	0,60	0,63	0,55	0,25
0,70	0,77	0,74	0,50	0,70	0,59	0,50	0,20
0,80	0,83	0,82	0,63	0,80	0,56	0,45	0,16
0,90	0,91	0,90	0,79	0,90	0,53	0,41	0,13
1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,50	0,37	0,10

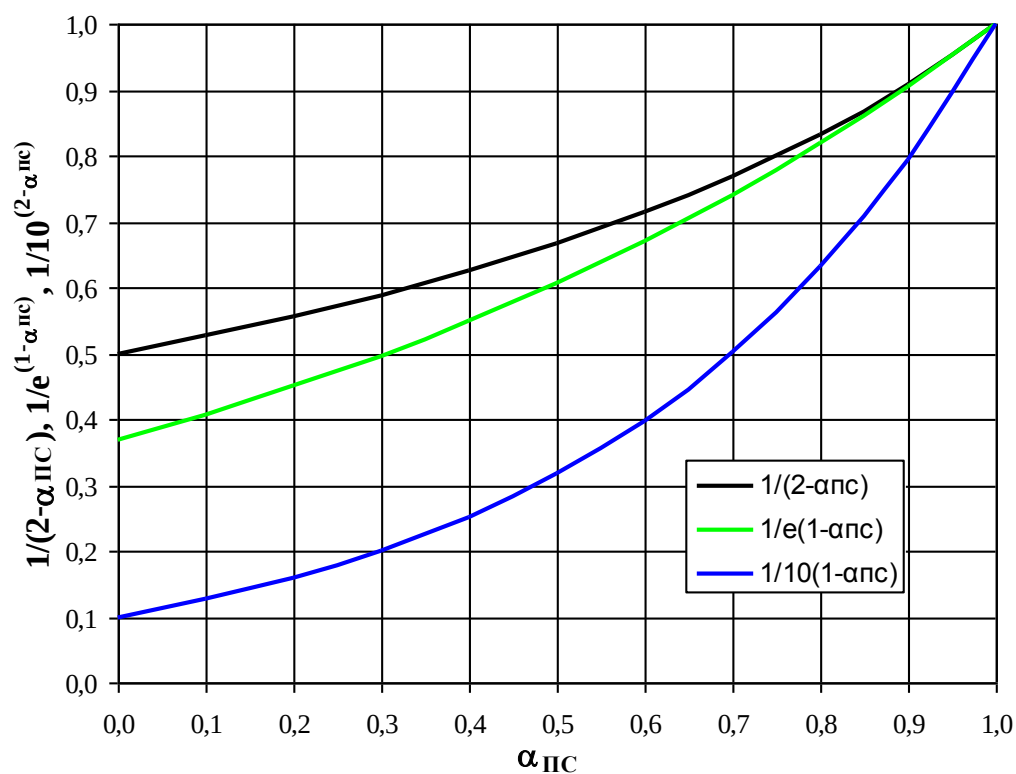


Рисунок 2

Графіки моделювання коефіцієнтів врахування глинистості за даними самочинної поляризації

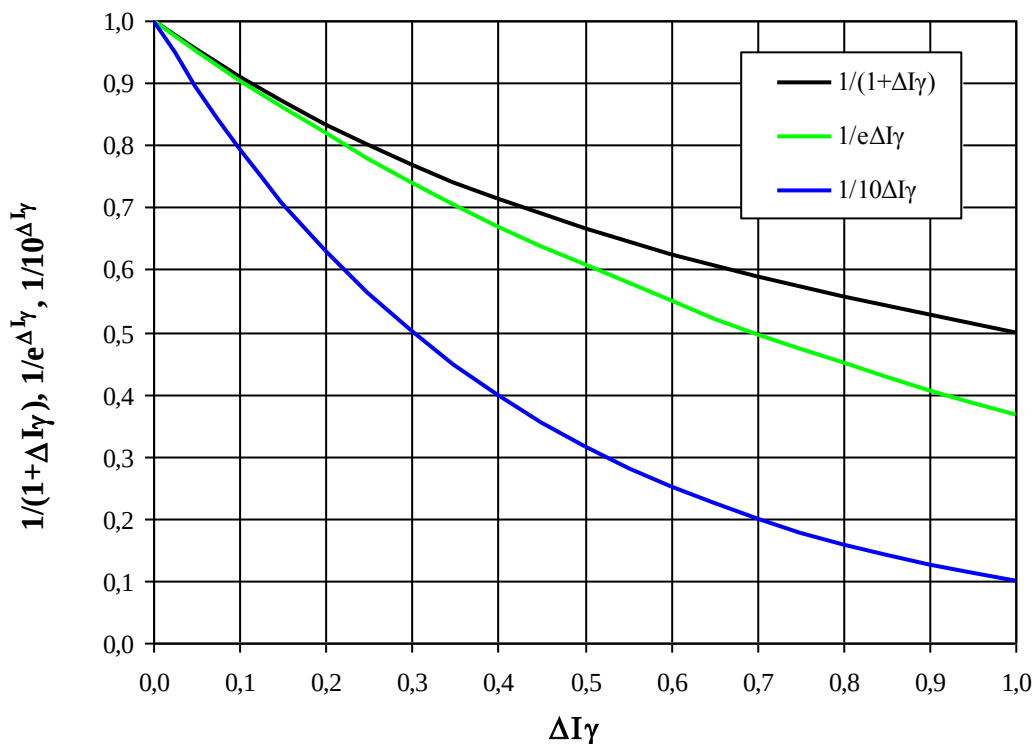


Рисунок 3

Графіки моделювання коефіцієнтів врахування глинистості за даними природної радіоактивності

Виходячи із вище приведеного виникає потреба у розширенні діапазону зміни параметрів $1/(2-\alpha_{\text{ПС}})$ та $1/(1+\Delta I_\gamma)$. Розширення діапазону зміни пропонується шляхом введення степеневі функції у вищезгадані параметри, тобто зробити наступні заміни: $\rightarrow 1/10^{1-\alpha_{\text{ПС}}}$ та $1/(1+\Delta I_\gamma) \rightarrow 1/e^{\Delta I_\gamma} \rightarrow 1/10^{\Delta I_\gamma}$. Нами встановлено, що при використанні даного підходу, можна розширити діапазон зміни даних параметрів від 1 до 0,37 ($1/(2-\alpha_{\text{ПС}}) \rightarrow 1/e^{1-\alpha_{\text{ПС}}}$ або $1/(1+\Delta I_\gamma) \rightarrow 1/e^{\Delta I_\gamma}$) та від 1 до 0,10 ($1/(2-\alpha_{\text{ПС}}) \rightarrow 1/10^{1-\alpha_{\text{ПС}}}$ або $1/(1+\Delta I_\gamma) \rightarrow 1/10^{\Delta I_\gamma}$) (Табл. 1, Рис. 2, 3). Виходячи із цього, у вищенаведених алгоритмах, які запропоновані фірмою *Schlumberger* та С.Є. Муц, більш доцільніше використовувати експоненційну та степеневу функції, оскільки вони дають можливість розширити діапазон врахування глинистості при визначенні пористості за даними акустичного каротажу.

Таким чином, петрофізичні моделі визначення пористості за результатами акустичних досліджень свердловин та розроблена нами з врахуванням впливу глинистості отримують наступні види:

модель Віллі-Грегори:

$$K_n = \frac{\Delta T_n - \Delta T_{\text{СК}}}{\Delta T_\phi - \Delta T_{\text{СК}}} \cdot \frac{1}{e^{\Delta I_\gamma}}, \quad (4)$$

модель Раймера:

$$K_n = \left(\frac{1}{\sigma_{\text{СК}} - \sigma_\phi} \right) \left(1 - \frac{\Delta T_{\text{СК}}}{\Delta T_n} \right) \cdot \frac{1}{e^{\Delta I_\gamma}}, \quad (5)$$

розроблена модель:

$$K_n^{AK} = \left(1 - \frac{\Delta T_{\text{СК}}}{\Delta T_\phi} \right) \cdot \left(1 - \frac{\Delta T_{\text{СК}}}{\Delta T_n} \right) \cdot \frac{1}{e^{\Delta I_\gamma}} \quad (6)$$

Для порівняння розробленої моделі визначення пористості за даними АК з врахування глинистості з іншими, які наведені вище, були використані вихідні дані Наріжнянського газоконденсатного родовища. Отримані петрофізичні моделі визначення пористості з врахуванням впливу глинистості для порід-колекторів Наріжнянського газоконденсатного родовища мають наступні види:

модель Віллі-Грегори (Рис. 4):

$$K_n^{\text{Віллі-Грегори}} = 0,7199 \cdot K_n, \quad (7)$$

$$r = 0,9617$$

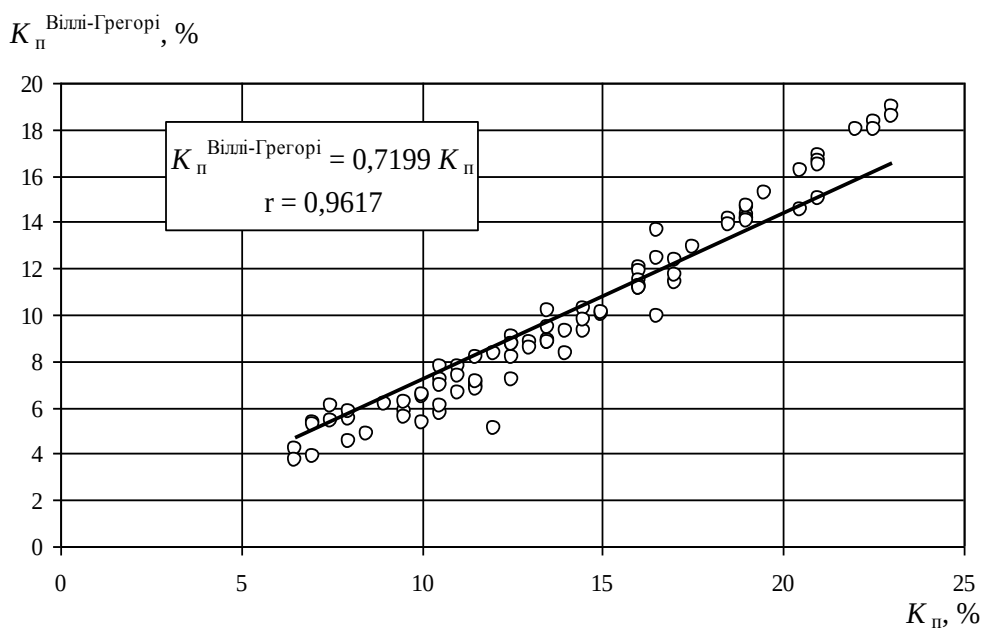


Рисунок 4 – Зіставлення пористості визначеної за моделлю Виллі-Грегорі з пористістю визначеною за даними дослідження керну (для глинистих порід-колекторів)

модель Раймера (Рис. 5):

$$K_{\text{п Раймера}} = 0,7513 \cdot K_{\text{п}}, \quad r = 0,9615 \quad (8)$$

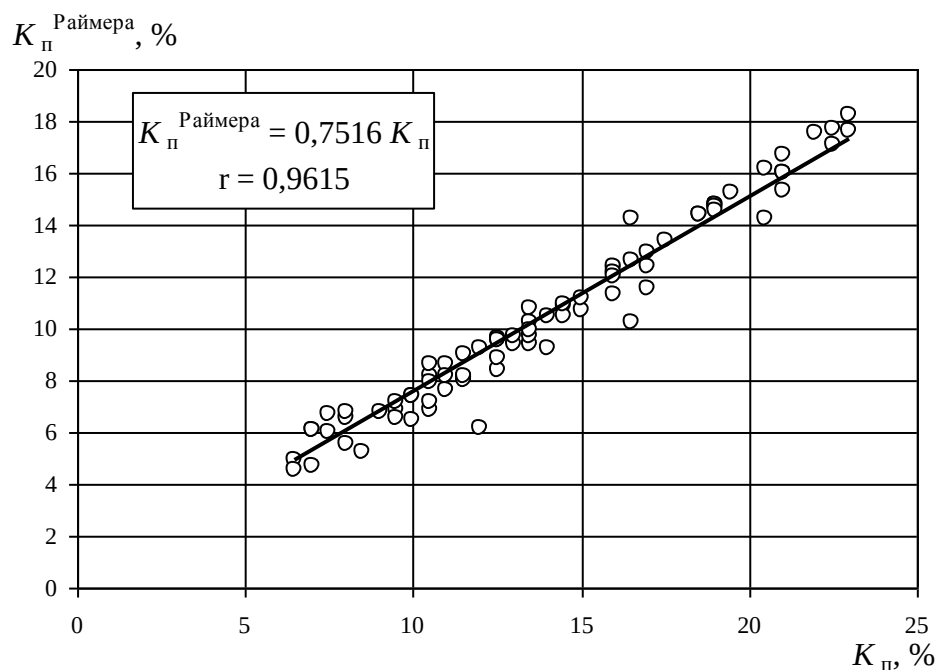


Рисунок 5 – Зіставлення пористості визначеної за моделлю Раймера з пористістю визначеною за даними дослідження керну (для глинистих порід-колекторів)

отримана модель (Рис. 6):

$$K_{\text{п Нова модель}} = 0,7738 \cdot K_{\text{п}}, \quad r = 0,973 \quad (9)$$

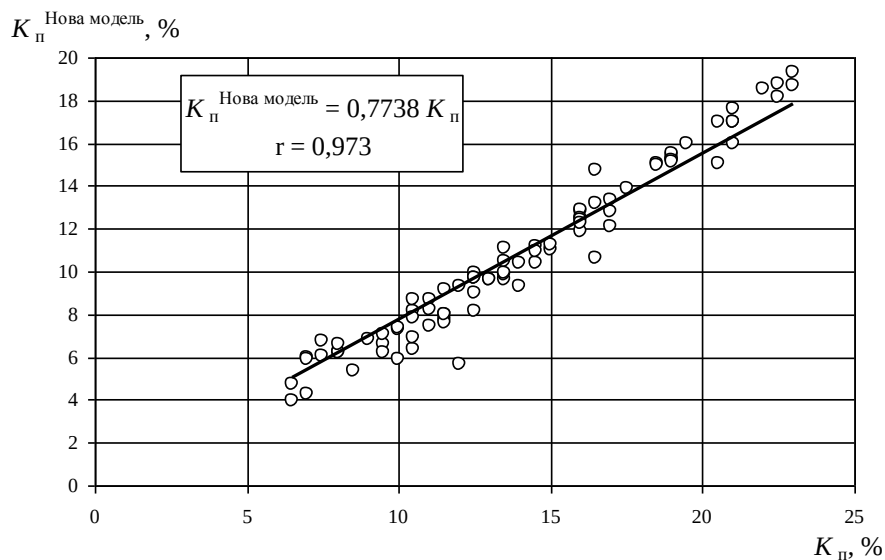


Рисунок 6 – Зіставлення пористості визначеної за отриманою моделлю з пористістю визначеною за даними дослідження керну (для глинистих порід-колекторів)

Висновки. Проводячи аналіз петрофізичного моделювання врахування глинистості різними способами (Рис. 7), необхідно зазначити, що при використанні степеневі функції $1/10^{1-\text{апс}}$ або $1/10^{\Delta \mu}$ кореляційний зв'язок між пористістю, визначеною за даними дослідження керну, та за запропонованими моделями стає дещо меншим у порівнянні з функціями, які запропоновані фірмою *Schlumberger* та С.С. Муц. У свою чергу, необхідно зазначити, що при використанні експоненційної функції кореляційний зв'язок між вищезгаданими

параметрами зростає від 0,865 до 0,973, тобто підвищується інформативність результатів акустичного каротажу при визначенні пористості глинистих порід-колекторів.

Таким чином, при визначенні пористості за результатами досліджень акустичного каротажу доцільніше враховувати вплив глинистості шляхом введення поправки експоненційної функції подвійного різницевого параметру природної радіоактивності.

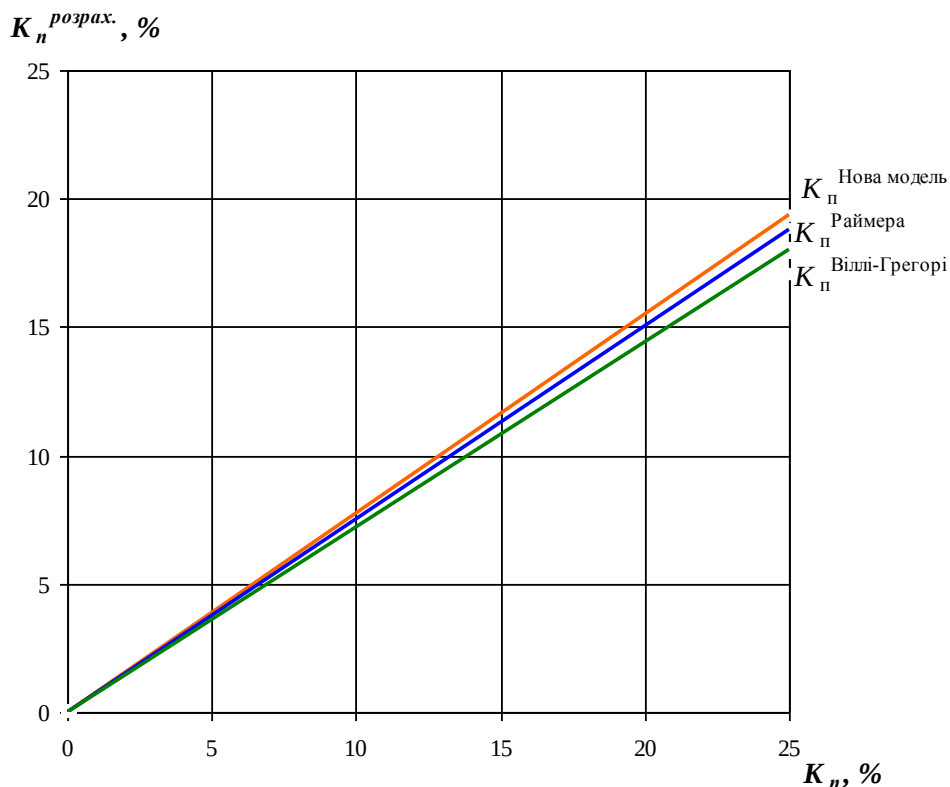


Рисунок 7 – Порівняльний аналіз моделей визначення пористості за даними АК з врахуванням глинистості колекторів

Література

1. Дахнов В.Н. Геофизические методы определения коллекторских свойств и нефтегазонасыщения горных пород / В.Н. Дахнов – М.: Недра, 1975. – 344 с.
2. Интенберг С.С. Интерпретация результатов геофизических исследований разрезов скважин / С.С. Интенберг – М.: Недра, 1972. 312с.
3. Методические рекомендации по определению подсчетных параметров залежей нефти и газа по материалам геофизических исследований скважин с привлечением результатов анализов керна, опробования и испытаний продуктивных пластов: Под. ред. Б.Ю. Вендельштейна, В.Ф. Козяра, Г.Г. Яценко. Калинин: НПО “Союзпромгеофизика”. 1990. 261 с.
4. Вендельштейн Б.Ю. Геофизические методы определения параметров нефтегазовых коллекторов (при подсчете запасов и проектировании разработки месторождений) / Б.Ю. Вендельштейн, Р.А. Резванов – М.: Недра, 1978. – 318 с.
5. Сильвейн Дж. Пирсон Справочник по интерпретации данных каротажа – М.: Недра, 1966. – 414 с.
6. Булатова Ж.М. Акустический каротаж / Ж.М. Булатова, Е.А. Волкова, Е.Ф. Дубров. – Л.: Недра, 1970. – 264с.
7. Козяр В.Ф. Акустические исследования в нефтегазовых скважинах - состояние и направления развития / В.Ф. Козяр, Д.В. Белоконов, Н.В. Козяр, Н.А. Смирнов // НТВ “Каротажник”. – Тверь: ГЕРС. – 1999. – Вып.63. – С. 11 – 117.
8. Lavigne J.C. Methods and apparatus for acoustic logging through casing. [Schlumberger Technology Corp.]: Пат. кл. 340 – 15.5 ВН, (G01V1/40), № 3909775 США/ J.C. Lavigne; Заявл. 26.10.73, № 409.788; Опубл. 30.09.75.
9. Бондаренко М.С. Определение пористости глинистых пород в обсаженных нефтегазовых скважинах с помощью радиоактивного и акустического каротажа / М.С. Бондаренко, В.В. Кармазинко, Г.О. Кашуба, В.В. Кулик // Геофизический журнал. – 2010. – №2. – Т. 32. – С. 110 – 120.
10. Муц С.Є. Врахування глинистості порід-колекторів при визначенні коефіцієнта пористості за матеріалами акустичного каротажу / С.Є.Муц // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – Івано-Франківськ. – 2010. – №1(34). – С.132-137.
11. Розловська С.Є. Врахування глинистості порід-колекторів при визначенні коефіцієнта пористості за матеріалами акустичного каротажу / С.Є. Розловська, Н.С. Ганженко, К.І. Муц // Гео-динаміка. – 2013. – №1(14). – С. 154 – 159.

ИСТОРИЧЕСКИЕ НАУКИ

УДК: 9; 94

Крайнова Любовь Николаевна,

к.и.н., доцент ГАУ ДПО ИО

«Региональный институт кадровой
политики и непрерывного
профессионального образования»

Цыдэнэ Ширан Цыденович,

магистр, учитель истории и обществознания,

Амитхашиинской СОШ

Агинского бурятского округа,

Забайкальского края

Манжигеев Алексей Флорианович,

старший научный сотрудник, ЛРЭИ,

Байкальский государственный университет

Печатается при поддержке РФФИ, проект 18-514-94002

МОНГОЛЬСКИЙ ЯЗЫК В СИСТЕМЕ ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ИМПЕРИИ В XIX – НАЧАЛЕ XX В.

В статье раскрываются особенности изучения монгольского языка в системе образования Российской империи в конце XIX – начале XX века. Уделено внимание истории и причинам становления изучения монгольского языка. Рассматриваются проблемы и особенности изучения монгольского языка, образовательные учреждения, программы, основные этапы становления монголоведческого языкознания в Российской империи. При изучении данной проблемы использованы архивные документы, ранее которые не имели широкой публикации в научной печати.

Ключевые слова: монгольский язык, образование, учебные заведения, преподавание, факультет восточных языков.

Актуальность темы обусловлена изучением вопроса, который важен для любого государства на разных исторических этапах: подготовка специалистов для выстраивания отношений с соседними государствами. Для России этот вопрос стоит особенно остро, так как огромные пространства и протяженная граница определяет соседство с большим количеством государств. Среди этих государств – Монголия. С этой страной у России всегда были только дружеские отношения, основанные на культурных, экономических, торговых связях. Кроме того, в Российской империи проживало большое количество народов монголоязычных: бурятов, калмыков. Поэтому изучение монгольского языка, подготовка специалистов для выстраивания отношений с местным населением – инородцами, являлась важной задачей системы образования.

Новизной работы является введение в оборот нового архивного источника, документа Государственного архива Иркутской области: «Краткий обзор современной организации преподавания восточных языков в русских учебных заведениях». В данном документе раскрываются особенности изучения всех восточных языков, известных на тот момент, однако в исследовании используются только сведения, касающиеся исследования только монгольского языка. Несомненно, что данный документ дает уникальные сведения о состоянии преподавания не только языков, но и того образования, которое получали студенты будущие ди-

пломаты, военные по истории, этнографии, экономике, культуре изучаемых народов.

Целью исследования является изучение вертикали системы российского монголоведческого языкознания в XIX – начале XX века.

Задачи исследования: рассмотреть причины побудившие сформировать сеть учебных заведений, готовивших специалистов со знанием монгольского языка; рассмотреть систему российского образования и учебные заведения, в которых изучался монгольский язык; выявить основные проблемы связанные с данным направлением образования; показать позитивный опыт образовательных учреждений Российской империи, который может быть заимствован современной системой образования.

В XIX в. Россия представляла собой огромное многонациональное, поликонфессиональное государство. Происходило постоянное расширение территории за счет присоединения новых земель на Кавказе, в Причерноморье, в Средней Азии. Активно развивалась торговля со странами Дальнего Востока: Китайской империей, Японией. Возникла необходимость отстаивать интересы России в международных торгово-экономических вопросах в данном регионе со странами Запада.

Для управления и ведения такими делами нужны были люди, которые не только владели бы основами административно-хозяйственного управления, но и знали бы языки, местные традиции, религиозные обычаи. Кроме того, само гео-

графическое положение России, протяженность границ, соседство с большим количеством государств, ставило необходимым вопрос о подготовке специалистов со знанием не только европейских, но и восточных языков, таких, как арабский, персидский, турецкий, языков народов Кавказа, языки народов Дальнего Востока: китайский, маньчжурский, японский и монгольский.

Высокий интерес в XIX веке был, и не без основания, к изучению монгольского языка. Его изучали в учительских семинариях, в духовных семинариях, в специальных учебных заведениях для подготовки толмачей и переводчиков, в высших учебных заведениях. Интерес к изучению монгольского языка объясняется тем, что: во-первых, в России существовало много народностей, особенно в Восточной Сибири, в предгорье Саян, на Дальнем Востоке, в южном и среднем Приуралье, говоривших на разных наречиях данного языка, так называемые инородцы. Во-вторых, в Восточной Сибири, на юге Западной Сибири, на Дальнем Востоке, и даже в некоторых районах Центральной России, таких как Калмыкия, население исповедовало Буддизм в форме ламаизма. Монгольский язык для этих народов был еще и значимым носителем религиозной информации: ведь огромное количество ламаистских книг написаны на монгольском или тибетском языках. В-третьих, Россия вела активную торговлю через Монголию с Цинской империей, не говоря уже о том, что Монголия была ближайшим соседом России в Восточной Сибири. Невозможно было наладить отношения с местным населением, урегулировать вопросы веры, административно-хозяйственного устройства, торгово-промышленных отношений как внутри Российской империи, так и за ее пределами без знания языка. Как же решался данный вопрос в России в XIX – начале XX века?

Проблема изучения монгольского языка стояла очень остро: нехватка педагогов, владеющих языком, отсутствие учебных пособий, недостаточность финансирования. Чаще всего обучение сводилось к переписке и чтению монгольских книг, взятых из ламаистских храмов. «Из дел Иркутской духовной консистории видно, что епископ Иннокентий обратился в провинциальную канцелярию, чтобы она истребовала от забайкальских лам нужные для школы книги, которые по переписке будут возвращены» [3, с. 101]. Элементарное отсутствие словарей и учебных пособий являлось существенной проблемой.

Несомненно, большой вклад в изучение монгольского языка внесли исследователи Иркутской губернии. В первой половине XIX в. в Иркутской духовной семинарии преподавал монгольский язык Александр Ильич Бобровников (1793-1832). Н.О. Шаракшинова пишет о том, что Бобровников А.И. в совершенстве владел монгольским языком, занимался переводом на монгольский язык христианских сочинений, проявлял глубокий интерес к «Гэсэру». Он написал монгольскую грамматику, опубликованную в 1835 г. в Петербурге [5, с.131-

132]. Его сын – Алексей Александрович Бобровников, Продолжая дело отца, получил монголо-ведное образование в Казанской духовной академии и Казанском университете. Он издает грамматику монголо-калмыцкого языка, получившую высокую оценку в научном мире и удостоенную Академией наук Демидовской премии [1, с.17].

В фонде редкого хранения Научной библиотеки Иркутского университета, наряду с другими раритетами, находится рукописный «Русско-бурятско-монгольский словарь», датированный 1872 г. До наших дней сохранилось, к сожалению, только два тома этого словаря, состоящего из 15 книг [1, с. 23]. В 1909 г. И.А. Подгорбунский издал в Иркутске «Русско-монголо-бурятский словарь» (304 страниц), а в 1910 г. опубликовал «Материалы для грамматики разговорного бурятского языка», посвятив их монгольским глаголам, причастиям и деепричастиям [1, с. 26]. Но это уже начало XX в., однако интерес к изучению монгольскому языку, появился значительно раньше.

В России в XIX в. существовала сеть учебных заведений, в которых изучались необходимые восточные языки, в том числе и монгольский.

Монгольский язык изучался в некоторых учебных заведениях Восточной Сибири, где знание его было весьма актуально: ведение торговли с монгольскими купцами, урегулирование отношений с местным населением и родственные связи многих аборигенов с монголами в приграничных районах, которое в большинстве своем не владело русским языком, исповедование буддизма местным населением. Все это делало необходимым владением монгольским языком в данном регионе и наличие переводчиков и «толмачей».

Невнимание властей к этой проблеме иногда доходило до абсурда. Известный исследователь экономических отношений России и Монголии д.и.н. Старцев А.В. в своей книге «Русская торговля в Монголии (вторая половина XIX – начало XX в.)», приводит пример, как назначенный в Урге Генеральный консул «...А.Я. Миллер с удивлением обнаружил, что ни один из консульских служащих не знал монгольского языка» [4, с.78]. «Возможно – писал один из исследователей, – что для дипломата знание языка именно той культурной страны, в которой он несет свою службу, и не является насущно необходимым, тем более что в распоряжении каждого дипломата всегда есть общепринятый в дипломатических кругах французский язык, но совсем иначе обстоит дело в некультурных странах Дальнего Востока, где незнание туземного языка чинами консульства является криминальным» [4, с. 78].

Несмотря на такую нелестную оценку современника, стоит обратить внимание на тот факт, что в самой Монголии с 1884 г. существовало две школы: в Урге и Кульдже. «Ургинская школа предназначена для удовлетворения нужд преимущественно Восточной Сибири и Томской губернии, и в виду этого в упомянутой школе положено преподавать имеющее значение для названных

местностей языки: маньчжурский, монгольский (и тот и другой письменный и разговорный), китайский (разговорный и отчасти письменный)...» [2, д.68 л. 5]. Заведывание и руководство школами возлагалось на консулов. Доступ в школы был открыт для всех сословий, не моложе шестнадцати лет, но предпочтение оказывалось лицам «казачьего сословия». Курс обучения составлял 5 лет, но если учащиеся не успевали освоить удовлетворительно язык, то они могли остаться еще на один год обучения.

«Насколько можно судить, по отзывам ургинских консулов и Приамурских генерал-губернаторов, рассматриваемые школы находятся в неблагоприятных условиях для надлежащей постановки в них преподавания. ... Несмотря на это, ученики благодаря постоянному общению с туземцами, делают в течение 5 летнего курса заметные успехи в изучении восточных языков и затем вполне удовлетворительно справляются с обязанностями переводчиков» [2, д. 68 л.6].

Недостаток в специалистах, знающих монгольский язык, ощущался очень сильно. Объясняет данный факт то, что было очень мало учебных заведений, которые уделяли бы данному вопросу должное внимание. Более того, не везде обучение велось качественно. Так, например, в Читинской семинарии (с мая 1900 г.) преподавание языка «...происходит с большими перерывами, ввиду постоянных затруднений, связанных с приисканием вполне отвечающим своему назначению учителей. В настоящее время монгольский язык преподается во всех классах Читинской семинарии, при четырехнедельных уроках в каждом классе» [2, д. 68 л. 6]. Особой программы преподавания не существовало, и оно ограничивалось «сообщением учащимся главнейших сведений по этимологии и синтаксису и упражнениям в переводах монголо-бурятских текстов, как современных официальных, так и классических» [2, д.86 л.6]. Причем, изучение данного языка было «...обязательно лишь для воспитанников из инородцев, русские же воспитанники могут изучать ... по желанию» [2, д.86 л.6].

Так же стоит упомянуть Иркутскую семинарию, в которой с 1906 года преподавался «монголо-бурятский язык (монгольский литературный и бурятский разговорный)» [2, д.68 л.4 об]. В духовных семинариях и училищах Иркутска уделялось значительное внимание изучению монгольского языка, а также шаманизма и ламаизма. По данным Ш.Б. Чомторжиева, в классе монгольского и бурятского языков иркутской семинарии обучалось: в 1851 г. – 43 ученика, в 1855 – 49 учеников, 1860 – 46 учеников, в 1876 – 44 учениках [5, с.173]. Составители учебных планов духовных училищ Иркутска считали необходимым для священнослужителей знание монгольского языка [1, с.17].

Кроме средних и специальных учебных заведений, монгольский язык изучался, наравне с другими восточными языками, и в высших учебных заведениях.

«Включение восточных языков и вообще предметов востоковедения в программы преподавания высших учебных заведений гражданского ведомства совпадает с изданием Университетского устава 1804 г. Именно этим уставом, предназначенным для преобразования Московского и вновь Утвержденных Харьковского и Казанского университетов, предусмотрена была в составе отделения восточных наук кафедра восточных языков (без указания каких именно). В следующем уставе 1835 г., касавшемся кроме вышеупомянутых трех университетов, так же и открытого в 1819 г. Санкт-Петербургского университета, уже определенно перечисляются предложенные к преподаванию в этих учебных заведениях восточные языки; а именно: а) арабский, турецкий и персидский и б) монгольский и татарский» [2, д.68 л.7].

Однако, отсутствие программ, специалистов, а также должного количества слушателей, не привели к желаемым результатам. «И тогда возникла мысль о сосредоточении занятий по востоковедению в Санкт-Петербургском университете. Так возник в силу Высочайшего Указа 22 октября 1854 г. в Санкт-петербургском университете факультет восточных языков; в то же время преподавание этих языков в других университетах (кроме Дерптского) было прекращено. Являясь, таким образом, почти единственным высшим учебным заведением с преподаванием восточных языков, упомянутый факультет долгое время удовлетворял потребности России, как в ученых ориенталистах, так и в практических деятелях, знакомых с языками Востока» [2, д.68 л.7].

До 1907 года в Санкт-Петербургском университете на факультете восточных языков существовала кафедра монгольского и калмыцкого языков, кафедра китайского языка.

На факультете существовали следующие отделения по изучению восточных языков:

- а) арабо-персидско-турецко-татарский,
- б) китайско-маньчжуро-монгольский,
- в) еврейско-арабский,
- г) армяно-грузинско-персидский, и
- д) санскритско- персидско-армянский [2, д.68 л.8].

После 1907 г. отделение китайско-маньжуро-монгольское было поделено на два: китайско-маньчжурское и монголо-маньжуро-татарское, а так же было добавлено отделение китайско-японское.

Программа обучения включала в себя занятия по следующим языкам:

- 1) Монгольский язык (8 семестров)
- 2) Маньчжурский язык (6 или 4 семестра);
- 3) Турецко-татарские наречия (джагатайское, киргизское, уйгурское и орхонское – 4 или 6 семестров);
- 4) Китайский язык (2 семестра).

И, кроме того, в течение 6 или 8 семестров изучался такой предмет как «История Востока» [2, д.68 л.8 об-9].

«Студенты по своему выбору могут обращать больше внимания на маньчжурский язык или на турецко-татарские наречия и, соответственно, поэтому слушать один из этих предметов в течение 6 семестров, а другой – 4 семестра» [2, д.68 л.9].

Практические занятия существовали только по монгольскому языку, так же был дополнительный предмет – «Введение в языкознание».

Более полная программа изучения языков Дальневосточного региона и политико-экономических и этнографических особенностей, существовала в Восточном институте во Владивостоке, который был открыт осенью 1899 г. Целью обучения в данном учебном заведении было «...подготавливать учащихся в нем лиц к службе в административных и торгово-промышленных учреждениях восточно-азиатской России и прилегающих к ней государств» [2, д.68 л.13].

Особую категорию слушателей института составляли офицеры, которые командировались распоряжением военного начальства [2, д.68 л.14].

Курс института был рассчитан на 4 года. После первого года обучения шло деление на 4 основных отделения:

- 1) японско-китайское,
- 2) корейско-китайское,
- 3) китайско-монгольское,
- 4) китайско-маньчжурское [2, д.68 л.14 об.].

Обязательными предметами для изучения на всех отделениях были: 1) богословие, 2) китайский язык, 3) английский язык, 4) общая география и этнография Китая, Кореи и Японии с общим обзором их политического устройства и религиозного быта; 5) политическая организация современного Китая и обзор его торгово-промышленной деятельности, 6) Новейшая история /XIX века/ Китая, Кореи и Японии, в связи с историей сношений России с этими странами; 7) коммерческая география восточной Азии и история торговли дальнего Востока, 8) Политическая экономия; 9) Международное право; 10) обзор государственного устройства России и главнейших европейских держав; 11) основы гражданского и торгового права и судопроизводства; 12) счетоводство и 13) товароведение [2, д.68 л. 15].

Так же в качестве необязательных предметов читались французский и тибетские языки.

Существовали специальные предметы для изучения на каждом языковом отделении. На китайско-монгольском отделении такими предметами являлись монгольский язык и обзор политического устройства и экономического строя Монголии, «с выяснением значения для него ламаизма и обзор торгово-промышленной деятельности этой страны». Монгольский язык изучался со второго года по 6 часов каждую неделю в течение 2,3 и 4 года обучения. На первом же году обучения изучался китайский язык, и затем продолжалось его

изучение на протяжении всего курса обучения параллельно с монгольским языком. Такая практика изучения объясняется тем, что Монголия до 1911 г. входила в состав Цинской империи, и знание китайского языка было как само собой разумеющееся для работы в Монголии [2, д.68 л.15].

В каникулярное время, для усовершенствования языка и практического ознакомления со странами Востока, в каникулярное время, «по усмотрению конференции института», студенты командировались за границу, «на каковой предмет ежегодно отпускается из казны по 3.500 руб.» [2, д.68 л.15 об.]. Причем такая возможность, посещать страну изучаемого языка, в течение трех лет предоставлялась каждому студенту [2, д.68 л.16].

Во время подобных командировок студентам младших курсов рекомендовалось заниматься исключительно практическим изучением языка, «и только слушатели старших курсов получают специальные задачи по изучению страны в том или ином отношении в зависимости от индивидуальных наклонностей каждого. О своих летних занятиях студенты предоставляют отчет» [2, д.68 л.16].

В 1789 г. в Омске была учреждена «азиатская школа» для приготовления переводчиков по татарскому, монгольскому и маньчжурскому языкам.

Таким образом, из всего выше сказанного, мы видим, что изучению монгольского языка в Российской империи уделялось должное внимание. Монгольский язык, по возможности изучался на всех уровнях образования. Правительство, ученые, коммерсанты, промышленники, миссионеры, были заинтересованы в развитии отношений с Монголией. Изучение языка способствовало так же урегулированию отношений с монгологоворящими народами России. Поэтому сложно не оценить проблему изучения монгольского языка для России не только в XIX-XX вв., но и в наше время.

Литература

1. Кузьмин Ю.В., Свинин В.В. История изучения Монголии в Иркутске. Иркутск: Изд-во БГУЭП, 2006. С. 114 с.
2. Областное Государственное учреждение Государственный архив Иркутской области. Ф. 25, оп.30, к. 1395, д. 68. Краткий обзор современной организации преподавания восточных языков в русских учебных заведениях.
3. Романов Н. Воспоминания // Библиофил Сибири. – Иркутск: 1988. – С. 95-161
4. Старцев А.В. Русская торговля в Монголии (вторая половина XIX – начало XX в.): монография. – Барнаул: Изд.-во Алт.ун-та, 2003. 308 с.
5. Чимитдоржиев Ш.Б. Россия и Монголия. – М.: Главная редакция восточной литературы, 1987. 235 с.
6. Шаракшинова Н.О. Монголовед Алексей Бобровников // Байкал. – 1998. - №3. – С.131-132

НАУКИ О ЗЕМЛЕ

Кузьмина Ирина Владимировна

кандидат технических наук, доцент кафедры ПР МПИ
(Поиска и разведки месторождений полезных ископаемых)
Ухтинский государственный технический университет

АНАЛИТИЧЕСКАЯ КОНЦЕПЦИЯ ОБРАБОТКИ И ИНТЕРПРЕТАЦИИ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ В СТОЛЕ СКАЖИН СЛОЖНОЙ ГЕОМЕТРИИ МЕТОДАМИ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНО ТЕЛЕМЕТРИИ

Аннотация. Визуально, снимками скважинного акустического телевизора (САТ), аргументирован факт влияния геометрии ствола скважин и пространственной ориентации измерительного зонда относительно центральной оси ствола на результаты геофизических исследований. Приведены публикации, в которых последовательно изложены этапы решения задачи по исключению влияния негативных факторов на геофизические материалы. В общем виде изложена аналитическая концепция обработки и интерпретации, геофизических полей искажённых сложной геометрией ствола скважин. Математически аргументировано искажение геофизического поля деформированием элемента массы определённой природы. Присвоен статус элементу (датчику) дифференциального измерительного преобразователя для оценки его взаимодействия с другими элементами в области «видимости» скалярных и векторных геофизических полей. Определена шкала взаимосвязей между случайными событиями в счётном пространстве случайных процессов.

Ключевые слова: дифференциальный измерительный преобразователь, гравитационная навигация, деформированный элемент массы, скалярное и векторное геофизическое поле, шкала случайных величин.

Введение

Прагматический подход к геофизическим исследованиям ствола скважин сложной геометрии показал, что к основным причинам, снижающим качество результатов исследований, относится отсутствие веских аргументов, с необходимой вероятностью определяющих изменение геометрии ствола скважин и смещение измерительного зонда с центральной её оси. До настоящего времени вопрос степени влияния геометрии ствола наклонно направленных, разветвлённо-горизонтальных и горизонтальных скважин на качество результатов геофизических исследований остаётся открытым. И в то же время, существуют убедительные аргументы, свидетельствующие о влиянии геометрии ствола скважины и смещения измерительного зонда скважинной телеметрической системы на качество результатов исследований ствола сложной геометрии геофизическими методами.

Убедительным аргументом служат акустические снимки геофизического метода визуальных исследований ствола скважин аппаратурой САТ (скважинным акустическим телевизором), [2, стр. 35]. На рис. 1 приведены снимки акустического

телевизора полученные в стационарной метрологической установке. На рис. 1, а показана симметрия измерительной системы, т. е. правильна геометрия (идеальный круг) ствола скважины и совпадение оси симметрии измерительного зонда с осью симметрии ствола скважины. В результате, однородная контрастность (чисто-белая) акустического снимка развёртки поверхности ствола скважины, свидетельствует об оптимизации геометрического фактора и измерительного зонда.

Рис. 1, б иллюстрирует о нарушении одного из геометрических факторов – измерительный зонд телеметрической системы смещён на некоторую величину относительно центральной оси скважины.

В результате смещения измерительного зонда, на акустическом снимке появились области с различной контрастностью, их диапазон меняется от «чисто-белой» до «контрастно-чёрной».

Ещё более сложный характер акустические снимки приобретают в случае одновременного изменения геометрии ствола скважины и случайной ориентации измерительного зонда в её стволе (рис. 1, в и рис. 1, г).

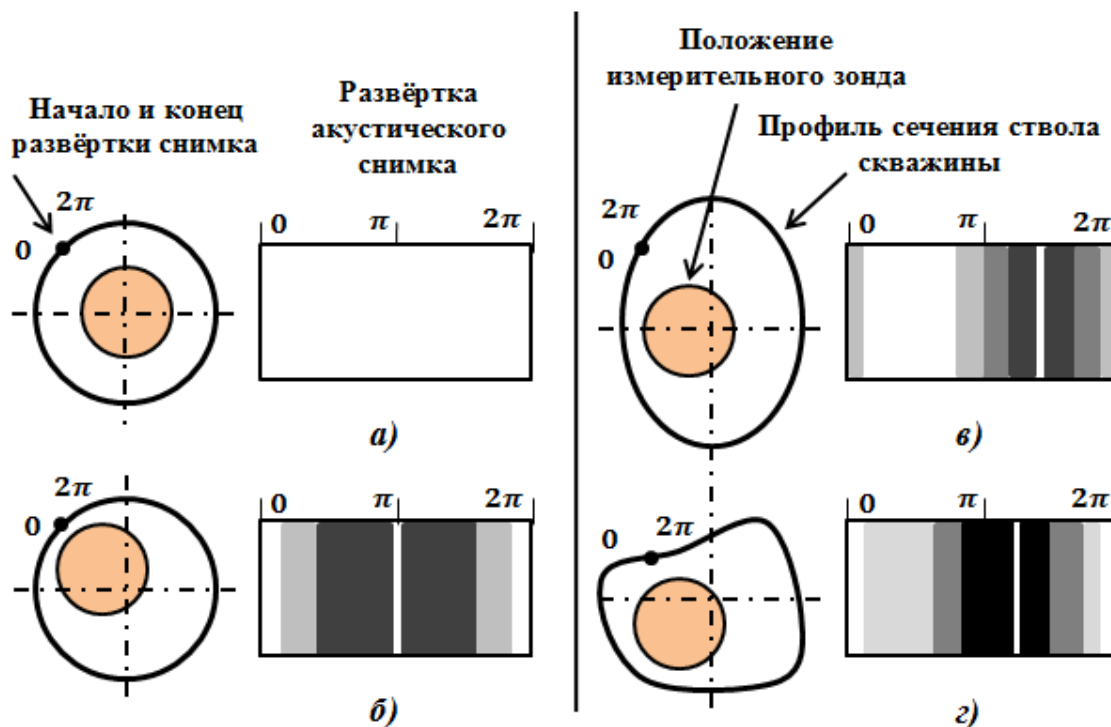


Рис. 1. Иллюстрация факта влияния геометрии ствола скважины и пространственной ориентации измерительного зонда скважинного акустического телевизора (САТ) на качество акустических снимков (для наглядности и простоты снимки идеализированы).

В реальных условиях, результаты исследований ствола скважины телеметрической системой САТ, выглядят гораздо сложнее, и поэтому визуально далеко не всегда удаётся по акустическому снимку отличить изменение геометрии ствола скважины от смещения измерительного зонда от-

носительно её оси (рис. 2). В данном случае, вероятность ошибки при интерпретации снимков САТ, составляет $\approx 50\%$.

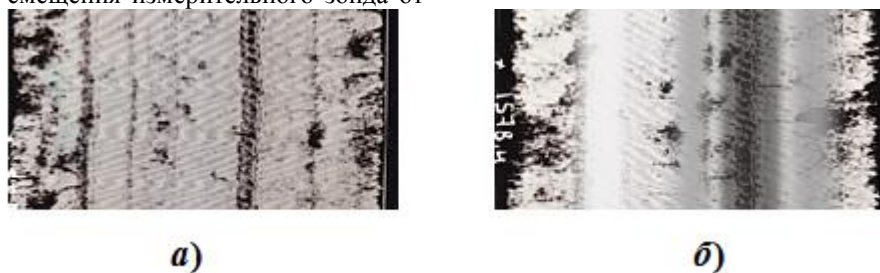


Рис. 2. Акустические снимки интервалов обсадной колонны в стволе вертикальной скважины, полученные скважинным акустическим телевизором (САТ):

- а) измерительный зонд устойчиво центрирован на оси ствола скважины;
- б) на акустическом снимке наблюдаются области искажения (серые вертикальные полосы различной контрастности).

Что же касается других геофизических методов исследований, где результаты отображаются в виде диаграмм, а скважинные телеметрические системы не регистрируют фон ствола скважины, то проблема геометрии ствола и смещения измерительного зонда, превращаются в комплексную и многозначную задачу, требующую решения.

Решение этой непростой задачи необходимо проводить в едином составе, одновременно решая

технические, технологические и методические задачи.

1. Анализ последних исследований и публикаций

В публикации [4, стр. 26 – 36, с. 29] был представлен дифференциальный измерительный преобразователь с гравитационной навигацией (ДИ-ПсГН) в стволе скважин сложной геометрии. На рис. 3 приведена конструкция ДИПсГН.

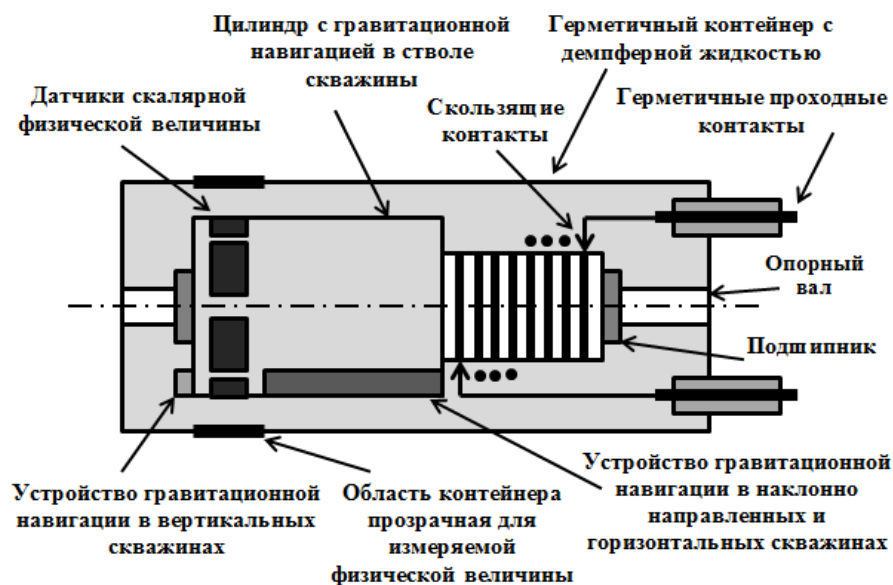


Рис. 3. Конструкция дифференциального измерительного преобразователя с гравитационной навигацией в стволе скважин сложной геометрии и пространственной ориентации.

Далее, возникла необходимость усовершенствовать ДИПсГН для работы в измерительных каналах современных скважинных телеметрических систем. На рис. 4 показан усовершенствованный вариант ДИПсГН. Для изучения его технических характеристик и динамики поведения в скважинных условиях агрессивных сред, на его основе был создан ДИПсГН для измерительного канала простейшего геофизического метода исследований технического состояния обсадных колонн – метода

магнитной локации муфт (МЛМ). С этой целью в область «датчики регистрации физической величины» (рис. 4) был помещён комплект катушек индуктивности, расположенных в постоянном магнитном поле (рис. 5). Для изучения поведения ДИПсГН в условиях ствола скважин сложной геометрии и качества работы в измерительном канале геофизического метода МЛМ, была разработана метрологическая установка. Схема конструкции метрологической установки приведена на рис. 6.

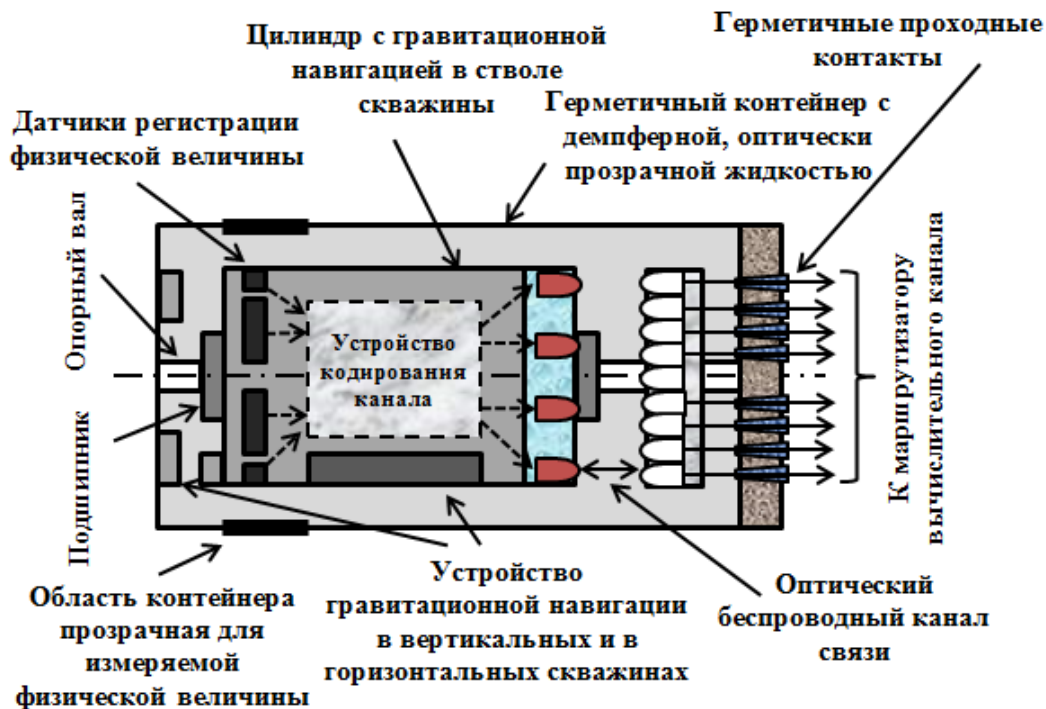


Рис. 4. Усовершенствованная конструкция дифференциального измерительного преобразователя с гравитационной навигацией в стволе скважин сложной геометрии.

Для имитации стенок обсадных колонн неправильной геометрии, метрологическую установку оснастили калибровочными скобами, имитирующими различную степень деформации обсадных колонн и дефекты их поверхности (рис. 7). Этот технический комплекс позволил детально изучить поведение ДИПсГН в скважинах сложной геометрии и математически аргументировать эффективность ДИПсГН в измерительных каналах стандартных телеметрических систем. Результаты научных исследований были опубликованы в [5, стр. 861 – 870].

2. Формулирование задачи в общем виде

Экспериментальные исследования с ДИПсГН в метрологической установке дали положительные результаты, а математическая аргументация функциональных особенностей ДИПсГН (математическое моделирование процесса измерения) позволили сделать вывод: «Конструкция ДИПсГН позволяет использовать его в измерительных каналах стандартных скважинных телеметрических систем различных геофизических методов». Для этого достаточно в области «датчики регистрации физической величины» (рис. 4) установить необходимые измерительные преобразователи, способные регистрировать скалярные и векторные геофизические поля в стволе скважин сложной геометрии.

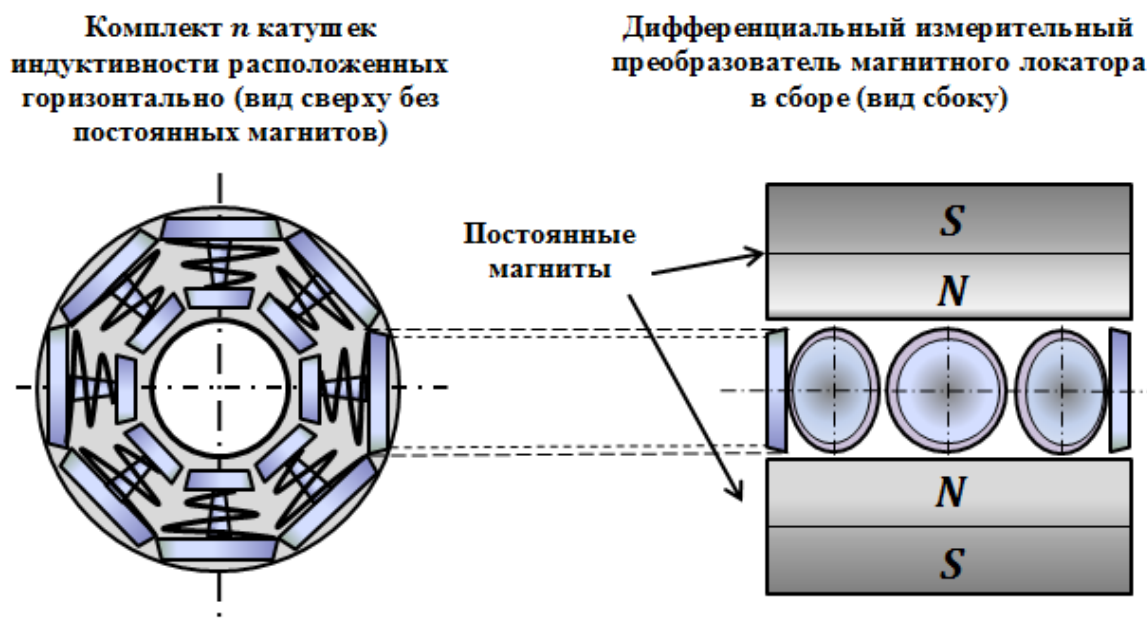


Рис. 5. Конструкция датчиков дифференциального измерительного преобразователя для измерительно-го канала геофизического метода исследований обсадных колонн – метода магнитной локации муфт.

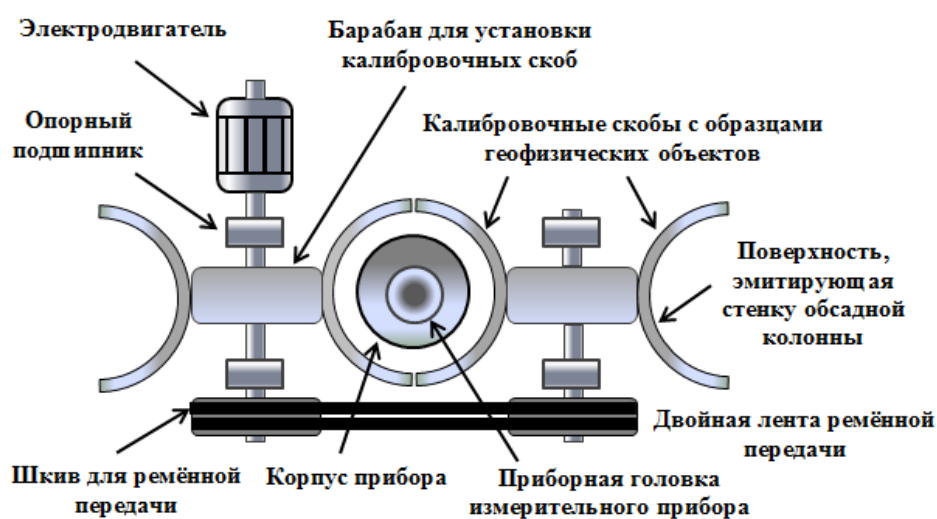


Рис. 6. Схема конструкции метрологической установка для экспериментальных исследований поведения дифференциального измерительного преобразователя геофизического метода магнитной локации муфт в скважинных условиях (вид сверху).

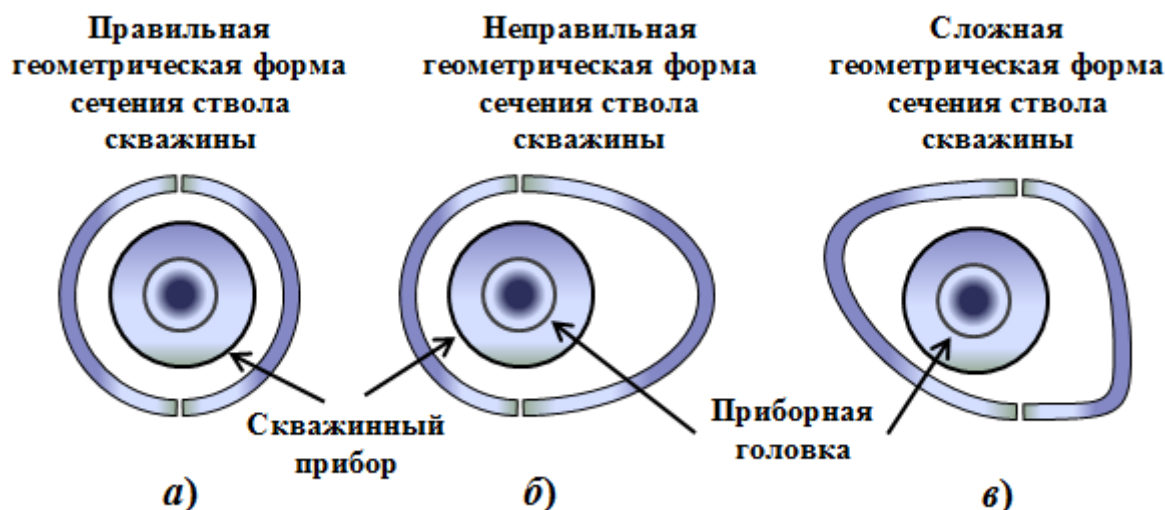


Рис. 7. Калибровочные скобы, имитирующие на метрологической установке различную степень деформации обсадных колонн и дефекты их поверхности (вид сверху).

Целью исследования геофизических полей, создаваемых различными массами в стволе скважин сложной геометрии является повышение уровня производительности нефтяных скважин.

Модернизация стандартных скважинных телеметрических систем посредством установки на них ДИПсГН, позволит заметно повысить качество геофизического материала, а, следовательно, и достоверность геологической и геофизической информации. В настоящее время от качества и достоверности геологической и геофизической информации зависят объёмы извлечения углеводородов из нефтяных и газовых месторождений.

3. Аналитическая обработка и интерпретация геофизических полей, искажённых сложной геометрией ствола скважин (общий вид)

С позиции технического устройства ДИПсГН представляет собой комплект датчиков, реагирующих на заданную физическую величину. Особенность такой конструкции позволяет одновременно следить за динамикой физической величины, за изменением геометрии ствола скважины и за смещением измерительного зонда относительно центральной оси скважины (в скважинах сложной геометрии этот параметр весьма условный). В данном случае под физической величиной понимаются массы одной природы, вокруг которых образуются скалярные, векторные или тензорные (анизотропия горных пород, турбулентные течения флюидов и т. п.) геофизические поля. Исключением составляют геофизические поля, одновременно создаваемые массами различной природы, на которые одновременно реагирует измерительный преобразователь скважинной телеметрической системы.

Для простоты и наглядности физических процессов, под массами одной природы следует понимать массы m , взаимодействующие по закону обратной пропорциональности квадрату расстояния. То есть, гравитационные массы, взаимодействующие по закону Ньютона; электрические (за-

ряды) и магнитные массы, взаимодействующие по законам Кулона. В этом случае, массы одной природы можно объединить под одним общим символом m [1, стр. 109]:

$$m = \begin{cases} m_E = e - \text{электрические заряды;} \\ m_M - \text{магнитные массы;} \\ m_G - \text{гравитационные массы.} \end{cases} \quad (1)$$

Понятие, объединённое общим символом m (1), физически фиктивно, но математически наглядно и удобно для изучения закономерностей взаимодействия материальных тел между собой.

Скалярные и векторные геофизические поля образуют в стволе скважины объёмные, поверхностные и линейные массы. Эти массы m в точке P пространства определяются соотношениями: объёмной плотности $\rho(P)$, поверхностной плотности $\sigma(P)$ и линейной плотности $\tau(P)$ [6, стр. 35]:

$$\rho(P) = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta m}{\Delta V}; \quad \sigma(P) = \lim_{\Delta S \rightarrow 0} \frac{\Delta m}{\Delta S}; \quad \tau(P) = \lim_{\Delta L \rightarrow 0} \frac{\Delta m}{\Delta L}, \quad (2)$$

где Δm – элемент массы, количество объёмных, поверхностных и линейных единиц массы;
 ΔV – элемент объёма V , в котором содержится точка P ;

ΔS – элемент поверхности S , в котором содержится точка P ;

ΔL – элемент дуги кривой (линии) L , на которой находится точка P .

Все эти массы создают геофизические поля различной конфигурации. Для электрических полей (зарядов) скалярные поля объёмной плотности $\rho(P)$, поверхностной плотности $\sigma(P)$ и линейной плотности $\tau(P)$, определяются следующими соотношениями:

$$\rho(P) = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta q}{\Delta V}; \quad \sigma(P) = \lim_{\Delta S \rightarrow 0} \frac{\Delta q}{\Delta S}; \quad \tau(P) = \lim_{\Delta L \rightarrow 0} \frac{\Delta q}{\Delta L}, \quad (3)$$

где, Δq – количество электрических зарядов, содержащихся в элементе объёма ΔV , в элементе поверхности ΔS и в элементе дуги кривой ΔL .

Если объёмные, поверхностные и линейные массы образуют поле тяготения, то они определяются следующими функциями:

$$\left. \begin{aligned} U(P) &= G \iiint_V \frac{\rho(M) dV(M)}{R(P, M)}; \\ U(P) &= G \iint_S \frac{\sigma(M) dS(M)}{R(P, M)}; \\ U(P) &= G \int_L \frac{\tau(M) dL(M)}{R(P, M)}, \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

где, $\rho(M)$ – объёмная плотность массы в точке M , заполняющая область V ; $\sigma(M)$ – поверхностная плотность массы в точке M , расположенная на поверхности S ; $\tau(M)$ – линейная плотность массы в точке M , расположенная на дуге линии L ;

$R(P, M)$ – расстояние от точек P пространства до точек M области V , S и L ;

G – гравитационная постоянная.

Тройной интеграл (первый сверху) соотношений (4) определяет функцию $U(P)$ поля тяготения или ньютоновский потенциал массы V .

В случае электростатического потенциала, который создаётся дискретными электрическими зарядами $q_1, q_2, \dots, q_n$ в точках $M_1, M_2, \dots, M_n$, то он определяется функцией:

$$\varphi(P) = \sum_{k=1}^n \frac{q_k}{4\pi\epsilon_a R(M_k, P)}, \quad (5)$$

где, ϵ_a – абсолютная диэлектрическая проницаемость;

$R(M_k, P)$ – расстояния от точек M_k до точек P пространства.

В случае если электростатическое поле создаётся зарядами, заполняющими с непрерывной плотностью $\rho(M)$ область V , то электрический потенциал определяется объёмной функцией:

$$\varphi(P) = \iiint_V \frac{\rho(M) dV(M)}{4\pi\epsilon_a R(M, P)}, \quad (6)$$

где, $R(M, P)$ – расстояние от точек M области V до точек P пространства.

Аналогично соотношению (6) определяются электростатические поля, создаваемые плотностью $\sigma(M)$ масс на поверхности S и плотностью $\tau(M)$ на дуге линии L .

Если в пространстве имеется некоторое распределение масс, то по закону Ньютона на единичную массу, помещённую в точку P пространства, действует сила притяжения $\vec{F}(P)$. Эта сила определяет напряжённость поля тяготения в точке P пространства. Напряжённость поля $\vec{F}(P)$ тяготения, порождённая одной точечной массой m_0 , расположенной в точке M_0 , по закону Ньютона, определяется соотношением:

$$\vec{F}(P) = G \frac{m_0}{R^2(P, M_0)} \vec{R}^0(P, M_0), \quad (7)$$

где, G – гравитационная постоянная;

$R(P, M_0)$ – расстояние от точки P пространства до точки M_0 , в которой расположена точечная масса m_0 ;

$\vec{R}^0(P, M_0)$ – единичный вектор, направленный из точки P в точку M_0 .

Вектор напряжённости электрического поля $\vec{E}(P)$, созданного одним точечным зарядом q_0 , помещённым в точку M_0 пространства P , определяется соотношением:

$$\vec{E}(P) = \frac{q_0}{4\pi\epsilon_0 R^2(M_0, P)} \vec{R}^0(M_0, P), \quad (8)$$

где, ϵ_0 – электрическая постоянная.

Соотношения (4), (5), (6) определяют скалярные геофизические поля, а соотношения (7) и (8) определяют векторные геофизические поля. В обычных условиях, когда геофизические поля не искажены деформированными массами, проводить математические операции с векторными и скалярными величинами удобнее в декартовой прямоугольной системе координат. В этом случае математические операции имеют простой и наглядный вид. Правила фундаментальной математики, между скалярными и векторными функциями устанавливают следующие соотношения [3, стр. 168]:

1) в инвариантной форме (независимо от системы координат) и

2) в координатной форме по отношению к правой прямоугольной декартовой системе координат, справедливо тождество:

$$\vec{F}(\vec{r}) \equiv \vec{F}(x, y, z) \equiv F_x(x, y, z)\vec{i} + F_y(x, y, z)\vec{j} + F_z(x, y, z)\vec{k}, \quad (9)$$

где, $\vec{F}(\vec{r})$ – векторная функция;

$\vec{r}$ – вектор, определяющий координаты любой точки пространства;

(x, y, z) – декартовы прямоугольные координаты любой точки пространства;

F_x, F_y, F_z – скалярные компоненты вектора $\vec{F}$;

$\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$ – единичные векторы координатной системы.

В случае деформации массы внешними силами, искажаются и геофизические поля, созданные ими, что приводит к усложнению вычислений. На рис. 8 приведены примеры криволинейной и косоугольной деформации элемента массы dm . Поэтому для вычислений бывает гораздо удобнее использовать криволинейные или косоугольные координаты. Если (x, y, z) – декартовы прямоугольные координаты, а (x_1, x_2, x_3) – криволинейные ортогональные координаты (на рис. 8, б, (x_1, x_2, x_3) показан частный случай криволинейной ортогональной системы координат), то квадрат элемента длины dL в пространстве определяется соотношением [8, стр. 769]:

$$dL^2 = dx^2 + dy^2 + dz^2 = h_1^2 dx_1^2 + h_2^2 dx_2^2 + h_3^2 dx_3^2, \quad (10)$$

где, $h_i = \sqrt{\left(\frac{\partial x}{\partial x_i}\right)^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial x_i}\right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial x_i}\right)^2}$ ($i = 1, 2, 3$) – метрические коэффициенты, или коэффициенты Ламэ.

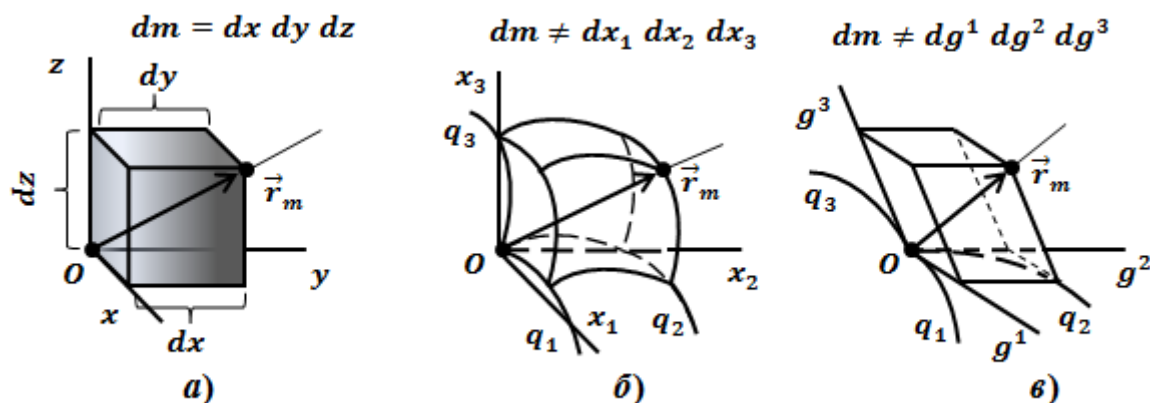


Рис. 8. Иллюстрация деформированного элемента массы dm в различных системах координат:

а) – нормальный элемент массы dm в декартовой прямоугольной системе координат (x, y, z) ; б) – криволинейно (q_1, q_2, q_3) деформированный элемент массы dm в ортогональной системе координат (x_1, x_2, x_3) ; в) – косоугольно $[g^1, g^2, g^3; (1, 2, 3)$ – индексы] деформированный элемент массы dm в криволинейной системе координат (q_1, q_2, q_3) ; вектор $\vec{r}$ элемента массы dm в а), б) и в) имеет разные модули длины.

Ортогональная координатная система полностью характеризуется тремя метрическими коэффициентами h_1, h_2, h_3 . В этом случае скалярные поля, создаваемые деформированной массой, в ортогональной криволинейной системе координат определяются соотношением [8, стр. 769]:

$$\text{grad } u = \sum_{j=1}^3 \frac{1}{h_j} \frac{\partial u}{\partial x_j}, \quad (11)$$

где, grad (градиент скалярной функции) – дифференциальный оператор векторного анализа;

$$\left. \begin{aligned} \text{div } \vec{A} &= \frac{1}{h_1 h_2 h_3} \left[\frac{\partial}{\partial x_1} (h_2 h_3 A_1) + \frac{\partial}{\partial x_2} (h_3 h_1 A_2) + \frac{\partial}{\partial x_3} (h_1 h_2 A_3) \right]; \\ \text{rot } \vec{A} &= \frac{1}{h_1 h_2 h_3} \begin{vmatrix} h_1 \vec{t}_1 & h_2 \vec{t}_2 & h_3 \vec{t}_3 \\ \frac{\partial}{\partial x_1} & \frac{\partial}{\partial x_2} & \frac{\partial}{\partial x_3} \\ h_1 A_1 & h_2 A_2 & h_3 A_3 \end{vmatrix}, \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

где, div (дивергенция векторной функции) и rot (ротор векторной функции) – дифференциальные операторы векторного анализа;

$\vec{A}$ – вектор, создающий векторное поле в пространстве;

A_1, A_2, A_3 – скалярные компонентны вектора $\vec{A}$;

x_1, x_2, x_3 – координатные оси криволинейной ортогональной системы;

h_1, h_2, h_3 – метрические коэффициенты криволинейной ортогональной системы координат.

Соотношения (9) – (12) используются для вычисления степени искажения скалярных и векторных геофизических полей сложной геометрией ствола скважины. Под «скважиной сложной геометрии» понимается неправильная (сложно деформированная) геометрическая форма

u – скалярная функция;

x_j – координатные оси криволинейной ортогональной системы;

h_j – метрические коэффициенты.

Векторные поля, создаваемые деформированной массой, в ортогональной криволинейной системе координат определяются соотношениями [8, стр. 769]:

горной выработки, которая пересекает горные породы геологического разреза в различных направлениях: вертикальные, наклонно направленные, разветвлённо-горизонтальные и горизонтальные скважины с различным профилем заканчивания в продуктивном пласте.

Элементы (датчики) ДИПсГН независимы друг от друга. Поэтому степень «видимости» каждым элементом физической величины в стволе скважины сложной геометрии, будет определяться конфигурацией пространства, зависящего от геометрии ствола. Очевидно, все элементы ДИПсГН, в стволе скважины правильной геометрической формы, и расположенные на её центральной оси, будут регистрировать физическую величину одного значения. При изменении геометрии ствола или смещении измерительного зонда с оси скважины, каждый элемент ДИПсГН будет регистри-

ровать различное значение физической величины (рис. 1, б, в и г), т. е. событие динамики физической величины для каждого элемента ДИПсГН будет автономным, случайным и независимым. Но все элементы ДИПсГН находятся в едином измерительном пространстве, которое определяется геометрией ствола скважины. Следовательно, динамика геометрии ствола скважины и динамика пространственного положения ДИПсГН в стволе, будут влиять на значение измеряемой физической величины. В этом случае n элементов ДИПсГН образуют множество N случайных событий, которые будут взаимодействовать между собой по законам «Теории вероятностей» в пространстве случайных процессов. Представив случайные процессы счётным множеством, нетрудно установить правила и интервал, по которым (и в котором) мо-

жет изменяться регистрируемая физическая величина. Поэтому, заключительный этап интерпретации искажённых геофизических полей, созданных деформированными геометрией скважины условными массам m , сводится к определению связей между событиями, происходящими в стволе скважины.

Если области «видимости» каждым элементом ДИПсГН физической величины, присвоить статус множества, в котором происходят случайные события, то отношения между случайными событиями в счётном пространстве $\Omega_1 - \Omega_6$ случайных процессов будут определяться шкалой, характеризующей динамику отношений случайных величин между собой (рис. 9), [7, стр. 17]:

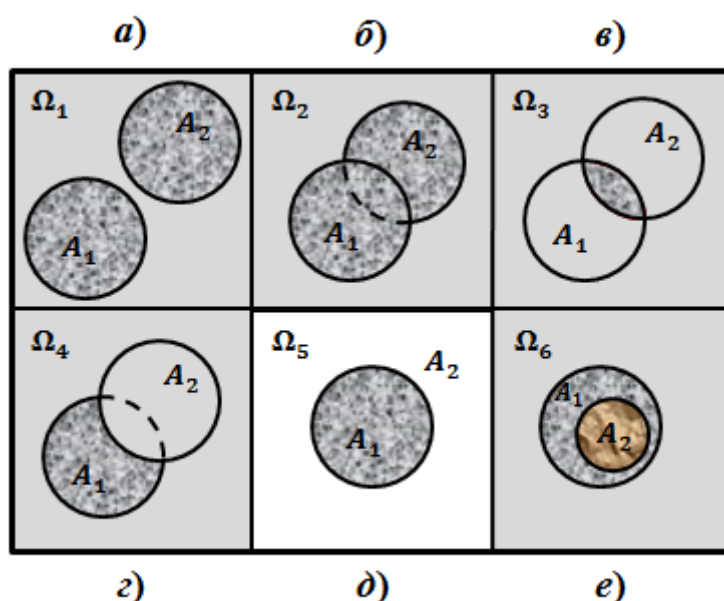


Рис. 9. Отношения между случайными событиями A_1 и A_2 в счётном пространстве $\Omega_1 - \Omega_6$ случайных процессов:

а) – A_1 и A_2 несовместные (непересекающиеся) случайные события; б) – объединённые случайные события A_1 и A_2 ($A_1 \cup A_2$); в) – пересекающиеся случайные события A_1 и A_2 ($A_1 \cap A_2$); г) – разность случайных событий A_1 и A_2 ($A_1 \setminus A_2$); д) – событие A_2 дополняет событие A_1 ($A_1 \subseteq \bar{A}_2$); е) – событие A_1 содержит в себе событие A_2 как элемент множества ($A_1 \ni A_2$).

В результате образуется завершённая система связей между случайными процессами, в полной мере характеризующая измерительный процесс в стволе скважины сложной геометрии и, позволяющая формализованными методами абстрактных правил и законов математического анализа, теоретической и математической физики обрабатывать и интерпретировать результаты исследований с использованием ДИПсГН в измерительных каналах стандартных скважинных телеметрических систем.

Скалярные и векторные геофизические поля, как и разделы математики и теоретической физики, являются теоретической абстракцией множе-

ства физических полей реального и материального мира. Поэтому при технической реализации проекта необходимо учитывать области пространства, в которых будут проводиться исследования и технические возможности дифференциальных измерительных преобразователей, на которые агрессивные среды скважинных условий накладывают значительные ограничения.

Литература

1. Альпин Л. М. Теория поля. – М.: Издательство «Недра», 1966. – 384 с.
2. Временное методическое руководство по применению скважинного акустического телевидения и интерпретации получаемых данных. – Уфа:

ОАО «Научно-производственная фирма «Геофизика»», 2004. – 51 с.

3. **Корн Г., Корн Т.** Справочник по математике для научных работников и инженеров. – 5-ое издание. – М.: Издательство «Наука». Главная редакция физико-математической литературы, 1984. – 332 с.

4. **Кузьминова И. В.** Обработка и интерпретация результатов исследований ствола горизонтальных скважин методом дифференциальной телеметрии с гравитационной навигацией. – Научный журнал: «Бюллетень науки и практики, № 2, 2017 г.» / Россия, Нижневартовск: Издательский центр «Наука и практика». (ВИНИТИ РАН, РИНЦ и т. д.) *Bulletin of Science and Practice (scientific journal)*, <http://www.bulletennauki.com>.

5. **Кузьминова И. В.** Признаки изменения геометрии ствола скважины и радиального смеще-

ния измерительного зонда при геофизических исследованиях геологических разрезов методами дифференциальной телеметрии. / Научный журнал: «Процессы в геосредах» № 2 (15), 2018 г. (ISSN 2412-9429) – <http://journal.geomediacentr.ru/>. – Стр. 861 – 870.

6. **Пчелин Б. К.** Векторный анализ для инженеров-электриков и радистов. – М.: Издательство «Энергия», 1968. – 256 с.

7. **Розанов Ю. А.** Случайные процессы. – М.: Издательство «Наука». Главная редакция физико-математической литературы, 1971. – 288 с.

8. **Тихонов А. Н., Самарский А. А.** Уравнения математической физики. – 7-е изд. – М.: Издательство МГУ; Издательство «Наука», 2004. – 798 с.

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Vildanov R.G.,

doctor of engineering, professor,

FGBOU VPO "Ufa State Petroleum Technical University", Salavat

Buzaeva E.K.,

student "Electrical equipment and electrical facilities of enterprises, organizations and institutions"

FGBOU VPO "Ufa State Petroleum Technical University", Salavat

Shirobokov E.D.,

student "Electrical equipment and electrical facilities of enterprises, organizations and institutions"

FGBOU VPO "Ufa State Petroleum Technical University", Salavat

Sayfutdinov R.F.

Assistant "Electrical equipment and electrical facilities of enterprises, organizations and institutions"

FGBOU VPO "Ufa State Petroleum Technical University", Salavat

DEVELOPMENT OF AUTOMATIC SYSTEM FOR DETERMINING PARAMETERS DIAGNOSTIC INFORMATION

РАЗРАБОТКА АВТОМАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ДИАГНОСТИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ

Summary: Developed an automatic system for determining the processing parameters and diagnostic information. Designed and developed hardware system for obtaining diagnostic information by measuring the energy loss during periodic magnetization reversal ferrimagnetic material . Program complex «MagScanner 1.0», allowing to diagnose , manage and visualize the resulting diagnostic information appliance . The paper describes the principle of hardware system based on measurement of loss reversal . The description of the hardware system units with presentation of the main features and concepts . The basic algorithms of the software system «MagScanner 1.0» to bringing the search algorithm fall amplitude and Graham algorithm . Make a test scan with the discovery of a defect in the material, resulting in a picture showing the contour of the defect.

Key words: *reversal, analog-to-digital converter, operational amplifier, a software complex visualization environment, a storage unit.*

Аннотация: Разработана автоматическая система определения и обработки параметров диагностической информации. Спроектирован и разработан аппаратный комплекс для получения диагностической информации методом измерения потерь энергии при периодическом перемагничивании ферримагнитного материала. Разработан программный комплекс «MagScanner 1.0», позволяющий проводить диагностику, обрабатывать и визуализировать полученную диагностическую информацию с аппаратного комплекса. В работе описан принцип работы аппаратного комплекса основанный на измерении потерь на перемагничивание. Представлено описание блоков аппаратного комплекса с приведением основных характеристик и принципиальных схем. Описаны основные алгоритмы работы программного комплекса «MagScanner 1.0» с приведением алгоритма поиска падения амплитуды и алгоритма Грэхема. Произведено пробное сканирование с обнаружением дефекта в материале, в результате чего получена картина, отображающая контур дефекта.

Ключевые слова: *перемагничивание, аналогово-цифровой преобразователь, операционный усилитель, программный комплекс, среда визуализации, ячейки памяти.*

Постановка проблемы.

Современное определение технической диагностики как отрасли научно-технических знаний, сущность которой составляют теория, методы и средства обнаружения и поиска дефектов объектов технической природы, включает в себя методы и средства неразрушающего контроля. Обнаружение и поиск дефектов являются процессами определения технического состояния объекта и объединяются под термином «диагностирование». Таким образом, задачами диагностирования являются задачи проверки исправности, работоспособности и правильности функционирования объекта, а также задачи поиска дефектов, нарушающих исправность, работоспособность или правильность функционирования.

Анализ последних исследований и публикаций.

Средства неразрушающего контроля выступают в роли технических средств диагностики. Ни один из существующих методов и приборов неразрушающего контроля не является универсальным и не может удовлетворить в полном объеме всем требованиям практики. В наибольшей степени этим требованиям удовлетворяют комплексные диагностические лаборатории, укомплектованные различными приборами неразрушающего контроля. Комплектация лабораторий производится в зависимости от вида диагностируемого оборудования и производимых диагностических работ. На нефтехимических и нефтеперерабатывающих про-

изводствах наиболее эффективным является применение портативных универсальных и специализированных средств для периодического неразрушающего контроля оборудования и встроенных стационарных систем непрерывной диагностики с выводом показаний на пульт оператора [1].

Выделение нерешенных ранее частей общей проблемы.

В последнее время с развитием компьютерной техники и повышением их производительности, наметилась перспектива в создании программно-аппаратных комплексов диагностирования. Такой симбиоз средств диагностирования и компьютера позволяет получать комплексную информацию о дефектах, а также вести детальный анализ. Такой подход к средствам диагностики позволяет разделить функции. На аппаратную часть возлагается функция измерения и выявления дефекта, а на

программную составление полной картины и анализ полученных результатов. Для встроенных стационарных систем непрерывной диагностики применение компьютерной техники позволяет сконцентрировать информацию из всех датчиков в одном месте и на основе этих данных вести анализ в реальном времени.

Цель статьи.

Идея работы основана на создании эффективного, экономически выгодного устройства диагностирования, а так же разработка автоматизированного программного комплекса обработки диагностической информации датчика потерь на перемагничивание [2,3].

Изложение основного материала.

Блок схема исполнения магнитного дефектоскопа представлена на рисунке 1.

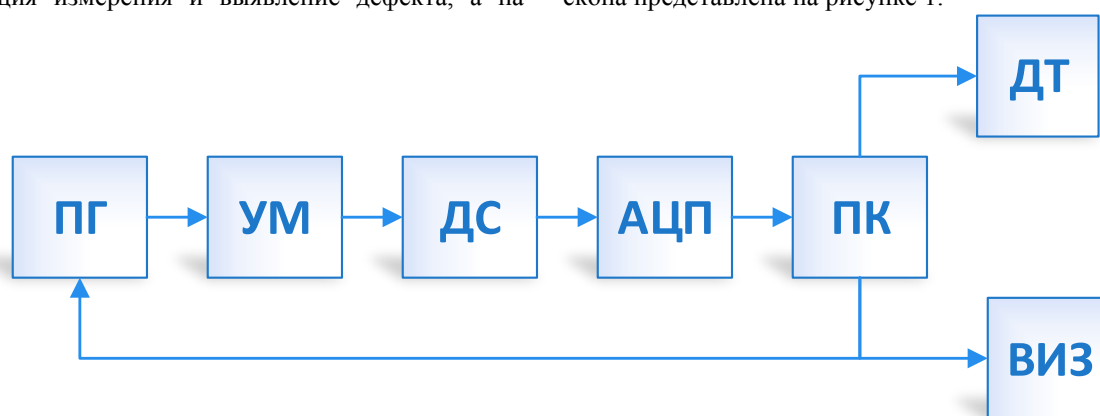


Рисунок 1 – Блок схема прибора

Прибор содержит ПГ – программный генератор, УМ – блок усилителя мощности генерируемого сигнала, ДС – электромагнитный датчик-сканер, АЦП – аналогово цифровой преобразователь, ПК – Программный комплекс, состоящий из блока ДТ – детектора и ВИЗ – блока визуализации. Работа прибора основана на измерении потерь перемагничивания участка контролируемого изделия. Если ферромагнитный материал подвергается периодическому перемагничиванию, то в нем возникают потери энергии на гистерезис и вихревые токи.

Электромагнитный ДС устанавливают на изделие. Регулируемый сигнал с генератора ПГ поступает в блок усиления УМ, где усиливается по напряжению и току, и подается на намагничивающую обмотку. Далее сигнал с измерительной об-

мотки поступает на АЦП, где полученная информация упорядочивается и поступает в программный комплекс для получения конечного результата – детектирование и визуализация дефекта.

Таким образом, прибор позволяет путем изменения частоты магнитного поля от высоких значений до низких постепенно перемагничивать участок изделия слой за слоем, тем самым осуществлять частотное сканирование и по потерям на перемагничивание получить изображение поперечного сечения контролируемого участка.

Датчик-сканер исполнен в виде П-образного сердечника, состоящего из пластин с двумя одинаковыми медными катушками сопротивлением 80 Ом (рисунок 2).

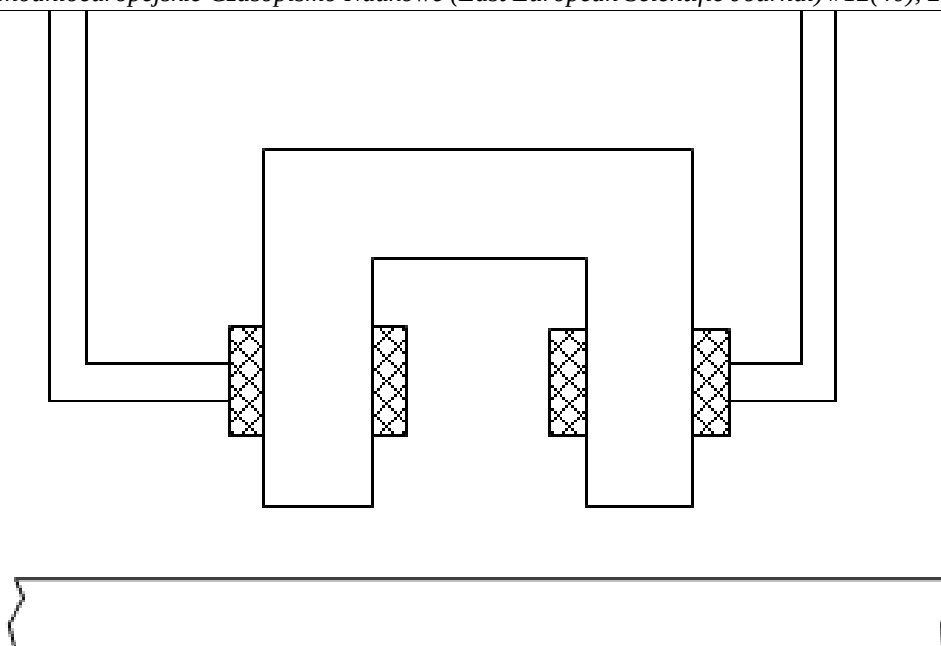


Рисунок 2 – Схематичное изображение датчика-сканера

Блок АЦП выполнен на микроконтроллере фирмы Atmel серия ATtiny45-20su. Блок усиления выполнен на базе операционного усилителя (рисунок 3).

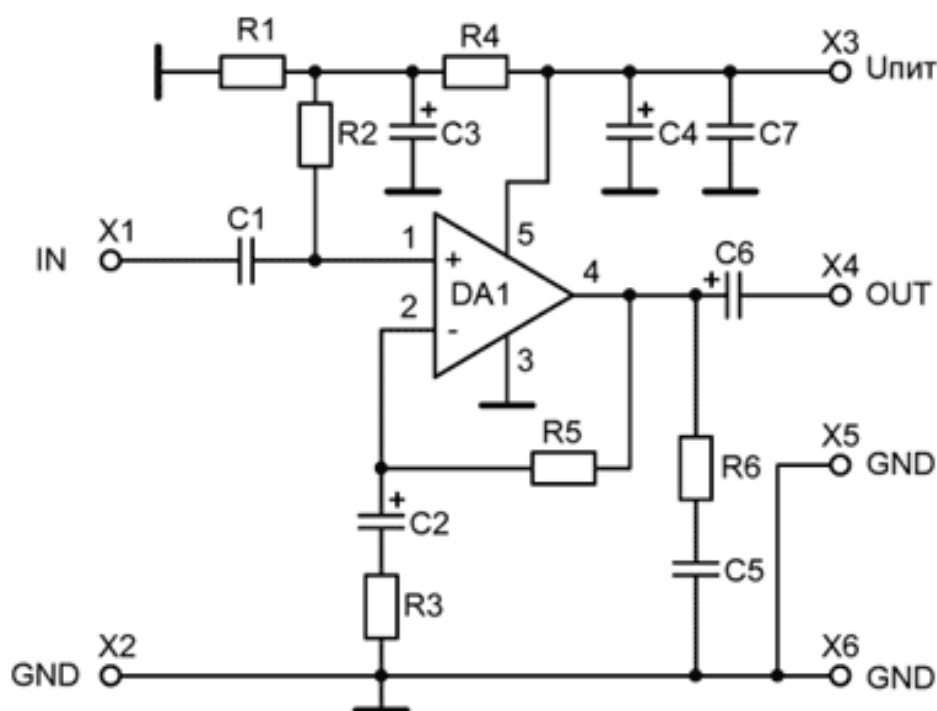


Рисунок 3 – Схема блока усиления

Программный комплекс разработан в среде Borland Delphi 11. Комплекс состоит из блоков генерации сигнала, блока поиска дефекта, блока калибровки и блока визуализатора (рисунок 4). На рисунке 4 изображены: 1 – область управления генератором, 2 – область управления детектором, 3 – область отображения величины потери перемагничивания, 4 – область визуализации контура дефекта.

В программном комплексе реализовано два основных режима, режим поиска дефекта и режим сканирования. В режиме поиска дефекта можно определить наличие дефекта и определить глубину его залегания. В режиме сканирования происходит сканирование самого дефекта, определение точек его контура, на основании полученных точек формируется его примерная форма.

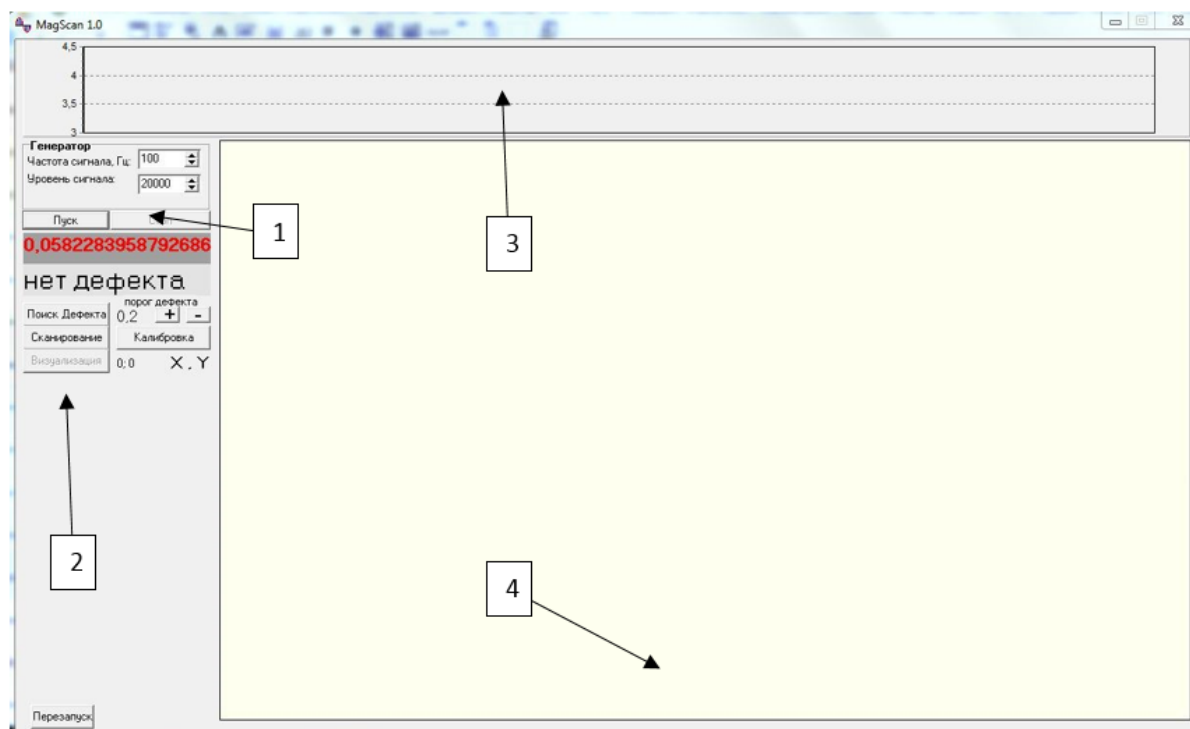


Рисунок 4 – Рабочее окно программного комплекса

Алгоритм поиска дефекта заключается в следующем:

В реальном времени происходит отслеживание максимального значения A (вершины синусоиды) амплитуды сигнала и записывается в ячейку памяти (рисунок 6). Затем это значение сравнивается с последующим максимальным значением амплитуды B . В случае, если последующее значение максимума амплитуды меньше записанного в ячейку памяти $A > B$, то это сигнализирует о наличии дефекта, по разнице значения C , можно судить

о глубине дефекта. Данный алгоритм повторяется на разных частотах от 50 Гц до 1000 Гц, что позволяет получить картину дефекта послойно.

Для полученного множества точек с координатами дефекта применяется алгоритм Грэхема, позволяющий произвести обход точек и создать контур. Алгоритм Грэхема — алгоритм построения выпуклой оболочки в двумерном пространстве. В этом алгоритме задача о выпуклой оболочке решается с помощью стека, сформированного из точек-кандидатов (рисунок 6) [4].

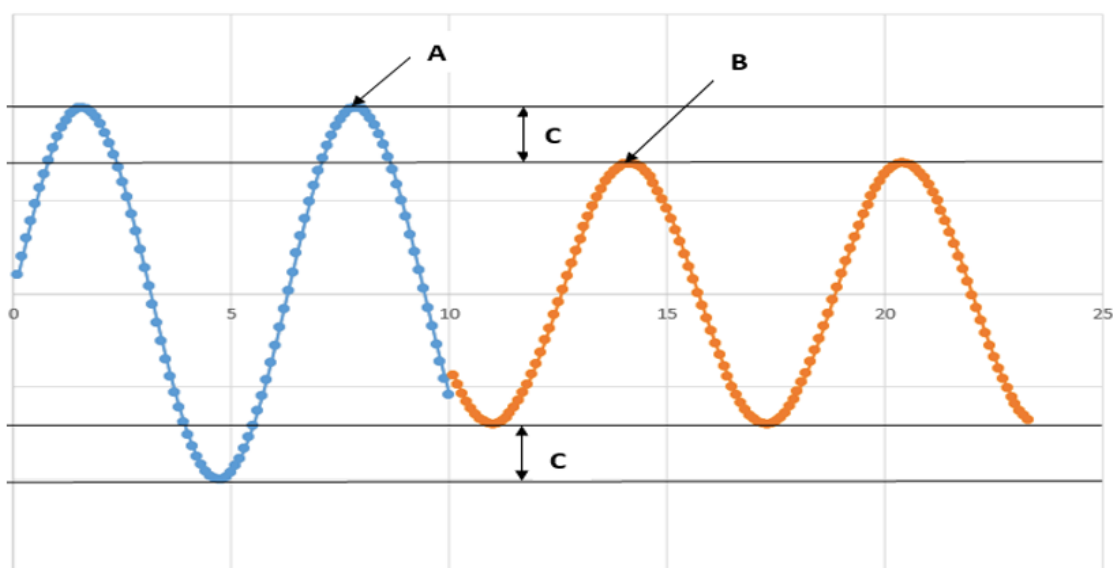


Рисунок 5 – Иллюстрация алгоритма поиска значений

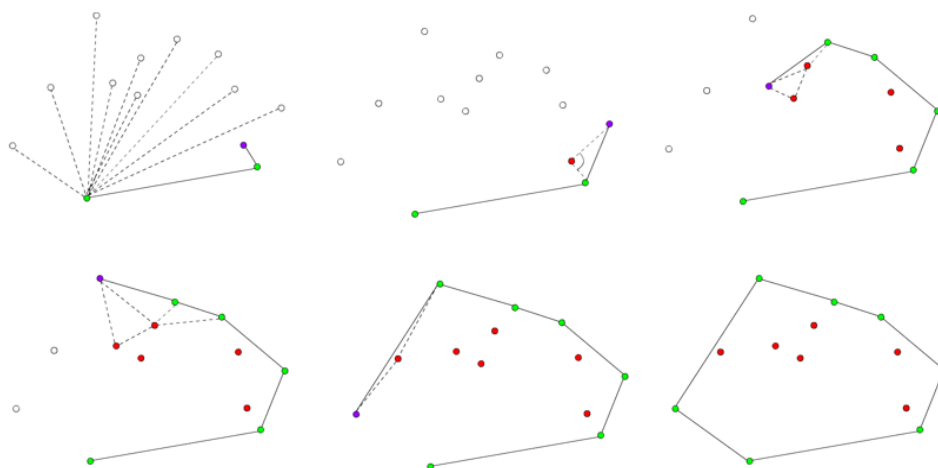


Рисунок 6 – Пример работы алгоритма Грэхема

Визуализация полученных данных выполнена с помощью компонентов Tee Chart и Canvas, позволяющих получать различные картины сечений и диаграмм распределений дефектов на поверхности, а также реализовать получение трехмерной картины.

Выводы и предложения.

Как показали результаты исследований, система дает хорошие результаты. Чувствительность к дефектам повысилась до 10% от толщины металла. Система позволяет получить размеры дефектов и их объемное изображение.

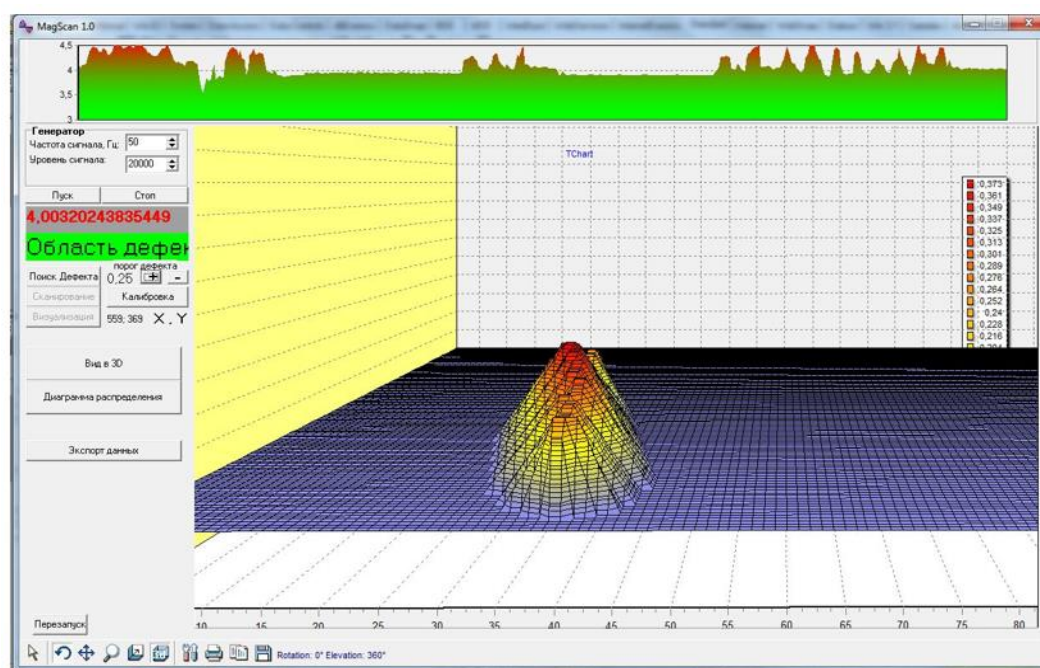


Рисунок 6 – Результат сканирования дефектного участка

Список литературы:

- 1 Стеклов О.И. Техническая диагностика оборудования и сооружений нефтегазового и нефтегазохимического комплексов. // Дефектоскопия. – 2006. №4 – С. 113-121.
- 2 Вильданов Р.Г. Разработка датчиков потерь на перемагничивание для контроля напряженно-деформированного состояния металлических кон-

струкций // Контроль. Диагностика. -2008. № 10. - С. 48-50.

- 3 Вильданов Р.Г. Датчик для оценки напряженно- деформированного состояния металлоконструкций // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. -2010. № 10. -С. 44-48.

4 Кормен Т., Лейзерсон Ч., Ривест Р., Штайн К. Алгоритмы: построение и анализ. // Вильямс. – 2006. – М. – С. 420-461.

Masikevych A. Yu.,*PhD, associate professor department of hygiene and ecology,
Bucovinian State Medical University, Chernivtsi, Ukraine***Heretsun H. M.,***Lecture, department of ecology and law of Chernivtsi faculty,
National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Chernivtsi***Masikevych Yu. G.,***Doctor of biological sciences, professor department of hygiene and ecology,
Bucovinian State Medical University, Chernivtsi***Kolotylo M. P.,***Aspirant, department of ecology and law of Chernivtsi faculty,
National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Chernivtsi***Yaremchuk V. M.,***Aspirant, department of ecology and law of Chernivtsi faculty,
National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Chernivtsi*

ATMOSPHERIC PROTECTION AS A COMPOSITION OF ENVIRONMENTAL SAFETY OF THE REGION

With sufficient scrutiny features of environmental hazards role as a factor of precipitation formation of environmental hazards in urban areas studied enough. It is shown that the leaching of pollutants from the atmosphere leads to a technologically-transformed sediments, which themselves are beginning to act as a factor of environmental hazards. It was found that precipitation as the object of evaluation of environmental hazard have a number of specific features. Methods used regression analysis to establish the relationships between the components of precipitation and air pollution concentrations. It is shown that the proposed methodological approaches will enable to qualitatively and quantitatively assess the environmental hazards that may result from the effects of rainfall.

Key words: environmental hazards, precipitation, chemical composition, acidity, ecological safety.

Formulation of the problem. In Ukraine, environmental safety issues are increasingly being addressed. Determines the understanding that socio-economic development of society is in direct interaction with the quality of the environment. In order to ensure the stable development of the state, it is necessary to identify the regional countries that carry out the ecological status of the components that have emerged in the most important condition with the accession of resources to the implementation of environmental measures. Obtaining reliable environmental information on the dynamic change of ecosystem components of importance in the process of forecasting and supplementing the prevention of the development of environmentally hazardous situations [8].

Atmospheric precipitation has certain features that allow them to be used as an indicator of the ecological state of atmospheric air [1, 4]. At the same time, the amount of pollutants that comes with atmospheric precipitation on the water surface, soil and surface of plants is a source of environmental hazard. Such an integrated interaction with the environmental components makes them a rather universal indicator that characterizes the environmental safety of the region.

Analysis of recent research and publications. Problems of the study of atmospheric precipitation in the scientific literature are given considerable attention in many countries of the world. These studies can be combined into the following areas: - studies related to changes in rainfall patterns and their impact on water resources and agriculture [6]; - analysis of conditions for the formation of the chemical composition of

precipitation in different regions of the world [1, 3]; - estimation of processes of precipitation transformation in urbanized territories [2, 3]; - research on the influence of acid rain on some ecosystems [3, 5].

Rainwater can accumulate impurities in one of two ways: by "washing in the cloud," or by processes below the clouds, which are called "washes out precipitation." When "washes out sediments" there is accumulation of impurities in rainwater, which contaminated the surface layer of the atmosphere [5]. Studies [3, 7] show that the chemical composition of atmospheric precipitation in cities is largely determined by the dynamics of air flows and the amount of pollutant emissions. Moreover, the analysis of data presented in [1, 3] shows that atmospheric precipitation is a reliable indicator of air pollution in human settlements.

However, with such a large number of scientific studies, the analysis of atmospheric precipitation in terms of environmental safety is not high enough. Also, with sufficient knowledge of the peculiarities of manifestations of ecological danger, the existence of a scientifically sound approach to solving the ecological hazard of pollutants formed by sources of pollutants, the role of atmospheric precipitation as a factor in the formation of ecological danger of urbanized territories is not sufficiently studied.

The purpose of this work was to conduct an analysis of atmospheric precipitation, based on the principles of environmental safety.

The methodological basis of theoretical studies of this work is a systematic analysis of the factors and conditions for the formation of environmental hazards

and the search for methods of environmental safety management. In the course of the work, a comprehensive research method is used, which is based on the logical generalization and systematization of the information base. Methods of regression analysis were used to establish relationships between components of atmospheric precipitation and concentrations of atmospheric air pollution.

Presentation of the main material. The assessment of atmospheric precipitation is the most objective method for assessing the state of atmospheric air. This way of controlling the atmosphere through the estimation of atmospheric precipitation is more simple and convenient compared with the traditional one. Pollution of atmospheric precipitation is derived from air pollution, so it is possible to use it as a sensitive indicator of pollution of the atmosphere. The level of atmospheric pollution contributes to the determination

of soil pollution as a result of precipitation of pollutants from the atmosphere [1, 5, 8].

Among the components of pollutant emissions, the most influence on the formation of the environmental hazard of atmospheric precipitation have acid-forming compounds, which, when interacting with atmospheric water, turn into acids and contribute to lowering the pH of precipitation. In fig. 1 presents the contribution of stationary and mobile sources to the emissions of acid-forming compounds (sulfur oxides, nitrogen oxides, carbon monoxide oxides). Analysis of data in fig. 1 shows that due to emissions of mobile sources, the main amount of emissions of acid-forming compounds is formed. Thus, the contribution of mobile sources to the emission of sulfur dioxide is 60,4%, nitrogen oxides - 93%, carbon monoxide - 97,4% and carbon dioxide - 58,3%.

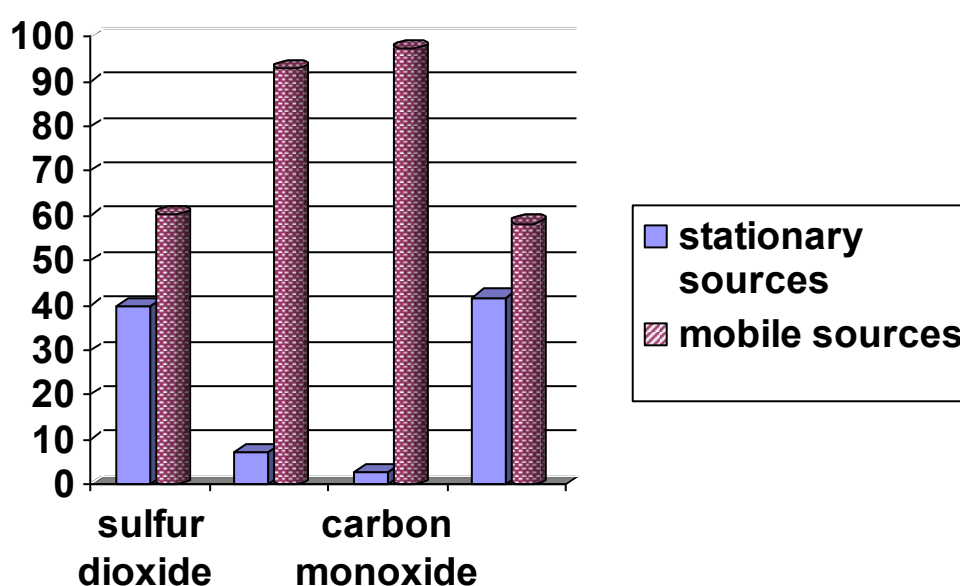


Figure 1 - Distribution of emissions of acid-based compounds by stationary and mobile sources of pollution (%)

Most of all dust emissions from vehicles fall onto the ground: gases are predominantly in the form of precipitation, and dust under the influence of gravity. Depending on the number, duration of exposure, type of pollutant, and soil properties, this leads to various negative consequences.

Table 1 presents the results of a regression analysis of the dependence of the pH level of atmospheric precipitation on the concentration of acid-forming compounds in the air.

As the study showed, the best dependence of pH on the concentrations of acid-containing pollutants is described by the second-order equation. The lowest correlation coefficient was fixed for the dependence of pH-SO₂, and the highest for the sum of nitrogen oxides. This may be due to the fact that the concentration of nitrogen oxides in the atmosphere is ten times higher than sulfur dioxide.

Table 1

Functional dependence of the pH of precipitation from the concentration of acid-forming compounds in the air

Emission component	Function type	Regression equation	Correlation coefficient, R	Error, p
SO ₂	Polynomial	$y = 7,1275 - 1,9791x + 1,3226x^2$	-0,5679	0,00007
NO ₂ +NO	Polynomial	$y = 7,0909 - 1,1943x + 0,0102x^2$	-0,7182	0,00002
HCl	Polynomial	$y = 7,1793 - 2,3426x + 1,6769x^2$	-0,6283	0,00004

To effectively predict possible environmental threats and make managerial decisions to improve the state of the environment, it is necessary to carry out a

qualitative and quantitative assessment of the level of danger. Taking into account the peculiarities of atmospheric precipitation and the results of the conduct-

ed researches, it is offered to conduct qualitative and quantitative estimation according to the following parameters:

- to estimate the possible manifestations of hazards caused by atmospheric precipitation using the value of pH;
- for the quantitative estimation of the risk of the influence of atmospheric precipitation on a certain territory, use the sum of modules of inflow of chemical components of precipitation.

Formation of the value of the pH index of atmospheric precipitation occurs due to the influence of a number of natural and anthropogenic factors, and therefore its size characterizes the complex influence of many factors. By changing the pH, it is easy to trace the change in the concentration of hydrogen ions without performing complex calculations. pH of rainwater is considered to be the most important parameter for predicting the nature of human activity.

The qualitative analysis of data in fig. 2 shows a tendency for a stable acidification of atmospheric precipitation in the city of Chernivtsi. Several periods can be detected. The first period falls on 1989 – 1992. The average annual pH value in this period was 7,11, the maximum pH value was in April 1990 and was 9,2, and the minimum pH value of 6,0 was recorded in February 1990. The second period refers to 1993 - 1996. The average annual pH value in this period was 6,72, the maximum value of pH was noted in January 1994 and was 8,0, while the minimum pH value, which was 5,4, was recorded in October 1994. III-nd period from 1997 to 2001 year. The average annual pH value in this period was 6,87, the maximum pH value was in March 2001 and amounted to 8,0, while the minimum pH value of 5,7 was recorded in July 2001. IV-th period from 2002 to 2008 year.

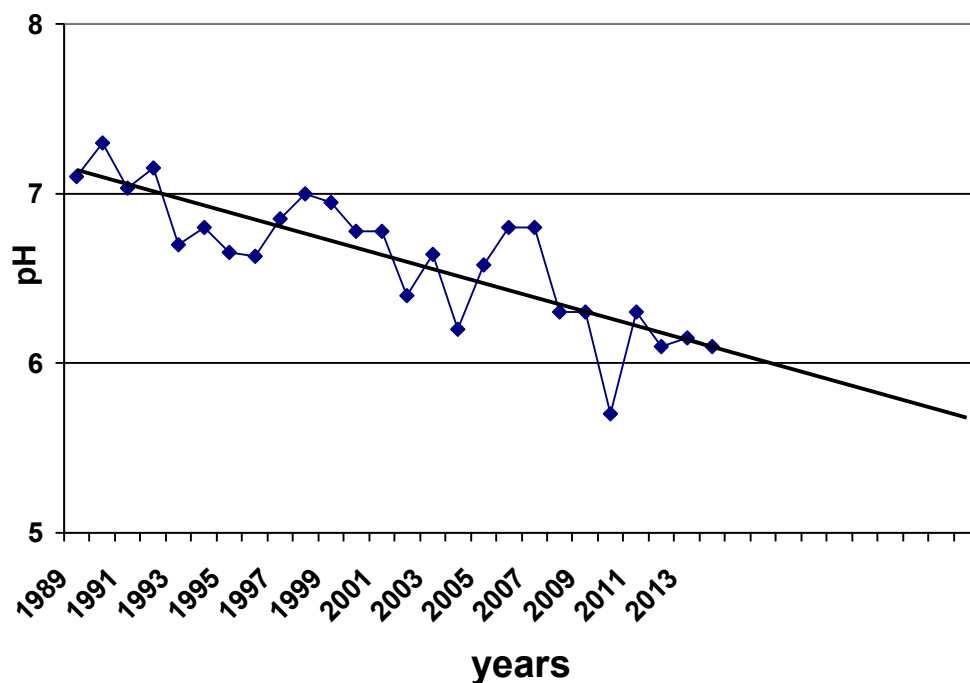


Figure 2 - Long-term trend of annual average values of atmospheric precipitation pH in Chernivtsi

The average annual pH value in this period was 6,5, the maximum pH value was in January 2003 and was 8,0 and the minimum pH value of 5,05 was recorded in May 2004. Despite some fluctuations in pH average rates acid precipitation is 0,026 units of pH per year.

Formation of the index of acidity of atmospheric precipitation occurs due to the influence of a number of natural and anthropogenic factors. However, it is

the intensification of human activity that leads to a significant transformation of the component composition of precipitation and often becomes a determining factor in changing their acidity. Particularly noticeable such changes are in urban areas, which are characterized by high levels of pollution of atmospheric air. Table 2 shows the characteristics of the most significant natural and anthropogenic factors of influence on the pH of atmospheric precipitation.

Table 2

Characteristics of the main natural and anthropogenic factors of influence on the pH of atmospheric precipitation

Natural factors	Anthropogenic factors
<u>Landscaping factors</u> Height differences lead to the accumulation of pollutants in the basins.	<u>Industrial factors</u> Emissions of industrial enterprises, boiler houses, vehicles lead to the appearance in the atmosphere of significant amounts of acid-containing gases (sulfur oxides, nitrogen).
<u>Meteorological factors</u> Speed and direction of wind - determines the conditions for the transfer of contaminated air masses to significant areas. The temperature and humidity of the air - low temperature and high humidity lead to the accumulation of pollutants in the surface layer of the atmosphere.	<u>Successional factors</u> Dense building can lead to the formation of street-canyons with weak or absent ventilation, which leads to the accumulation of pollutants. Formation of park-recreational zones contributes to the absorption of pollutants by tree plants.

As shown in Table 2, among the most important natural factors influencing changes in the acidity of atmospheric precipitation are the landscape features of the territory and meteorological conditions. The influence of the latter involves the dispersion, washing and transformation of harmful substances in the atmosphere. The characteristics of the wind regime belong to the meteorological factors, which most influence the concentration of impurities in the surface layer of the atmosphere and, as a consequence, the acidity of atmospheric precipitation.

Topographic conditions of the area also play an important role in shaping the level of pollution. Increased areas, if this is not hindered by their construction, are well blown, due to which the concentration of impurities in the air is significantly reduced.

Among the anthropogenic factors that aggravate the ecological situation and can lead to the gradual acidification of atmospheric precipitation, the greatest negative impact are emissions from industrial and transport facilities. Moreover, depending on the economic orientation of the region, the share of contribution to the overall pollution of the atmosphere of these factors may vary significantly. Thus, industrialized regions are dominated by emissions from industrial enterprises, and in areas with agricultural direction transport emissions become priority pollutants.

Commercial zones serve as a mechanical barrier to the influence of polluted air streams and contribute

to the formation of man-made anomalies, the contrast of which depends on the height of the buildings. The determining factor for urban areas is the ability of green plants to clean air from dust and aerosols. In parks such cleaning is provided by 85%, on streets with two-sided landscaping - by 70%. Therefore, the formation of park-recreational zones contributes to the reduction of air pollution and the formation of a more natural composition of atmospheric precipitation.

For the quantitative assessment of the environmental risks of atmospheric precipitation, it is necessary to select the "reference" value of the pH indicator, which will characterize the safe level of environmental risk. A deviation from this value in one direction or another will indicate an increase in the degree of environmental risk. The "standard" value of the pH indicator, in our opinion, should be 5.6, since this value is typical of unpolluted rainwater.

The range of pH values for the distribution of precipitation according to the degree of environmental risk should be determined by analyzing the safety of fresh natural waters with different values of acidity, as rainwater is part of the fresh water supply on Earth.

For a more complete analysis of the influence of atmospheric precipitation components on the environment, mid-season and annual modules of precipitation of chemicals with precipitation in the city of Chernivtsi were calculated (Table 3).

Table 3

Modules of inflow of chemical compounds with atmospheric precipitation into the city of Chernivtsi

Modules of receipt of chemical compounds, t / km ²	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	Cl ⁻	HCO ₃ ⁻	NH ₄ ⁺	Na	K	Ca	Mg
Average annual	4,2	1,1	0,38	3,75	0,4	1,1	0,53	1,31	0,27
Winter	0,43	0,1	0,04	0,44	0,03	0,12	0,07	0,15	0,03
Spring	0,95	0,41	0,12	0,74	0,12	0,18	0,13	0,29	0,07
Summer	0,65	0,13	0,08	0,36	0,1	0,06	0,05	0,16	0,05
Autumn	1,62	0,39	0,12	1,52	0,14	0,51	0,19	0,5	0,08

In the autumn most of the city's territory comes sulfates, chlorides, hydrocarbons, ammonium compounds, sodium, potassium, magnesium. In the spring period the maximum amount of nitrates, chlorides and calcium compounds is received.

Conclusions and suggestions. Atmospheric precipitation can serve as an indicator of the ecological

safety of the region. The criterion for assessing environmental safety in relation to atmospheric precipitation can be the value of the pH indicator. The mathematical dependence of pH between the pH of sediments and the concentration of acid-forming compounds in the air, which has the form of polynomial function, is established.

The described mathematical dependencies and methodological approaches can be used in forming programs of observations on ecological safety of a certain region.

List of references

1. Chakraborty B. & Gupta A. (2018). Study and interpretation of chemical composition of rainwater in selected urban and rural locations in India using multivariate analysis. AIP Conference Proceedings 1952, 02003. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.5031996> (27.12.2018) (in English).
2. Jawecki B., Bursta-Adamiak E. Seasonal variability of basic pollution parameters in atmospheric precipitation in Strzelin. *J. Water Land Dev.* 2014, No. 20 (I–III): 31–37. DOI: <https://doi.org/10.2478/jwld-2014-0001>. (27.12.2018) (in English).
3. Liuyi Zhang, Baoqing Qiao, Huanbo Wang, Mi Tian, Jian Cui, Chuan Fu, Yimin Huang, and Fumo Yang. (2018). Chemical Characteristics of Precipitation in a Typical Urban Site of the Hinterland in Three Gorges Reservoir, China. *Journal of Chemistry* Volume 2018, Article ID 2914313, 10 pages.

DOI: <https://doi.org/10.1155/2018/2914313>. (27.12.2018) (in English).

4. Kiptenko Ye.M. & Kozlenko T.V. (2007). Development of chart of short-term prognosis of contamination of air is for the city of Lutsk. *Scientific works UkrNDHMI* 256, 318-330. (in Ukraine).
5. Yunhe, Kh. (1965). Chemical composition and radio-activity of atmosphere. Moscow, USSR: World, 424. (in Ukraine).
6. Polchyna S.M. (2006). A regulator function of the forest-park planting is in urboantropedenogenezik. *Ecology and noosferology* 16 (1-2), 122-128. (in Ukraine).
7. Tarasova T.F. & Chalovskaya O.V. (2005). Estimation of influence of acid rains on the elements of ecosystem of industrial city. *Announcer of the Orenburg state university. Natural and technical sciences* 10, 80-84. 5(in Ukraine).
8. Rybalova O.V., Belan S.V. & Varyvoda O. Ye. (2010). Determination of level of ecological danger is in the regions of Ukraine on the basis of estimation of ecological risk. *Collection of scientific works* 12, 132-142. (in Ukraine).

Казанов В.И.

доктор технических наук; профессор ;

Буй Хыу Чык

магистр, аспирант

МИРЭА -Российский технологический университет -

Kaganov W. I.

Doctor Technical Sciences, Professor,

Bui Huu Chuc,

graduate student

Postgraduate Student

БЕСПРОВОДНАЯ ПЕРЕДАЧА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ WIRELESS ELECTRIC ENERGY TRANSMISSION

Рассматриваются три способа беспроводной передачи электрической энергии: индукционный, лазерный и посредством СВЧ излучения. Более подробно анализируется третий способ при его применении для передачи энергии с солнечно-космической электростанции на Землю.

Three methods of wireless transmission electric energy are considered: induction, laser and microwave studying. The third method is analyzed in more detail when it is used to transfer energy from the solar-space power plant to the Earth.

Ключевые слова: электрическая энергия, солнечная батарея, СВЧ излучение.

Keywords: electric energy, solar battery, microwave radiation

Сущность проблемы.

Передача электрической энергии от источников ее производства: гидро-тепловых и атомных электростанций - к объектам ее потребления в городах и других наземных местах осуществляется по проводным воздушным линиям электропередачи (ЛЭП), образно выражаясь, «опутывающим» большие территории всех промышленно развитых стран. Помимо отчуждения больших территорий другим серьезным недостатком ЛЭП является обрыв проводов при сложных погодных условиях, в том числе гололеда, а также потери энергии в про-

водах при ее транспортировке на большие расстояния. По данной причине предложения по беспроводной передаче электрической энергии давно обсуждались в научной среде. Рассмотрим в этой связи три способа по беспроводной передаче энергии: индукционный, лазерный и путем СВЧ излучения.

Индукционный способ.

Основой данного способа служит явление взаимной индукции двух катушек индуктивности (рис.1) [1].

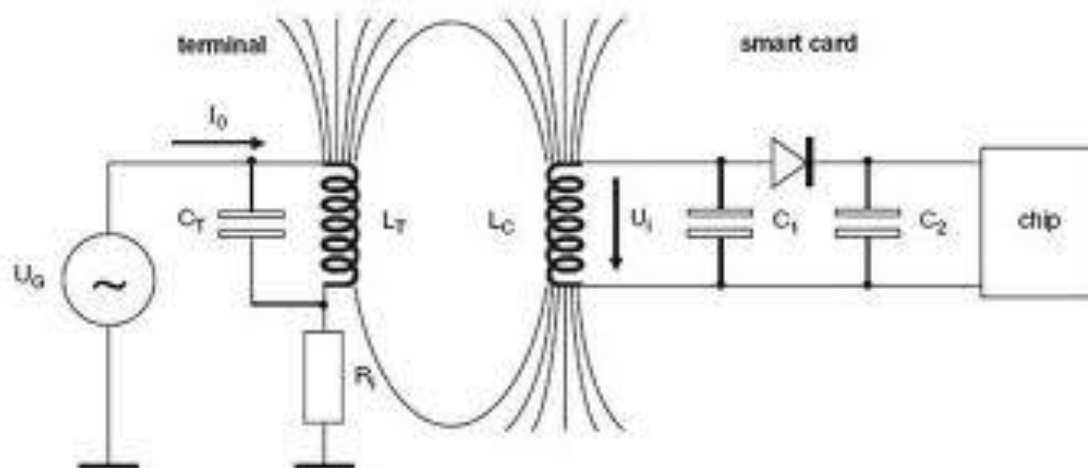


Рис.1. Схема при индукционном методе

Благодаря явлению взаимной индукции высокочастотный электрический ток, протекающий по первичной обмотке, создает переменное магнитное поле, возбуждающее электрический ток той же частоты во вторичной обмотке. Напряжение, индуцированное во вторичной обмотке, определяется выражением:

$$\frac{d^2 u}{dt^2} - \mu(1 - bu - gu^2) \frac{du}{dt} + u = 0, \quad (1)$$

где M - коэффициент взаимной индукции

После детектирования на выходе схемы получают постоянное напряжение. Для повышения эффективности метода к обеим обмоткам подключают конденсаторы, настраивая контура параллельного типа в резонанс с частотой переменного тока входного источника сигнала.

Недостатком метода является его относительно малая эффективность, поскольку с увеличением расстояния между обмотками коэффициент M уменьшается и значительная часть магнитного потока не охватывает вторичную обмотку. Следствием такого явления является малая дистанция по передаче энергии - не более $l < 0,1\lambda$, где λ - длина волны первичного источника. Как показали эксперименты длина этой дистанции $l < 10$ м [1]

Лазерный метод.

С помощью лазерного излучения возможна передача электрической энергии на большие расстояния, в том числе на беспилотные летательные аппараты - квадрокоптеры [2]. Однако по причине искривления лазерного луча в атмосфере эффективное применение данного метода возможна только за ее пределами.

Метод, основанный на СВЧ излучении.

Одним из тех, кто внес наибольший вклад в становление данного способа, является российский ученый академик П.Л. Капица, опубликовавший в 1962г. фундаментальный труд «Электроника больших мощностей» [3]. Приведем одну цитату из этой работы: «Мне думается, что внедрение сверхвысокочастотной электроники в большую энергетику является одним из наиболее обещающих направлений развития современной электротехники»

На современном этапе развития радиоэлектроники реализовать идею акад. Капицы П.Л. о тесном взаимодействии сверхвысокочастотной электроники и электроэнергетики возможно с помощью СВЧ полупроводниковых приборов на основе арсенид галлия и нитриде галлия, а также в рамках развития солнечной электроэнергетики.

При суммарной установочной мощности всех электростанций мира в 100 ГВт солнечные электростанции (СЭС) вырабатывают в настоящее время около 2,3% электроэнергии в ее общем производстве. Однако серьезным недостатком в работе СЭС является «рваный» характер производства электрической энергии, зависящий от времени года и суток, погоды, рассеяния солнечных лучей в атмосфере Земли и ряд других факторов. В результате солнечные электростанции не могут работать самостоятельно, а только совместно с другими способами производства электроэнергии или со специальными накопительными электростанциями. Для общей оценки такого переменчивого режима работы СЭС введем параметр, который назовем коэффициентом эффективности:

$$K_{\text{эф}} = (W_{\text{ф}}/W_{\text{п}}) K_{\text{с}}, \quad (2)$$

где $W_{\text{ф}}$ - фактическое производство электроэнергии солнечной батареей за один год, $W_{\text{п}}$ - расчетное производство электроэнергии той же солнечной батареей при условии ее непрерывной работы в течение года, $K_{\text{с}}$ - КПД солнечной батареи [4].

Обработка большого массива данных о работе солнечной батареи показывает, что для большинства случаев с учетом перечисленных выше факторов можно принять $W_{\text{ф}}/W_{\text{п}} = 0,05$. В результате при КПД солнечной батареи $K_{\text{с}} = 20\%$ согласно (2) получим, что с помощью СЭС только 1% излучаемой Солнцем энергии может перерабатываться в электрическую энергию.

Ввиду малого значения данного параметра и родилось предложение по выносу СЭС в космическое пространство, где интенсивное облучение солнечных батарей может происходить непрерывно в течение суток и всего года. Считается, что

данную идею первым высказал в 1968 г. американский ученый Питер Глайзер, предложивший располагать солнечные батареи на околоземной стационарной орбите и оттуда с помощью СВЧ электромагнитных волн передавать энергию на Землю [5,6]. На данной орбите затенение солнечных батарей Землей происходит всего на 72 минуты в сутки и на несколько минут один раз в месяц из-за Луны [5]. В итоге общее время активной работы солнечных батарей по сравнению с длительностью года уменьшается не более, чем на 2-3%. При этом следует учитывать, что мощность излучения Солнца в космическом пространстве выше, чем на Земле, составляя $1,4 \text{ кВт/м}^2$. Именно такое интенсивное облучение и будет непрерывно воздействовать на солнечные батареи, располагаемые на геостационарной орбите. Наряду с положительными досто-

инствами солнечно-космической электростанции (СКЭС) следует учитывать два фактора, снижающие ее эффективность. Первый фактор - двойное преобразование: сначала энергии постоянного тока солнечных батарей в энергию СВЧ колебаний в космическом сегменте СКЭС, затем обратное преобразование энергий на Земле. Второй фактор: небольшие потери энергии за счет распространения СВЧ сигнала в атмосфере Земли.

Но даже с учетом этих негативных факторов эффективность космической электростанции (СКЭС) по сравнению с наземной (СЭС) увеличивается на порядок и составляет не менее 10%.

Общая схема передачи энергии с помощью СВЧ излучения со СКЭС на Землю приведена на рис. 3 и 4.

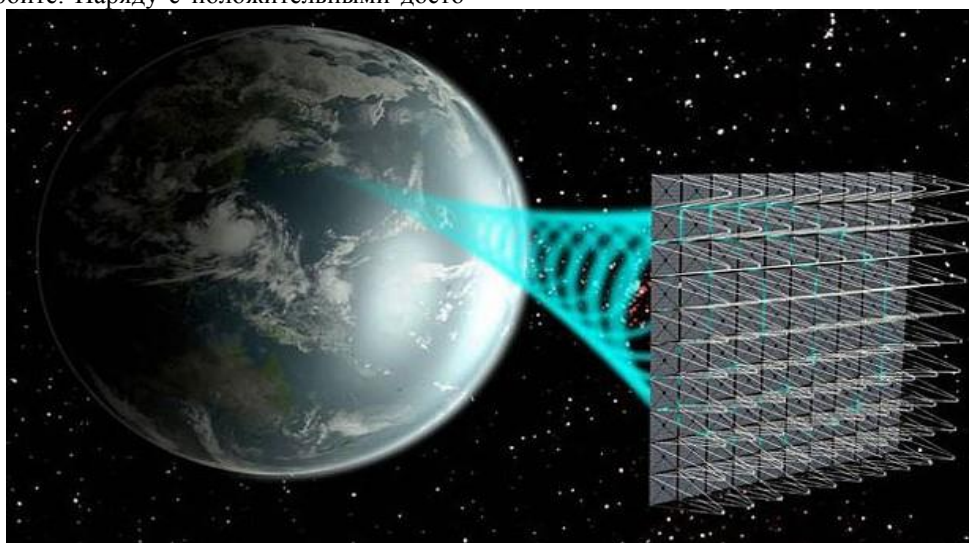


Рис.3. Передача СВЧ излучения из космоса

Рассмотрим структуру СКЭС, состоящую из двух сегментов : космического и наземного (рис.4).

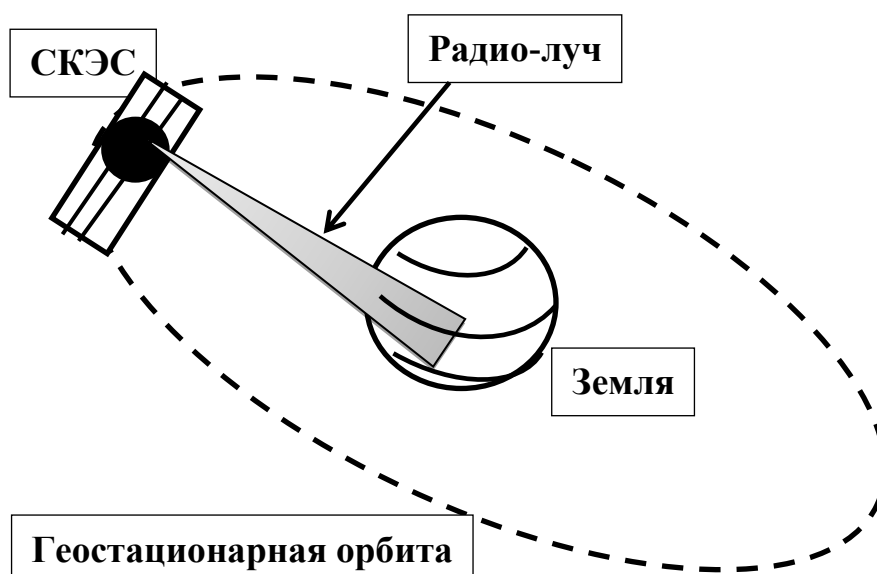


Рис. 4. Передача энергии со СКЭС на Землю

Космический сегмент, располагаемый на геостационарной орбите (36000 км относительно Земли - рис.2 - 3) включает :

- солнечные батареи (1), обращенные своей плоской поверхностью к Солнцу;
- определенное число СВЧ полупроводниковых генераторов (2), преобразующих энергию постоянного тока, вырабатываемую солнечными батареями, в СВЧ электромагнитные колебания;
- такое же число излучателей, образующих фазированную антенную решетку (3), направленную в сторону Земли;

- две экстремальные системы автоматического регулирования, первая из которых обеспечивает максимум потребления батареями солнечной энергии, вторая – непрерывное направление диаграммы направленности антенной решетки в требуемое место на Земле, где расположена приемная антенна.

В качестве исходных данных для расчета системы примем: высота СКЭС над Землей $H=36000$ км ; диаметр луча диаграммы направленности на Земле $D=25$ км, частота излучаемого сигнала $f=6$ Гц (длина волны $\lambda=5$ см).

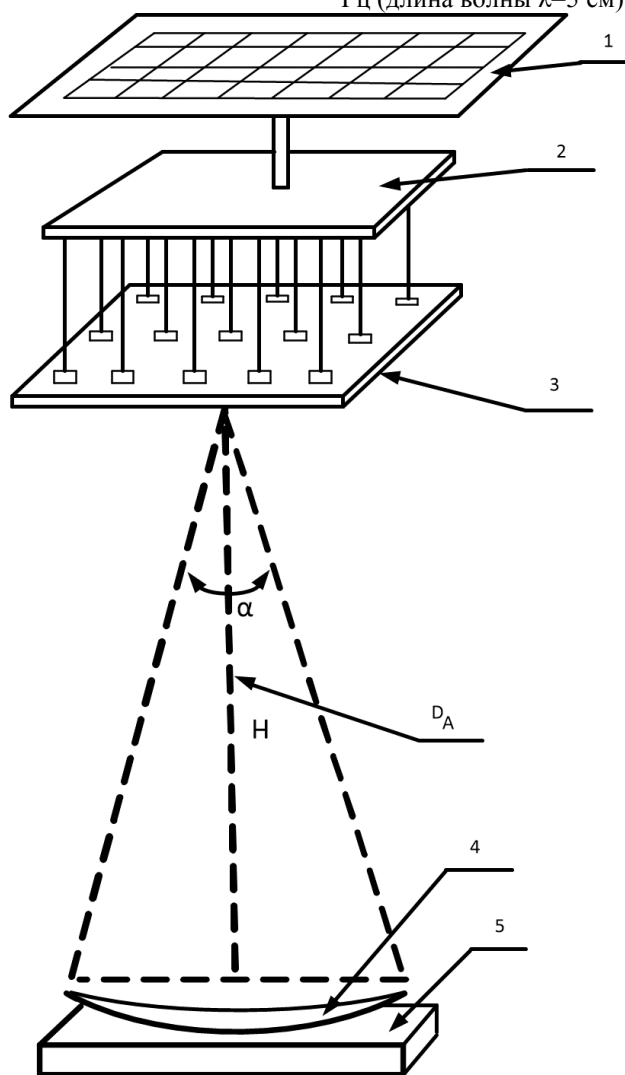


Рис.4. Структура СКЭС

Согласно рис.2, требуемый телесный угол диаграммы направленности антенны наземного терминала

$$\alpha = 2 \cdot \left(\frac{180}{\pi} \right) \cdot \arctan(D_A/2H) = 0,044^\circ. \quad (3)$$

При использовании в СКЭС фазированной антенной решетки (ФАР) (рис.4) диаграмма направленности в одно плоскости [7] :

$$E(\Theta) = U_0 \left| \frac{\sin(0,5 N \beta)}{\sin(0,5 \beta)} \right|, \quad (4)$$

$$\text{где } \beta = (2\pi b/\lambda)(\sin \Theta - \sin \Theta_0). \quad (5)$$

$$\Theta_0 = \arcsin(\Delta\phi\lambda/2\pi b) \quad - \quad (6)$$

угол главного лепестка диаграммы направленности,

λ - длина волны, см ; b - расстояние между двумя соседними излучателями, см; N - число излучателей в одно плоскости, $\Delta\phi$ - разность фаз сигналов между двумя соседними излучателями

При вертикальном луче угле $\Theta_0=0$ и $\Delta\phi=0$.

Диаграмма направленности ФАР, вычисленная согласно (4-6) при $\Theta_0=0$, $\Delta\varphi=0$, $b/\lambda=5$ и числе излучателей в одной плоскости $N=100$, в двух

масштабах построена на рис.5, где угол Θ в градусах.

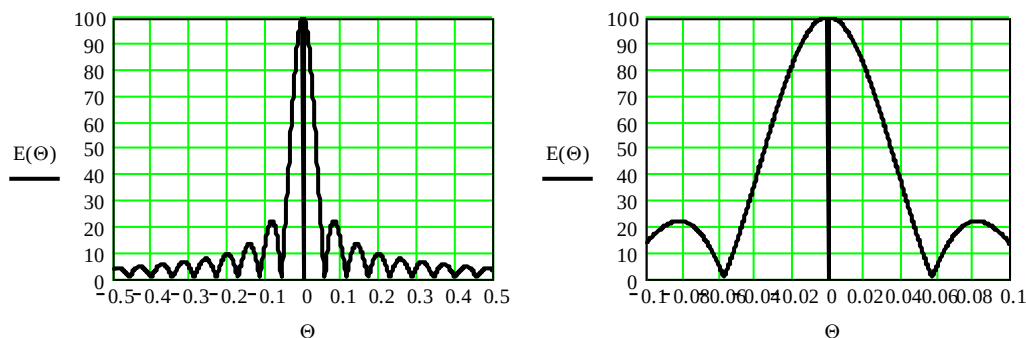


Рис.5. Диаграмма направленности ФАР при $N=100$

Ширину главного лепестка диаграммы направленности ФАР по уровню, равному 0,7 от максимального значения, при $N \gg 1$ можно определить по графику рис.5 или следующей эмпирической формуле:

$$\Delta\Theta^0 \approx 50 / (N(b/\lambda)). \quad (7)$$

В рассматриваемом случае при выбранных выше параметрах ФАР согласно (5) получим: $\Delta\Theta=0,05^\circ$ при размерах диаметра «пятна» луча СВЧ излучения на Земле $D=25$ км (рис.4)

К каждому излучателю ФАР подводится от полупроводникового генератора, структурная схема которого приведена на рис.6, сигнал

частотой 6 ГГц мощностью 100 Вт. На рис.5 приняты обозначения: 1 - СВЧ автогенератор, 2, 3- СВЧ усилители мощности, 4 - момовое квадратурное устройство [8]. В предварительных каскадах используются нитрид галлиевые полевые транзисторы типа SGK5867-30A, в выходном - SGK5867-30A -100A [9] /. При числе излучателей равным $K=10000$ общая мощность СВЧ сигнала, излучаемая ФАР, составит 1МВт. Для излучения всеми СВЧ генераторами сигналов равной частоты и одинаковой фазы все автогенераторы связываются между собой, обеспечивая режим взаимной синхронизации [10].

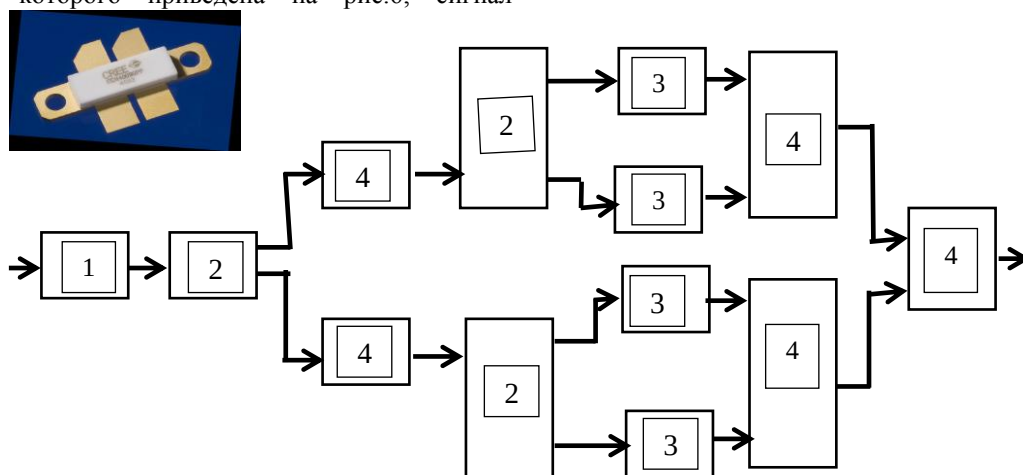


Рис. 6. Структурная схема СВЧ генератора мощностью 100 Вт.

Следует заметить, что не только в будущем, но уже и в настоящее время можно использовать способ передачи электрической энергии с помощью СВЧ излучения: при дистанционном пополнении энергии аккумуляторов беспилотного летательного аппарата (квадрокоптера) без посадки последнего на Землю,

Литература

1. Передача энергии без проводов . - <https://freelansim.ru/tasks/224357>
2. Передача энергии лазером. - http://www.laserportal.ru/content_448

3. Капица П.Л. Электроника больших мощностей. // Успехи физических наук, 1962, №10, вып.2 ,
4. Чопра К., Дас С.Тонкопленочные солнечные элементы – М. Мир, 1986.
- 5.Глазер П.Э. Статья «Перспективы спутниковой солнечной энергетики» ТИИЭР, 1977, т.65, №8, с.67-86.
- 6.Гриликес В.А. Солнечные космические электростанции. -Л.Наука, 1986

7. Каганов В.И. Радиоэлектронные системы автоматического управления.- М.: Горячая линия-Телеком, 2009.

8 . Каганов В.И. СВЧ полупроводниковые радио передатчики.-М.: Раддио и связь, 1981

9. Гаврилов В.А. Мощные нитрид-галлиевые транзисторы. // Новости электроники., 2015, № 7.

10. Каганов В.И. Буй Хыу Чик. Формирование СВЧ излучения повышенной мощности.// Инженерная физика, 2018, №6 .

Gaydaychuck V.V.,

doctor of technical Sciences, Professor, head of the Department of theoretical mechanics

ORCID/ 0000-0003-2059-7433

Kyiv National University Architecture of Construction

Kosheviy O.O.

assistant Professor of the Department of theoretical mechanics

ORCID/ 0000-0002-1903-2905

Kyiv National University Architecture of Construction

Гайдайчук В.В.,

д.т.н. професор, завідувач кафедри теоретичної механіки

Київського національного університету будівництва і архітектури

Кошевий О.О.

асистент кафедри теоретичної механіки

Київського національного університету будівництва і архітектури

OPTIMIZATION OF CYLINDRICAL SHELLS SUBJECT TO STATIC AND DYNAMIC LOADS.

ОПТИМІЗАЦІЯ ЦИЛІНДРИЧНОЇ ОБОЛОНКИ З УРАХУВАННЯМ СТАТИЧНИХ І ДИНАМІЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ.

Анотація. Розглядається параметрична оптимізація циліндричної оболонки з урахуванням статичного і динамічного навантаження, цільова функція – маса, змінні проектування – товщина оболонки, ліміти – напруження по Мізесу та переміщення по осям X, Y, Z . Об'єктом дослідження є паливний резервуар з плаваючим дахом. Дослідження проводилися в програмному комплексі Femap Nastran. Зроблені висновки по даним дослідженням.

Ключові слова: циліндрична оболонка, оптимізація, переміщення, напруження по Мізесу, сейсмічне навантаження.

Вступ. Сучасна європейська країна повинна ефективно використовувати ресурси і матеріали. Розвиток в цьому напрямі допоможе країні стати розвинутою - конкурентноспроможною.

Будь яке виробництво і масштабні проекти починаються з розбудови матеріальної бази. На етапі планування та проектування промислових комплексів потрібно максимально оптимізувати конструкцію для того, щоб майбутня споруда була ефективною і як найшвидше почала приносити інвесторам прибуток. Промисловий комплекс, чи будь яка будівля і споруда задовольняти граничним станам, та вимогам будівельних норм, та мати оп-

тимальну вартість експлуатації. Схожі роботи були представлені в різних країнах світу [1,2,3].

В статі розглянута методика оптимізації металевих просторових конструкцій з урахуванням комбінації статичних і динамічних навантажень. Територія на якій ведеться будівництво промислової споруди є сейсмічно активна зона, на прикладі Одеської області. В місцевості від судноплавального порту, до кордону Румунії. За допомогою методів розрахунків будівельної механіки і математичного методу градієнтного спуску виконується оптимізація резервуару. Типи резервуарів представлено на рис. 1.1-1.4 [4]



a



b



c

Рис.1.1 Типи резервуарів: а) надземна циліндрична вертикаль з нерухомим дахом [i1]; б) циліндрична вертикаль з плаваючим дахом [i2]; в) циліндрична вертикаль з плаваючим дахом і з нерухомим дахом [i3]
Fig. 1.1 Types of tanks: a) above-ground cylindrical vertical with immovable roof; b) cylindrical vertical with floating roof; c) cylindrical vertical with floating roof and with immovable roof

В резервуарі знаходяться нафтові чи хімічні продукти під звичайним атмосферним тиском навколишнього середовища. Зазвичай, такий тип резервуару з плаваючим дахом використовується для економії коштів на покрівлю і саме головне для забезпечення пожежної безпеки під час його експлуатації. Покрівля резервуару опускається або піднімається в залежності від кількості продукту в резервуарі, це веде до не накопичення вогнебезпечних випарів від різних речовин. Снігове навантаження розподіляється на спеціальну технологіч-

ну систему стійок, або за допомогою повітря у спеціальних подушках. Це призводить до того, що конструкція дуже легка і плаває на поверхні рідини, при такому рішенні необхідно забезпечити водовідведення.

Резервуар має наступні геометричні параметри:

- діаметр резервуару 18,0 м.
- висота резервуару 12 м.
- товщина оболонки: 9 мм.

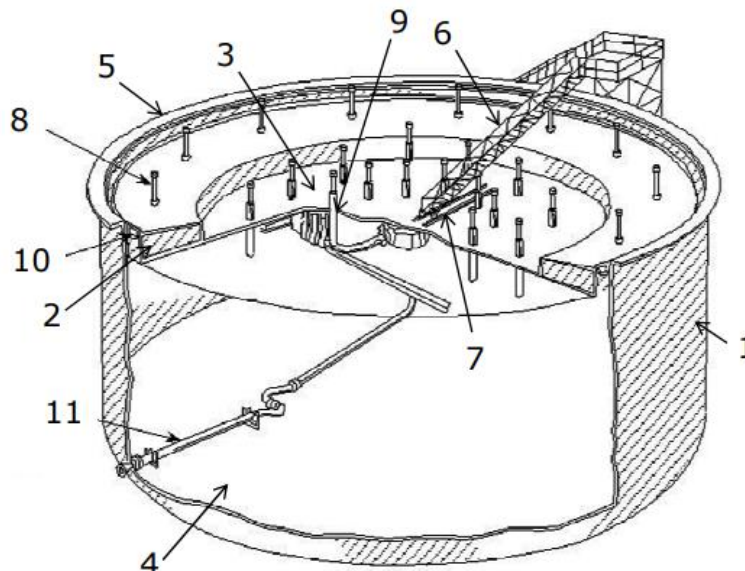


Рис.1.2 Схема резервуару з плаваючим дахом: 1 – оболонка; 2 – понтон; 3 – мембрана; 4 – дно резервуару; 5 – вітрове кільце; 6 – розкладні сходи; 7 – доріжка для обслуговування резервуару; 8 – опори покрівлі; 9 – аераційний клапан; 10 – герметизація плаваючого даху; 11 – дренаж покрівлі

Fig.1.2 Diagram of the tank with floating roof: 1 – shell; 2 – pontoon; 3 – membrane; 4 – the bottom of the tank; 5 – wind ring; 6 – folding ladder; 7 – track for tank service; 8 – supports of the roof; 9 – aeration valve; 10 – sealing of the floating roof; 11 – drainage of the roof

Теоретичні відомості. При оптимізації використовується математичний метод проєкції градієнта, який використовує інформацію тільки перших похідних, або градієнту, і полягає в побудові послідовності модифікацій проєкту, котрий забезпечує збіжність в точці з мінімальним значенням функції цілі (точці оптимуму), при цьому виконується розрахунок на базі метода скінчених елементів будівельної механіки, це представлено в роботах [5,6,7]

Вихідні дані. Резервуар з плаваючим дахом розраховується за навантаженнями згідно [8,9].

Оптимізація циліндричної оболонки виконується в американському програмному комплексі Femap Nastran, по розробленому алгоритму для знаходження оптимальної товщини оболонки.

Алгоритм оптимізації дозволяє знайти оптимальне рішення для циліндричної оболонки в ході максимізації або мінімізації цільової функції. Цільова функція для циліндричної оболонки є маса. Зміними проєктування є товщина оболонки в кожному скінченному елементі. Також присутні обмеження, в нашому випадку використовується 3 види обмежень:

- за напруженнями по Мізесу;

- за переміщенням по осі $\text{Total Translation} = \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2}$;

- за власними частотами коливання конструкції які накладені на відгук конструкції і на змінні проєктування.

Ціль дослідження. В ході розрахунку виконується знаходження оптимальної товщини циліндричної оболонки при мінімізації цільової функції - маси. Оптимізація паливного резервуару виконується з урахуванням сейсмічного навантаження і при цьому відбувається коливання нафтових продуктів в період землетрусу. Розрахунок дає можливість зрозуміти, як впливає сейсмічне навантаження на загальні напруження і переміщення в резервуарі, а також навантаження від нафтових продуктів які коливаються і яка оптимальне рішення по товщини циліндричної оболонки, яке буде задовольняти ліміти по міцності і переміщенням оболонки.

Результати числових досліджень Розрахунок резервуару по оптимізації розбитий на два етапи: при дії врахування коливань речовини в динамічному розрахунку при сейсмічному навантаженні, і при відсутності коливань рідини. Це необхідно для оцінки дії навантаження на конструк-

цію з урахуванням параметричної автоматизованої оптимізації.

Перший етап розрахунку. Навантаження, які діють на конструкцію:

- Власна вага резервуару;
- Вітрове навантаження;
- Статичне навантаження від речовин, які знаходяться в резервуарі;
- Сейсмічне навантаження по осі Y I Z за шкалою Ріхтера – VII - балів.

Виконується комбінація цих навантажень згідно будівельних норм України, а саме [1]

Цільова функція – маса

Змінні проектування – товщина оболонки

Ліміт – напруження по Мізесу 260 МПа і загальне переміщення конструкції Total Translation =

$$\sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2} = 20 \text{ мм}$$

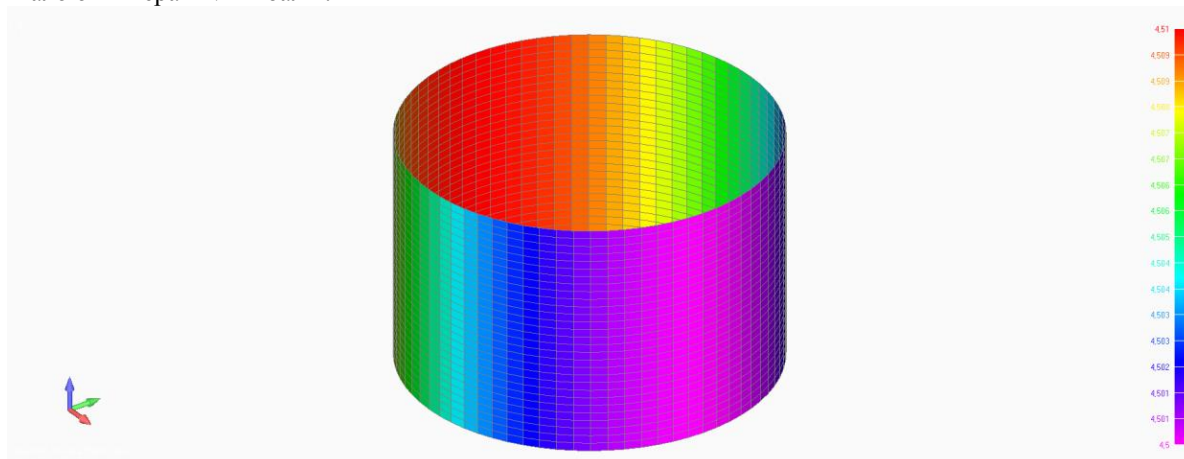


Рис 1.3 Розподілення товщини оболонки до оптимізації в мм
Fig. 1.3 The distribution of the thickness of the shell after optimization in mm

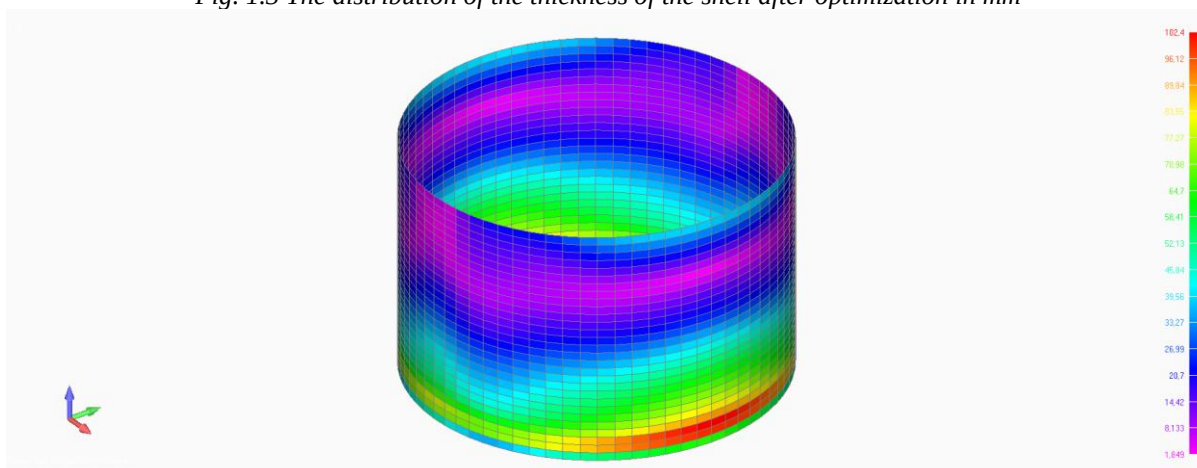


Рис 1.4 Напруження по Мізесу оболонки до оптимізації в МПа
Fig. 1.4 Stress by Mises of the shell after optimization in MPa

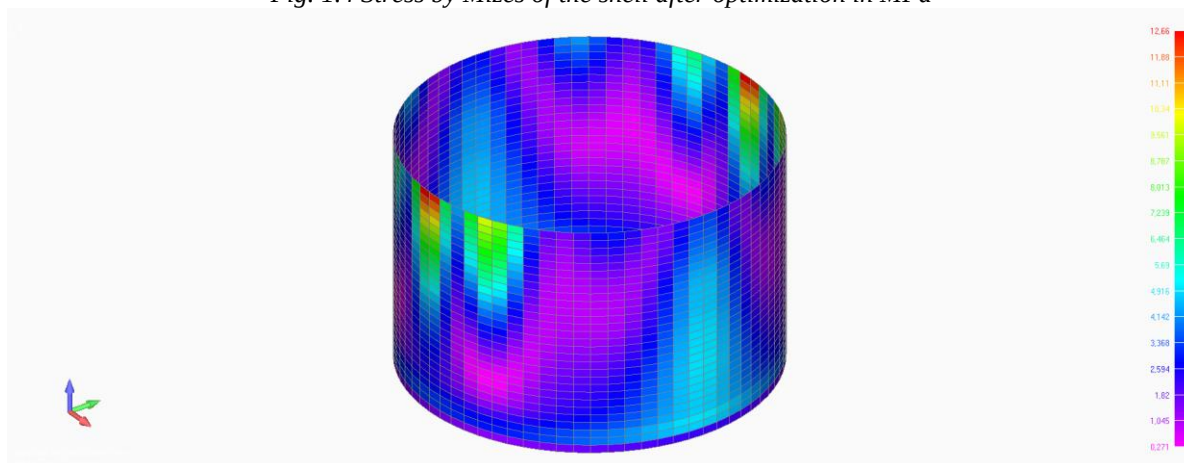


Рис 1.5 Переміщення оболонки до оптимізації в МПа
Fig. 1.5 Stress by Mises of the shell before optimization in MPa

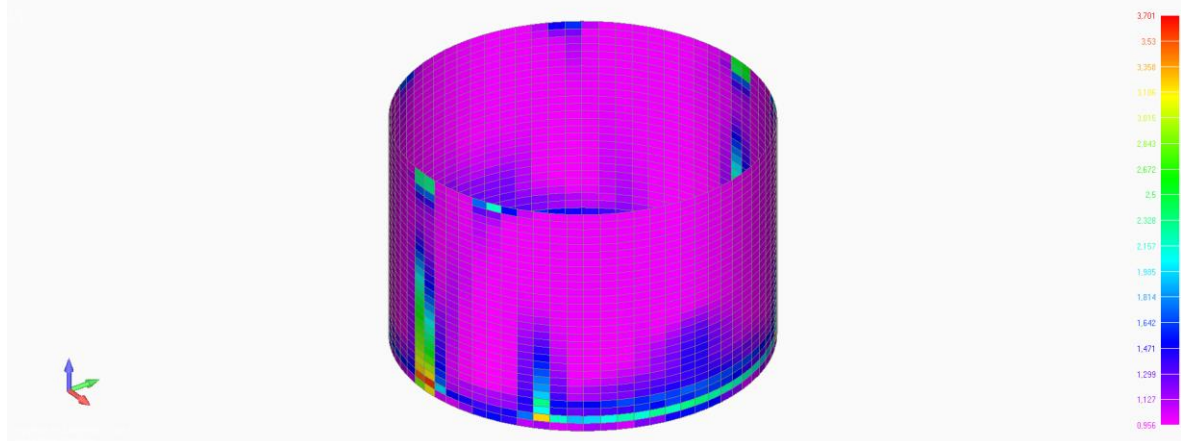


Рис 1.6 Розподілення товщини оболонки після оптимізації в мм
Fig. 1.6 The distribution of the thickness of the shell after optimization in mm

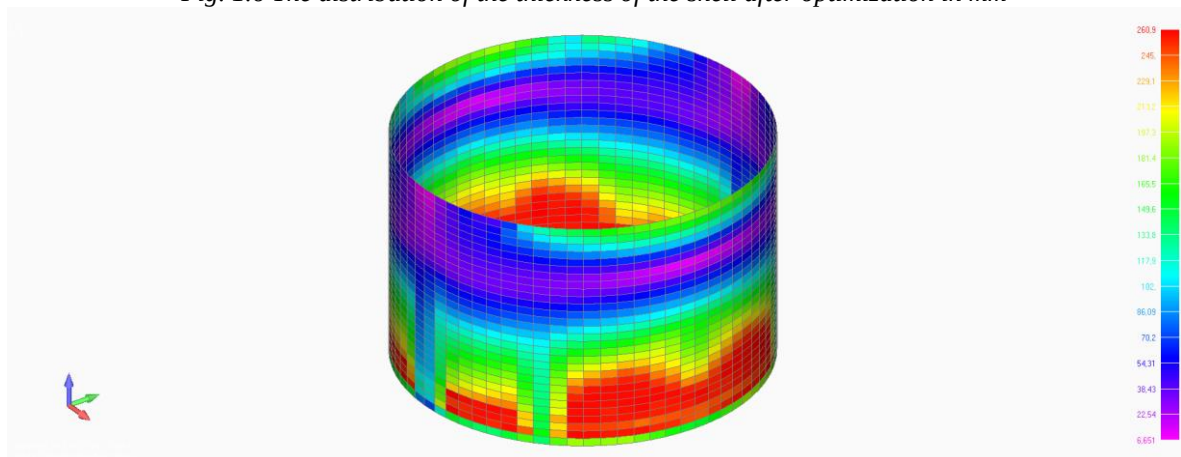


Рис 1.7 Напруження по Мізесу оболонки після оптимізації в МПа
Fig. 1.7 Stress by Mizes of the shell after optimization in MPa

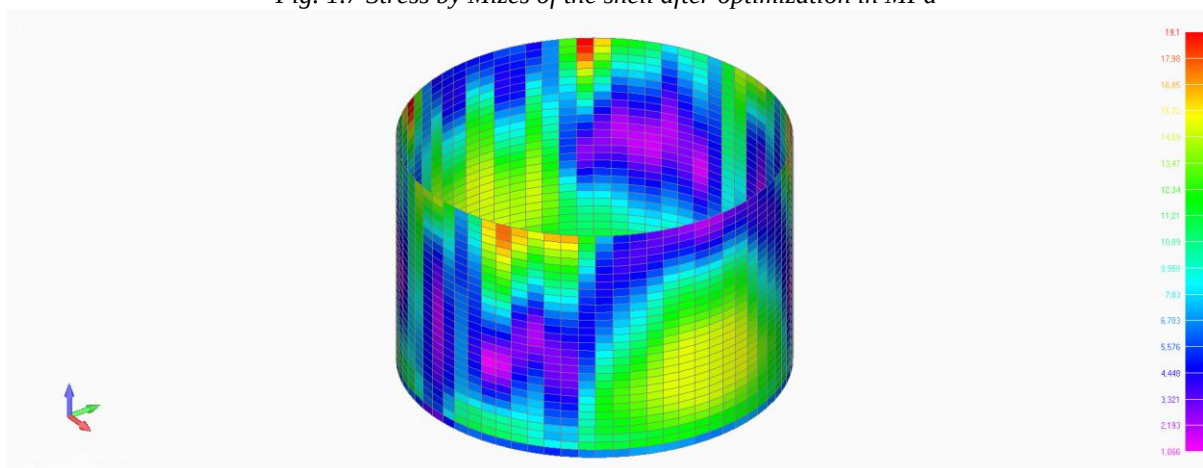


Рис 1.8 Переміщення оболонки після оптимізації в МПа
Fig. 1.8 Stress by Mizes of the shell before optimization in MPa

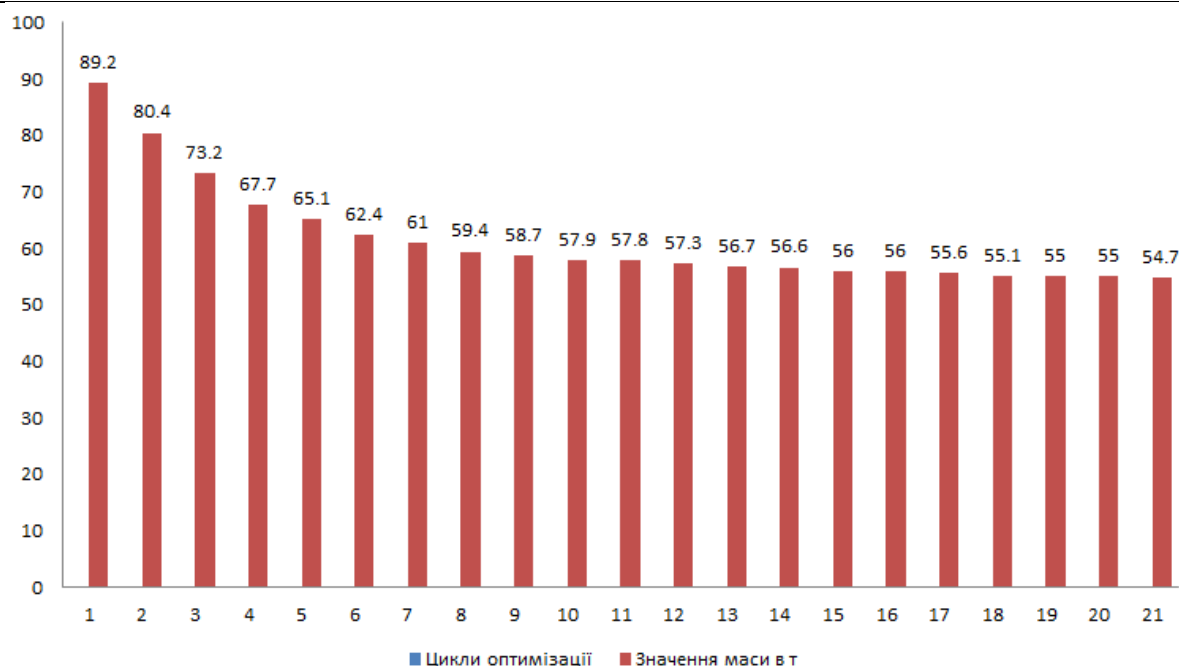


Рис. 1.9 Діаграма зменшення маси оболонки по циклам оптимізації
Fig. 1.9 Chart reduce the weight of the shell according to the cycles of optimization

Висновки по першому етапу: Розрахунок показав рис 1.3 і 1.6, щоб задовольнити потреби по міцності і переміщенням циліндричної оболонки розподілення товщини оболонки достатньо від 2 до 8 мм. Так як на початку була задана товщина оболонки 9 мм, то маса циліндричної оболонки зменшилась на 38.7 % діаграма рис 1.9. Ця економія металу є відносною, після всіх перевірок на стійкість оболонки і процесу проектування оболонки – ми отримаємо абсолютну економію. При цьому максимальні напруження по Мізесу зросли з 102.4 МПа до 261 МПа рис 1.4 і 1.7, та переміщення збільшилися з 12.6 мм до 19.1 мм рис. 1.5 і 1.8. Слід зазначити, що при заданні комбінації навантажень для постійних навантажень коефіцієнт запасу становив 1.1, для вітру 1.4, для сейсмічного навантаження 1.1 – при цьому територія обиралась наступна, землетрус більше VII балів за шкалою Ріхтера збільшитися не може.

Другий етап розрахунку. Навантаження, які діють на конструкцію:

- Власна вага резервуару;
- Вітрове навантаження;
- Статичне навантаження від речовин, які знаходяться в резервуарі;
- Сейсмічне навантаження по осі Y I Z за шкалою Ріхтера – VII - балів;
- при сейсмічному навантаженні моделюються маси речовин, які коливаються разом із самим резервуаром.

Виконується комбінація цих навантажень згідно будівельних норм України, а саме [8,9]

Цільова функція – маса

Змінні проектування – товщина оболонки

Ліміт – напруження по Мізесу 260 МПа і загальне переміщення конструкції $Total Translation = \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2} = 15 \text{ мм}$

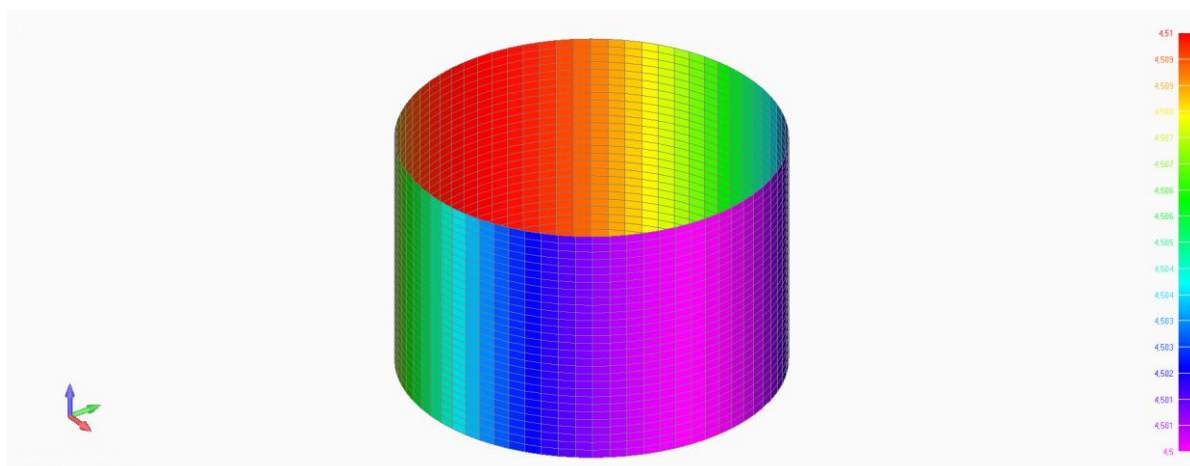


Рис 2.1 Розподілення товщини оболонки до оптимізації в мм
Fig. 2.1 The distribution of the thickness of the shell after optimization in mm

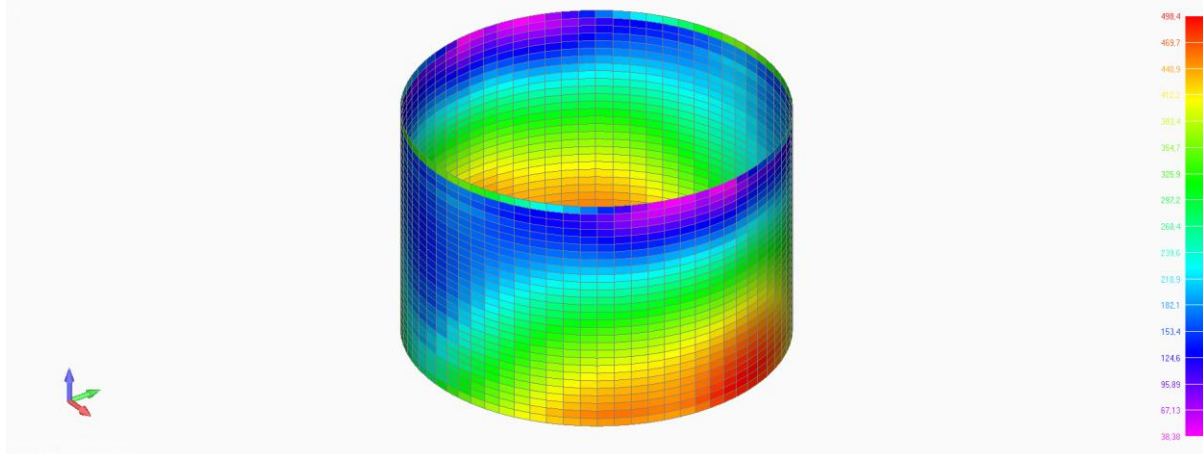


Рис 2.2 Напруження по Мізесу оболонки до оптимізації в МПа

Fig. 2.2 Stress by Mises of the shell after optimization in MPa

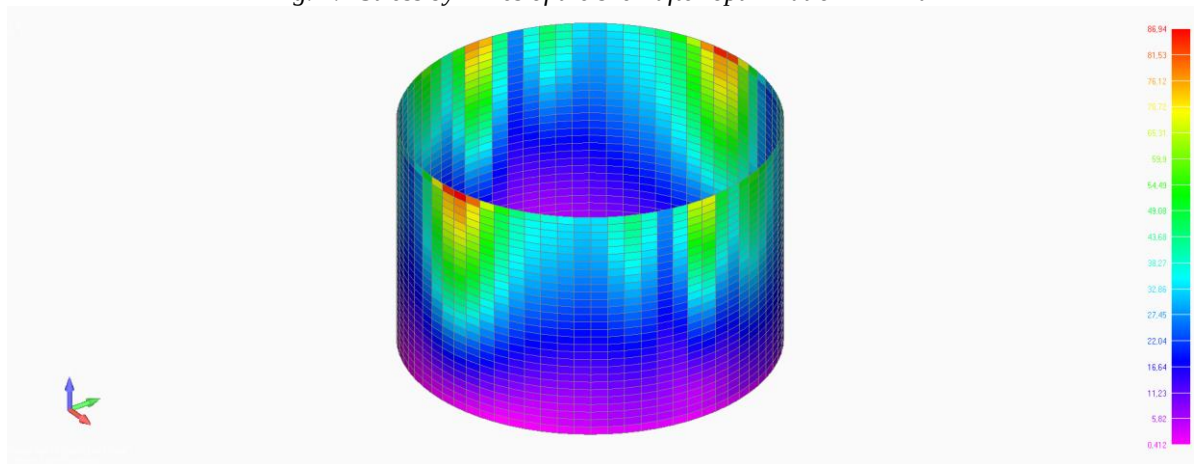


Рис 2.3 Переміщення оболонки до оптимізації в МПа

Fig. 2.3 Stress by Mises of the shell before optimization in MPa

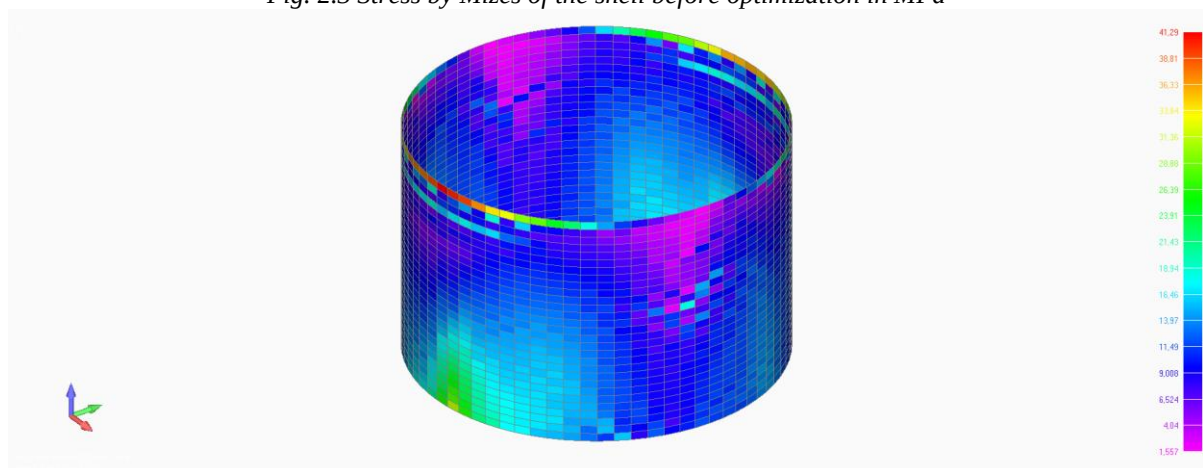


Рис 2.4 Розподілення товщини оболонки після оптимізації в мм

Fig. 2.4 The distribution of the thickness of the shell after optimization in mm

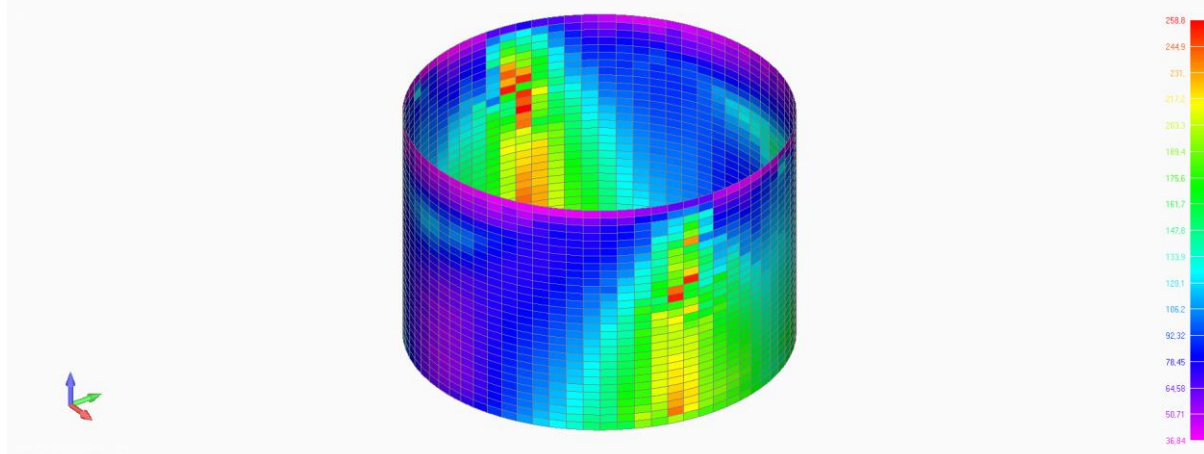


Рис 2.5 Напруження по Мізесу оболонки після оптимізації в МПа

Fig. 2.5 Stress by Mizes of the shell after optimization in MPa

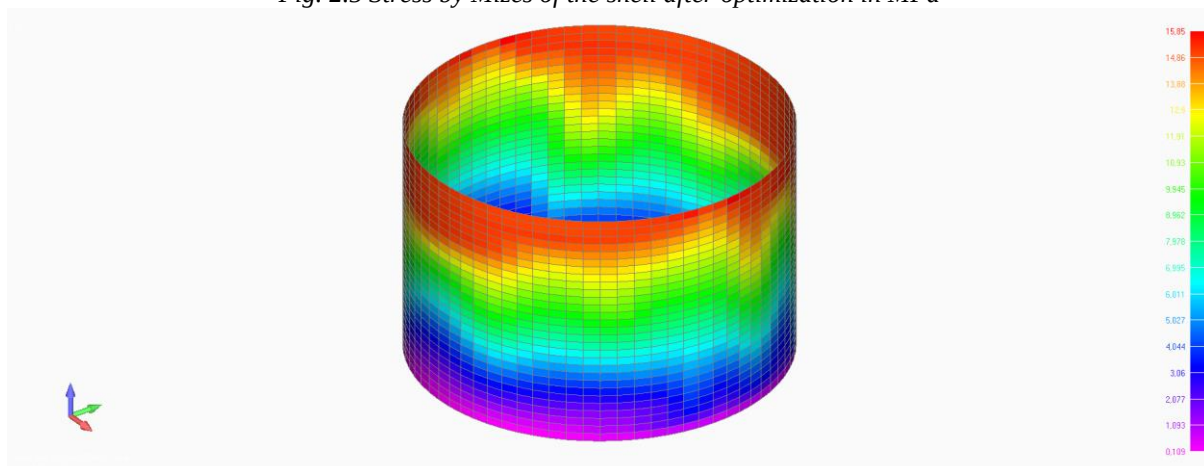


Рис 2.6 Переміщення оболонки після оптимізації в МПа

Fig. 2.6 Stress by Mizes of the shell before optimization in MPa

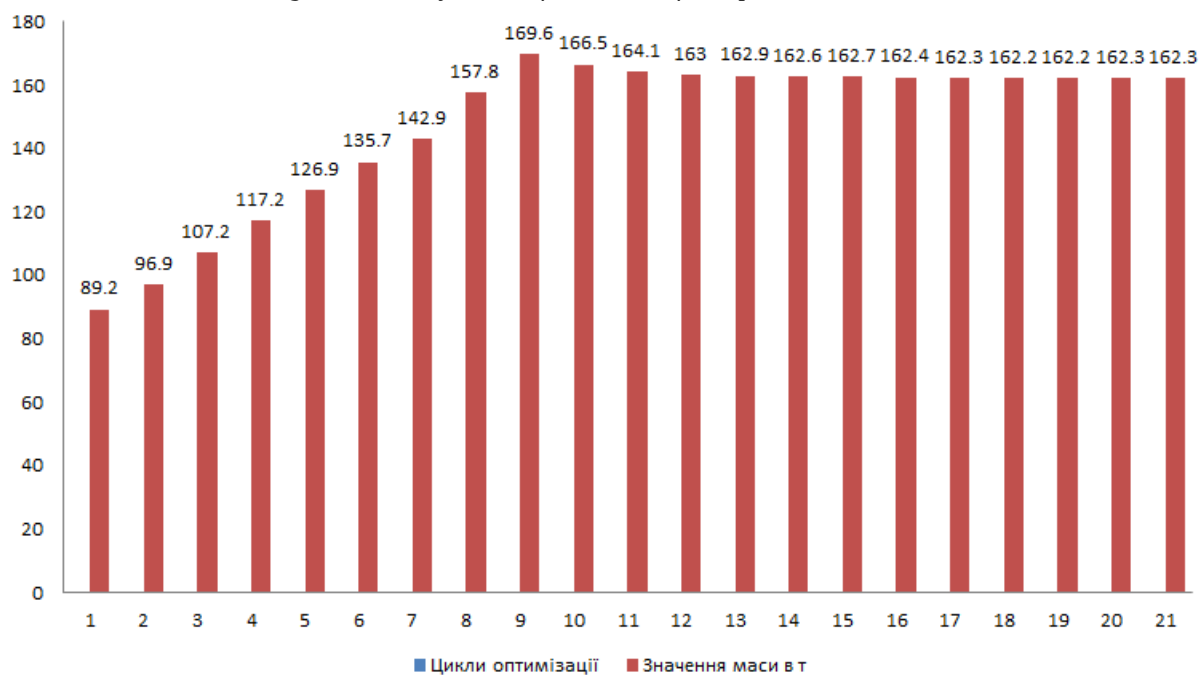


Рис. 2.7 Діаграма зменшення маси оболонки по циклам оптимізації

Fig. 2.7 Chart reduce the weight of the shell according to the cycles of optimization

Висновки по другому етапу: Розрахунок показав, щоб задовольнити потреби по міцності і

переміщення циліндричної оболонки розподілення товщини оболонки достатньо від 4 до 82 мм, так

как на початку було задана товщина оболонки 9 мм рис. 2.1 і 2.4. То маса циліндричної оболонки збільшилась на 82,2 % рис 2.7. Це оптимальне розподілення маси оболонки є відносним, після всіх перевірок на стійкість оболонки і процесу проектування оболонки – ми отримуємо абсолютне оптимальне рішення. При цьому максимальні напруження по Мізесу зменшились з 498,4 МПа до 258,8 МПа рис 2.2 і 2.6, та загальне переміщення зменшилося з 87 мм до 16 мм рис 2.3 і 2.6. Слід зазначити, що при заданні комбінації для постійних навантажень коефіцієнт запасу становив 1.1, для вітру 1.4, для сейсмічного навантаження 1.1 – при цьому територія обиралась наступна, землетрус більше VII балів за шкалою Ріхтера збільшитися не може.

Загальні висновки: В даній статі розглядається оптимізація циліндричної оболонки, яка є паливним резервуаром. Було визначено, що для пожежної безпеки даний вид конструкції дуже вдалий, також при цьому отримаємо зменшення навантаження на несучі конструкції паливного резервуару. Навантаження задавалося згідно будівельних норм України, а також комбінацією з відповідними коефіцієнтами надійності. Виконаний розрахунок на оптимізацію оболонки паливного резервуару в якому цільова функція є маса оболонки, а змінними проектування є товщина оболонки, ліміту: напруження по Мізесу та переміщення оболонки по осям X,Y,Z і виведення головного вектору переміщень оболонки $Total Translation = \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2}$. Розрахунок показав: при оптимізації оболонки паливного резервуару маса оболонки відрізняється на 297,2%; між першим і другим етапом розрахунком, а саме різниця в динамічному навантаженні – коливанні нафтових продуктів при сейсмічному навантаженні. Це означає, що для будівництва в сейсмічних районах без врахування цього навантаження неможливо виконувати будь які розрахунки, так як вони не будуть відображати реальний стан напружень і переміщень при комбінованому навантаженні. Після даного розрахунку виконується перевіряючий розрахунок на стійкість конструкції [20,21]. В подальшому планується заміна цільової функції за допомогою мови програ-

мування API в програмному комплексі Femap Nastran.

Література

1. Дедов Н.И., Истукіна В.Н. Оптимальное проектирование цилиндрических оболочек при неравномерном нагружении //Известия Самарского центра РАН// т. 18 №4 (2), 2016 с. 257-262;
2. Ng CT 2005. Optimization Design of Tall Buildings under Multiple Design Criteria. Final Year Project Thesis, Department of Building and Construction, City University of Hong Kong, Hong Kong Special Administrative Region (HKSAR), China;
3. Н. Nikral, S. Yoshitomi. Structural optimization method for 3D reinforced concrete building structure with shear wall. World Academy of Science engineering and technology international Journal of Civil and Environmental Engineering International Scholarly and Scientific Research and Innovation pp. 1352-1358. 2017;
4. Лапшин А.А. и др. Конструирование и расчет вертикальных цилиндрических резервуаров низкого давления Учебное пособие / А. А. Лапшин, А. И. Колесов, М. А. Агеева. – Н. Новгород: ННГАСУ, 2009. – 122 с;
5. Пермяков В.О., Перельмутер А.В. Оптимальное проектирование стальных стержневых конструкций. – К: ООО “Издательство Сталь”, 2008. – 538 с.;
6. Гайдайчук В.В. Параметрична оптимізація колон при різних геометричній формі поперечного перерізу / В.В. Гайдайчук, О.О. Кошевий, О.В.Кошева // Містобудування та територіальне планування: наук.-техн. збірник. К.: КНУБА. 2018. Вип.66.– С.78 – 89;
7. Гайдайчук В.В. Оптимальное проектирование і розрахунок на міцність оболонок і пластин при дії комбінованих навантажень в програмному комплексі Femap Nastran / В.В. Гайдайчук, О.О. Кошевий, О.П. Кошевий/ // Сучасні проблеми архітектури та містобудування: наук.-техн. збірник. К.: КНУБА. 2018. Вип.50.– С.314 – 324;
8. ДБН В.1.2-15:2009 Навантаження і впливи. Норми проектування;
9. ДБН В.1.1-12:2014 Будівництво у сейсмічних районах України. Норми проектування.

Володько О.В.,

кандидат технічних наук, доцент кафедри готельно-ресторанної і курортної справи Вищого навчального закладу Укоопспілки "Полтавський університет економіки і торгівлі", Полтава

Роговая Н.В.

кандидат технічних наук, доцент кафедри готельно-ресторанної і курортної справи Вищого навчального закладу Укоопспілки "Полтавський університет економіки і торгівлі", Полтава

Volodko Olha

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Hotel, Restaurant and Resort Business of the Higher Educational Institution of *Ukoopsoyuz* "Poltava University of Economics and Trade", Poltava

Rogovaya Nataliya

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Hotel, Restaurant and Resort Business of the Higher Educational Institution of *Ukoopsoyuz* "Poltava University of Economics and Trade", Poltava

РОЗРАХУНОК НАПРУЖЕНОГО СТАНУ НАГРІВНОГО ПОКРИТТЯ АЕРОДРОМІВ CALCULATION OF THE STRESSED STATE OF THE HEATING COVERING OF AERODROMES

Анотація. Робота присвячена вдосконаленню інженерних методів розрахунку аеродромного нагрівного покриття. Розвинені методи механічного розрахунку багатошарових плит на пружній основі за рахунок об'єднання методу розрахунку багатошарових плит з модифікованими методами розрахунку одношарових жорстких плит. Виконані дослідження напруженого стану та міцності запроєктованого аеродромного покриття. Достовірність розрахунків підтверджена результатами, отриманими рядом нескорельованих за їх теоретичною базою аналітичних та числових методів.

Abstract. The work is devoted to the improvement of engineering methods for calculating airfield heating. The methods of mechanical calculation of multilayer boards on an elastic basis are developed due to the unification of the method of calculation of multilayer plates with modified methods for calculating single-layer rigid plates. The research of the stressed state and durability of the projected airfield coverage has been performed. The reliability of the calculations is confirmed by the results obtained by a number of analytical and numerical methods that are not correlated with their theoretical basis.

Ключові слова: жорсткі покриття аеродромів, термонапружений стан, жорсткість, модуль пружності, міцність.

Key words: airfield rigid pavements, thermal stress state, hardness, elasticity modulus, strength.

Постановка проблеми у загальному вигляді. В час посилення транспортної інфраструктури та підвищення навантажень на аеродромні покриття велика увага приділяється питанню міцності та безпечності їх експлуатації, особливо в зимовий період. Важливою задачею зимового утримання аеродромних покриттів є боротьба зі снігозаметами, ожеледицею та слизькістю на їх поверхні [1]. Для очищення аеродрому від снігу, видалення або попередження ожеледі використовують різні методи та заходи, серед яких чільне місце займає і тепловий спосіб обігріву покриття, зокрема використання конструкцій з поверхневими нагрівними шарами.

До таких конструкцій відноситься і нагрівне аеродромне покриття з шаром фіброелектробетону, запроєктоване за участю співавтора [2,3]. Враховуючи, що норми проектування та класифікація таких покриттів – відсутні, а методи розрахунку практично не висвітлені, то дослідження у цьому напрямку є актуальним і перспективним.

Аналіз останніх досліджень та публікацій.

Значним вкладом в розробку методів проектування та розрахунку конструкцій аеродромних покриттів була робота Інженерного корпусу армії США (USASE) під час другої світової війни, яка створена на основі теорії пружних деформацій

Буссінеска для літаків, що мали одноколісні шасі. У 1945 році з'явився літак В-29 зі спареними колесами на шасі, що вимагало додаткових досліджень та призвело до введення поняття навантаження, еквівалентного одній вісі коліс (Equivalent Single Wheel Load), яке продовжує застосовуватися й сьогодні.

Вдосконаленням теорії розрахунку згинання плит на пружній основі Вінклера, що покладена в основу проектування жорстких аеродромних покриттів, займалися Х.М. Уестергард, В.З. Власов, М.І. Горбунов-Посадов, Б.Н. Жемочкін, Б.Г. Коренев, О.Я. Шехтер, С. А. Амбарцумян, В.Г. Пискунов, А.А. Рассказов, Р.Д. Паккард, Д. Піккет, Д.К. Рей, В.С. Трігоні.

Так, відомі рішення Уестергада для напружень в плиті нескінченних розмірів під центром круга, по якому розподілене навантаження, а також при розташуванні круга навантаження на краю та в куту плити. Н.Н. Іванов перетворив ці формули, застосовуючи замість коефіцієнту пружної вінклерової основи модуль деформації. І.А. Медніков розв'язав цю задачу в більш загальному вигляді, використовуючи модель пружного півпростору [4].

Рішення Іванова-Меднікова та Шехтера використовуються для розрахунку як цементобетонних

покриттів, так і основ під покриття з поверхневих асфальтобетонних шарів. В останньому випадку приймається, що поверхневі шари, які лежать над цементобетонною основою, розподіляють навантаження під кутом 45° від поверхні одягу до поверхні основи без врахування реальної міцності цих шарів. Багатошарова система замінюється двошаровою – плитою на пружній основі під навантаженням, розподіленім по колу, площа якого збільшена за рахунок розподілюючих властивостей поверхневих шарів. Такий підхід не можна вважати цілком задовільним, тому що не враховується реальна міцність поверхневих шарів.

Збільшення навантаження на покриття потребує розробки нових, більш міцних конструкцій з удосконаленням методик їх розрахунку. Тому, низкою вчених (Л.І. Манвеловим, Г.І. Глушаковим, Н.Н. Волховим, А.В. Михайловим, Л.І. Горьцьким та іншими) розроблена теорія розрахунку жорстких аеродромних покриттів, яка базується на наступних положеннях:

- розрахунок проводиться на дію статичного навантаження;
- в якості математичної моделі приймається плита Кірхгофа-Лява на пружній основі Вінклера (використовується рішення Б.Г. Коренева для вісесиметричного навантаження);
- при розрахунку двохшарових та багатошарових одягів з поверхневими шарами підсилення передбачається сумісна робота шарів плит.

Інший підхід (А. П. Сініціна, Ю. Н. Жемочкина, О. Н. Троцького, В.А. Кульчицького та інших) заснований на розв'язанні задач по розрахунку багатошарових покриттів та шарів посилення при дії експлуатаційних навантажень із спрощеними модельними передумовами для опису роботи шарів (несучий шар модулюється класичними пластинками Кірхгофа-Лява, а інші прошарки спрощеними моделями). Такий підхід, хоча і дає можливість враховувати конструктивні особливості покриттів, але теж не є точним.

Загальними недоліками вказаних методів є те, що в їх основі відсутня обґрунтована математична модель роботи багатошарової конструкції. Тому були намічені різні підходи до вирішення цієї задачі, зокрема розвиток теорій та моделей розрахунку шаруватих конструкцій та їх реалізація за рахунок застосування аналітичних та чисельних методів або їх об'єднання. Найбільш поширеними числовими методами для наближеного розв'язку диференціальних рівнянь є метод скінченних різниць (МСР), метод скінченних елементів (МСЕ), варіаційно-різницеви метод (ВРМ) та інші. У поєднанні з фізичними та математичними моделями ці методи дозволили розв'язувати задачі напруженого стану шаруватих конструкцій із застосуванням певних гіпотез.

Серед різноманітних гіпотез, покладених в основу теорії розрахунку шаруватих конструкцій, можна виділити гіпотезу прямої нормалі, на основі якої С. Г. Лехницьким, а більш повно С. О. Амба-

рцумяном, побудована теорія розрахунку шаруватих анізотропних пластин з жорсткими шарами. Ця теорія базується на основі виразів класичної теорії для поперечних дотичних і нормальних напружень, які включають відомі функції, що характеризують поперечні сили, та залежать від прогинів, визначених за класичною теорією.

Також для розрахунку шаруватих конструкцій широко застосовується модель С.П. Тимошенка, що основана на гіпотезі прямої лінії для пакету шарів, яка на відміну від гіпотези прямої нормалі, враховує деформації поперечного зсуву. Переміщення за товщиною шаруватої оболонки за цією теорією описано двома ступенями апроксимації. Але, вказані теорії можуть застосовуватись для конструкцій, жорсткості шарів яких відрізняються несуттєво.

Більш повно роботу шаруватих конструкцій з довільною кількістю шарів відображають теорії на основі гіпотези ламаної лінії, до таких відноситься теорія В.Г. Піскунова [5], сутність якої полягає у тому, що зсуви в ортогональних напрямках описуються похідною від однієї шуканої функції зсуву.

Чисельними методи визначення напруженого стану аеродромних покриттів займались Ю.В. Верюжський, І.П. Гамеляк, О.В. Родченко та інші.

Аналіз застосування вказаних методів дає змогу певного об'єднання методів розрахунку багатошарових та одношарових плит для створення ефективного підходу до визначення напруженого стану нагрівних конструкцій запропонованого типу.

Формування цілей статті. Метою досліджень є удосконалення інженерних методів механічного розрахунку нагрівних аеродромних покриттів за рахунок об'єднання методу розрахунку багатошарових плит з методом розрахунку одношарових жорстких плит, який модифіковано для розрахунку багатошарового покриття.

Виклад основного матеріалу. Зазвичай, напружений стан аеродромних покриттів розраховують як конструкцію на пружній вінклеровій основі за розрахунковим моментом на дію вертикального навантаження від повітряних суден. Розрахунковим граничним станом жорсткого аеродромного покриття є граничний стан по міцності. При цьому за вихідний згідно береться до уваги згинальний момент від дії колеса, центр відбитка якого збігається з розрахунковим перерізом.

Враховуючі сучасний напрямок досліджень по розробці жорстких аеродромних покриттів для досліджень була спроектована конструкція аеродромного покриття [2] із застосуванням фіброелектробетону [3], в якому система нагрівних шарів (тепловий розрахунок якої проведено у попередніх дослідженнях) поєднана з жорсткою цементобетонною тришаровою плитою (без розділюючих прошарків із жорстким з'єднанням між шарами), запропонованою Ю.В. Верюжським та О.В. Родченко [6] (рис.1). Шари нагрівного покриття товщиною (h_i) мають наступні механічні характери-

стики: модуль пружності (E_i); коефіцієнт Пуассона (ν_i):

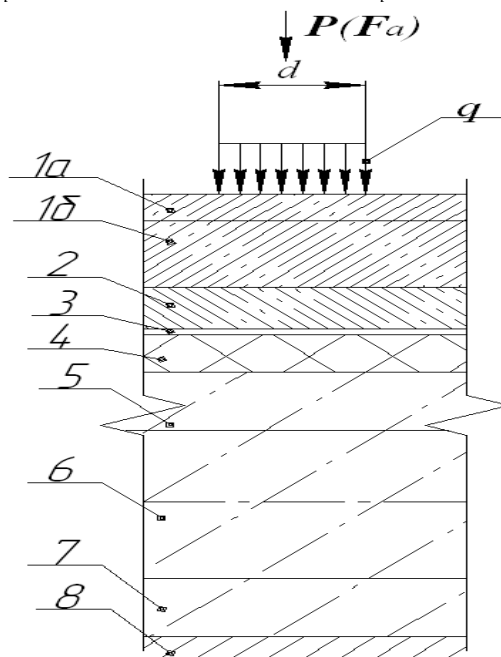


Рисунок 1 – Конструкція аеродромного нагрівного покриття :

1a – щебенево-мастиковий асфальтобетон-15 (БМП 60/90-52): $h_{1a} = 0,05$ м;

$E_{1a} = 3100$ МПа, $\nu_{1a} = 0,25$;

1b – полімерасфальтобетон: $h_{1b} = 0,1$ м;

$E_{1b} = 5500$ МПа, $\nu_{1b} = 0,25$;

2 – фіброелектробетон: $h_2 = 0,05$ м, $E_2 = 2100$ МПа, $\nu_2 = 0,25$;

3 – вуглецева сітка: $h_3 = 0,005$ м, $E_3 = 2000$ МПа, $\nu_3 = 0,25$;

4 – термоізоляція (піноскляний гравій): $h_4 = 0,05$ м, $E_4 = 1140$ МПа, $\nu_4 = 0,25$;

5,6,7 – тришарова цементобетонна плита:

$h_5 = h_7 = 0,12$ м, $h_6 = 0,30$ м;

$E_5 = E_7 = 3,53 \cdot 10^4$ МПа, $E_6 = 3,04 \cdot 10^4$ МПа, $\nu_{5,6,7} = 0,16$;

8 – пружна основа, $E_o = 100$ МПа, $\nu_o = 0,30$

В конструкції аеродромного покриття шар зносу складається з нижнього шару дрібнозернистого полімерасфальтобетону типу А, де в якості в'язучого використовуються термоеластопласти та поверхневого шару з щебенево-мастикового асфальтобетону ЦМА-15 з маркою бітуму БМП 60/90-52, модифікованого блоксополімером Кратон Д 1186 в кількості 3%.

Для забезпечення стійкості конструкцій до деформацій зсуву і зчеплення шару фіброелектробетону, який має цементобетонну матрицю, з бітумом використовується ґрунтовка поверхні шару фібробетону епоксидною смолою (Sikafloor-161 VP), в яку втоплюється дрібний щебінь фракціями 0,003- 0,007 м витратою 700 гр/м² та пропитується

бітумо-латексною емульсією (Sikastic-825). Застосування менших фракцій щебеню не дозволяє здійснити міцного зчеплення нижнього асфальтобетонного шару покриття, а більш крупних – приводить до виривання втопленого щебеню колесами будівного транспорту до укладки нижнього шару покриття.

Верхній та нижній шари несучого покриття прийнято з високоміцного цементобетону $B_{btb}4,4$, що забезпечує міцність кромки плит покриття на сколювання у випадку експлуатації сучасних надважких літаків з високим тиском повітря у пневматиках коліс шасі [6]. Між ними розташований менш міцний цементобетонний шар $B_{btb}3,6$. Використання у середньому шарі більш низького класу за міцністю при згині цементобетонної плити дозволяє суттєво знизити товщину типового аеродромного покриття.

Розв'язана модельна задача розрахунку наведеної конструкції аеродромного покриття на пружній основі з модулем пружності $E_o = 100$ МПа, еквівалентним згідно коефіцієнту основи $K_o = 80$ МПа/м.

Розрахункове навантаження ($F_d = 0,344$ МН) прийнято від штамп колеса сучасного надважкого повітряного судна Airbus 380 (максимальна злітна вага якого складає 562,001 т, рік вступу в експлуатацію 2007).

Тиск у шинах коліс основної опори 1,5 МПа.

Діаметр круга, що дорівнює по площині сліду колеса розрахункового судна, становить $d = 0,54$ м.

Таким чином, загальна товщина шарів покриття склала $h = 0,795$ м.

Для визначення напружено-деформованого стану нагрівного аеродромного покриття використано об'єднання методу багатшарових плит з мо-

дифікованим методом Шехтер для розрахунку одношарових плит [4].

За методом розрахунку багатошарових плит В.Г. Піскунова визначена циліндрична жорсткість пакету шарів за формулою

$$D = D_k + B_k C_k^2, k=1 \dots n, n=5, \quad (1)$$

де $D_k = E_k h_k^3 / 12(1 - \nu_k^2)$ – циліндричні жорсткості шарів, МН·м;

$B_k = E_k h_k / (1 - \nu_k^2)$ – жорсткості шарів на розтяг, МН/м;

C_k – координата серединної площини шару k відносно нейтральної поверхні.

Отримані жорсткості окремих шарів наведені в табл. 1.

Таблиця 1

Жорсткості шарів покриття

Жорсткість шарів на розтяг, МН/м	Відстані від верхньої площини, м	Циліндричні жорсткості шарів, МН·м	Координата серединної площини шару k , м
$B_{1a}=165,333$	$d_{1a}=0,0300$	$D_{1a}=0,03440$	$C_{1a}=-0,4793$
$B_{16}=293,333$	$d_{16}=0,0850$	$D_{16}=0,0611$	$C_{16}=-0,3793$
$B_2=112,000$	$d_2=0,1125$	$D_2=0,0233$	$C_2=-0,3293$
$B_3=10,867$	$d_3=0,1400$	$D_3=0,00002$	$C_3=-0,3018$
$B_4=60,800$	$d_4=0,1400$	$D_4=0,01267$	$C_4=-0,2743$
$B_5=4347,29$	$d_5=0,2250$	$D_5=5,21675$	$C_5=-0,1893$
$B_6=9359,60$	$d_6=0,4350$	$D_6=70,1970$	$C_6=-0,1293$
$B_7=4347,29$	$d_7=0,6450$	$D_7=5,2950$	$C_7=0,23067$

Положення нейтральної поверхні відносно верхньої площини плити знаходиться з виразу

$$\delta = \frac{\sum_{k=1}^n B_k d_k}{\sum_{k=1}^n B_k}, \quad (2)$$

де d_k – відстані від верхньої площини до серединної площини шару k , м.

Нейтральна поверхня, визначена за формулою (2), розташована в шарі 6 на відстані $\delta = 0,5043$ м від верхньої поверхні покриття.

Загальна циліндрична жорсткість пакету шарів аеродромного покриття, отримана за формулою (1), складає $D = 776,47$ МН·м.

При визначеній жорсткості багатошарової плити виникає можливість її розрахунку відомими аналітичними та числовими методами, користуючись як табличними даними, так і різноманітними програмними комплексами

(LIRA, SCAD та ін.) [7].

Для оцінки напруженого стану та міцності плити при згині перш за все необхідно знайти розрахункові згинальні моменти – M , МН. При відомому моменті можливе визначення нормальних напружень в шарах плити за формулою:

$$\sigma(z_k) = \frac{M E_k z_k}{D(1 - \nu_k^2)}, \quad (3)$$

де E_k, ν_k – модуль пружності та коефіцієнт Пуассона шару k ;

z_k – відстань від нейтральної поверхні до верхонь шарів плити.

$$c = y = -0,3393x^4 + 1,2309x^3 - 1,7997x^2 + 1,2373x + 0,036; x = \Delta R,$$

Для модифікації цього методу циліндричну жорсткість багатошарової плити, визначену за формулою (1) урівняно з жорсткістю еквівалентної однорідної системи, представленою узагальненою формулою

$$D = \frac{E h^3}{12(1 - \nu^2)}, \quad (4)$$

де h – загальна товщина багатошарової плити;

ν – зведений коефіцієнт Пуассона.

За модифікованим методом О.Я. Шехтер при загальній товщині покриття $h = 0,705$ м отримана зведена характеристика пружності, яка дорівнює

$$\frac{E}{1 - \nu^2} = \frac{12D}{h^3} = 18544,048 \text{ МПа}$$

та відповідно, зведений модуль пружності $E_{ze} = 18069,32$ МН.

Розрахунковий момент згідно методу Шехтер визначається формулою

$$M = \frac{c P (1 + \nu)}{2 \pi a R}, \quad (5)$$

де c – коефіцієнт, для якого існує функціональна залежність

пружна характеристика плити

$$a = \frac{1}{0,795} \sqrt[3]{\frac{6 \cdot 100}{18544,048}} = 4,2749 \text{ м}^{-1}.$$

При $aR=1,154233$ за функціональної залежності визначено розрахунковий коефіцієнт $c=0,3623$.

За формулою (5) отримано максимальний момент при згині $M=0,08472$ МН. Відповідне максимальне напруження на нижній поверхні плити, визначене за формулою (3), при $z=0,29067$ м становить $\sigma_{\max}=1,148$ МПа.

Напруження по товщині аеродромного покриття, розраховані за модифікованим методом

О.Я. Шехтер згідно формулі (3), представлені епюрою на рис. 2.

Достовірність результатів розрахунку перевірена розв'язком модельної задачі числовим та аналітичним методами.

Аеродромне покриття, подане модельною задачею, розглянено як багатошарову плиту на пружній вінклеровій основі з коефіцієнтом постелі пружної основи $K_O = 80$ МПа/м, еквівалентним модулю пружності $E_O = 100$ МПа.

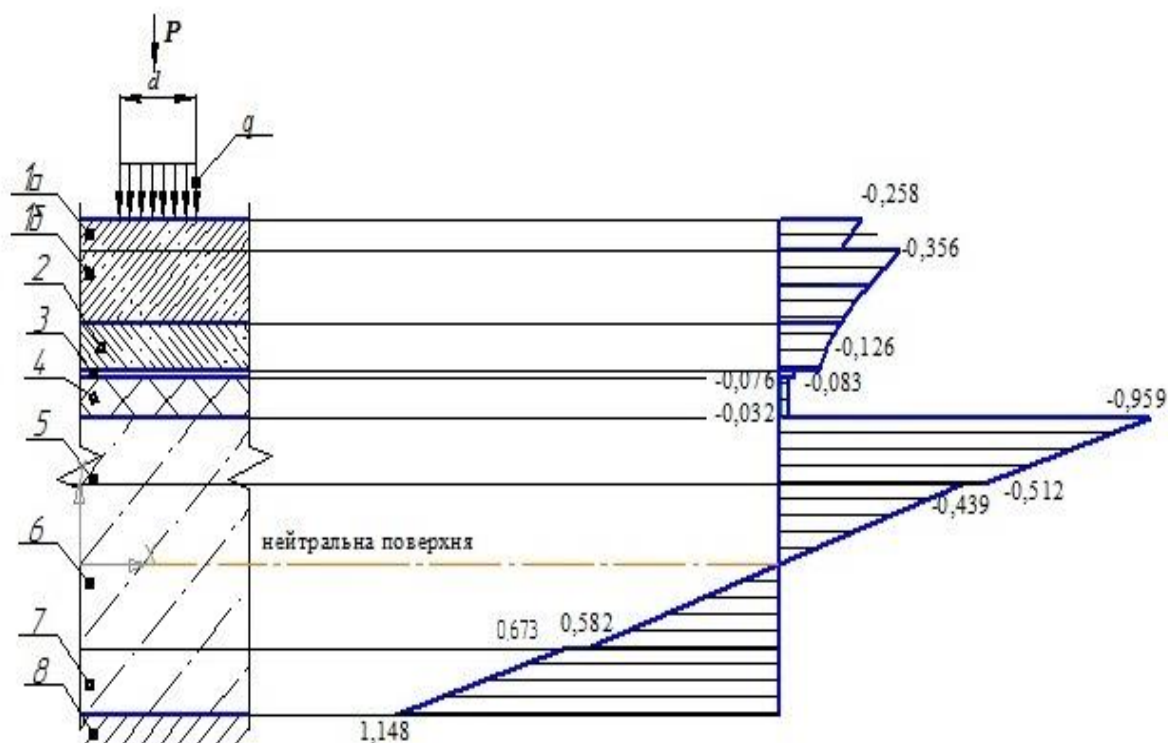


Рисунок 2 – Напруження (σ , МПа) по товщині аеродромного покриття

Згідно розрахункової схеми (рис. 3), запропонованою В.Г. Піскуновим [5], прийнято припущення, що прогини та напруження в її центрі під штампом не будуть практично відрізнятися від значень для плити нескінченних розмірів, оскільки згідно принципу Сен-Венана крайовий ефект у плиті швидко вщухає.

Крок сітки дорівнює діаметру штампів $\lambda = d$. Номера вузлів $i = 1, 2, 3 \dots 9, 10$. Плита радіусом 10λ шарнірно обперта по контуру. З кроком сітки $\lambda = d = 0,54$ м сформована матриця у загальній

та числовій формі.

При інтенсивності навантаження $q = \frac{4P}{\pi d^2} = 1,502$ МН/м² визначено значення вільного члену матриці – $L_O = 0,000144726$ м.

За допомогою розв'язаної системи скінченно-різницевих рівнянь визначені прогини в вузлах сітки.

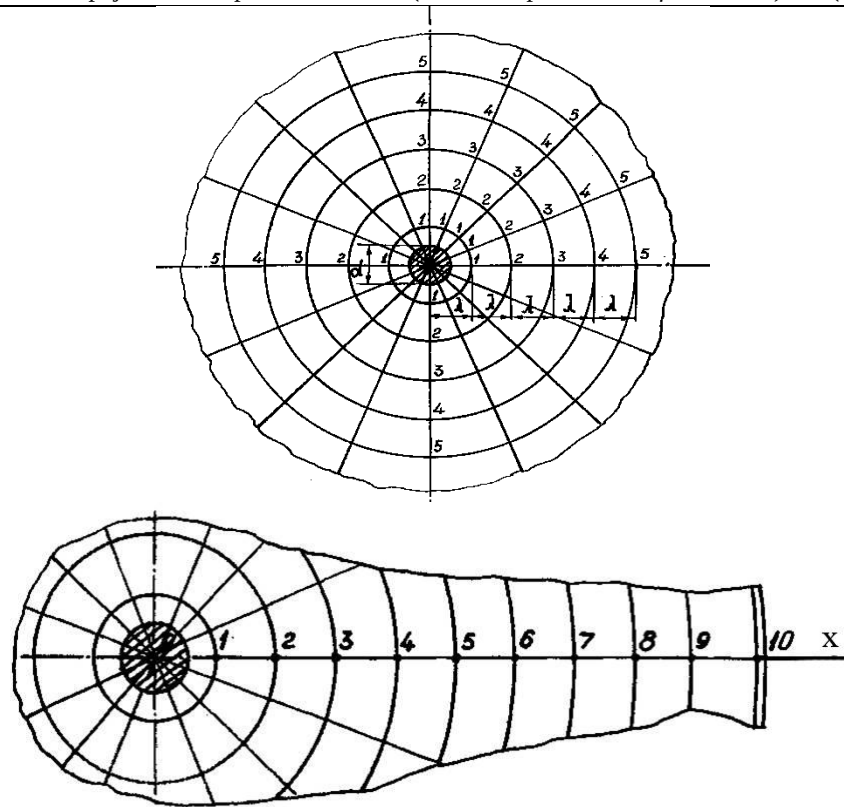


Рисунок 3 – Розрахункова схема сітки

Для прийнятої розрахункової схеми (рис. 3) згинальні моменти мають вирази

$$M_x = -D \left(\frac{d^2 w}{dx^2} + \nu \frac{d^2 w}{dy^2} \right);$$

$$M_y = -D \left(\frac{d^2 w}{dy^2} + \nu \frac{d^2 w}{dx^2} \right).$$

Для центрального вузла $i=0$ внаслідок кругової симетрії

$$M_x = M_y; \quad \frac{d^2 w}{dx^2} = \frac{d^2 w}{dy^2}.$$

Відповідно –

$$M_x = M_y = -D \left(\frac{d^2 w}{dx^2} + \nu \frac{d^2 w}{dy^2} \right) = -D(1 + \nu) \frac{d^2 w}{dx^2} \Big|_0 = M_0; \quad (6)$$

В скінченних різницях

$$\frac{d^2 w}{dx^2} \Big|_0 = \frac{w_1 - 2w_0 + w_1}{\lambda^2} = -\frac{2(w_0 - w_1)}{\lambda^2}.$$

По знайденим прогинам за формулою (6) визначено максимальний момент в центральному вузлі ($M=0,0755$ МН) та за формулою (3) напру-

ження в шарах покриття. Максимальне напруження на нижній поверхні плити становить $\sigma_{\max}=1,148$ МПа.

Порівняльні значення напружень в шарах асфальтового покриття подані в таблиці 2.

Результати розрахунків модельної задачі

Напруження по товщині аеродромного покриття, $\sigma_{\max}$, МПа													
Шари	1		2		3		4		5		6		7
Модифікований метод	-0,246	-0,356	-0,249	-0,226	-0,093	-0,074	-0,073	-0,033	-0,959	-0,512	-0,7673	0,580	0,673
МСП	-0,258	-0,368	-0,290	-0,254	-0,097	-0,083	-0,079	-0,037	-1,9076	-0,573	-0,493	0,651	0,756
													1,148
													1,288

Результати розрахунків напружено-деформованого стану аеродромного покриття, отримані методом скінченних різниць в межах практичної точності корелюються з результатами, отриманими за модифікованим методом Шехтер та підтверджують достовірність результатів попередніх розрахунків.

Для пакету шарів аеродромного покриття, поданого на рис. 1 визначений напружено-деформований стан конструкції з врахуванням

деформацій поперечного зсуву та поперечного обтиснення [8].

Шукані функції напружень представлені у вигляді рядів Фур'є з розподілом по товщині відповідною системою диференціальних рівнянь, отриманих варіаційним шляхом.

В таблиці 3 подані результати тангенціальних напружень (σ_{11}), напружень обтиснення (σ_{33}) та нормальні переміщення (u_3) по товщині аеродромного покриття.

Таблиця 3

Напружено-деформований стан конструкції аеродромного покриття по товщині пакету шарів

Матеріали шарів	σ_{11} , МПа	σ_{33} , МПа	$u_3 \cdot 10^{-3}$, м
Щебенево-мастиковий асфальто-бетон	-0,980	-1,11	$6,75 \cdot 10^{-4}$
	-0,767	-1,769	$6,36 \cdot 10^{-4}$
Щільний полімерасфальтобетон	-0,769	-0,291	$6,36 \cdot 10^{-4}$
	-0,627	-0,238	$6,07 \cdot 10^{-4}$
Вуглецева сітка	-0,631	-0,248	$6,07 \cdot 10^{-4}$
	-0,626	1,286	$6,04 \cdot 10^{-4}$
Термоізоляція	-0,662	-1,286	$6,04 \cdot 10^{-4}$
	-0,747	-1,174	$5,558 \cdot 10^{-4}$
Тришарова цементобетонна плита	-2,38	-1,174	$5,558 \cdot 10^{-4}$
	-1,05	-0,820	$5,557 \cdot 10^{-4}$
	-0,945	-0,820	$5,557 \cdot 10^{-4}$
	0,947	-0,110	$5,512 \cdot 10^{-4}$
	0,721	-0,110	$5,512 \cdot 10^{-4}$
	1,344	-0,0126	$5,500 \cdot 10^{-4}$

Міцність аеродромного нагрівного покриття оцінена узагальнено за критерієм Кулона-Мора та за граничним згинальним моментом:

$$\sigma_{екв} = \sigma_{\max} - \frac{R_p}{R_c} \sigma_{\min} \leq R_p, \quad (7)$$

Для оцінки за критерієм Кулона-Мора прийняті найбільші нормальні напруження розтягу $\sigma_{\max} = 1,344$ МПа та контактні напруження тиску на основу з розрахунків, проведених за варіаційним методом Марчука (табл. 3).

Розрахунковий опір на розтяг нижнього шару цементобетонної плити $B_{btb} 4,4$ становить $R_{btb} = 3,73$ МПа та на стиск з урахуванням коефіцієнта втомленості $R_c = 15$ МПа.

За формулою (7) визначено міцність конструкції на опір розтягу:

$$\sigma_{екв} = 1,344 - \frac{3,73}{15} 0,0126 = 1,34 < R_p = 3,73 \text{ МПа.}$$

Отже, умова міцності $\sigma_{екв} \leq R_p$ забезпечена.

При розрахунках жорстких аеродромних покриттів за міцністю й утворенням тріщин повинна виконуватись умова

$$m_d \leq m_u, \quad (8)$$

де m_d, m_u – відповідно розрахунковий і граничний згинальні моменти у певному перерізі.

Граничний згинальний момент для модельної задачі нагрівного аеродромного покриття розраховується за формулою

$$m_u = \gamma_c R_{btb} \frac{h^2}{6} k_u = 2,78 \text{ МН}, \quad (9)$$

де γ_c – коефіцієнт умов роботи покриття ($\gamma_c = 0,75$);

$R_{btb} = 3,73$ МПа – розрахунковий опір бетону при згині, МПа;

k_u – коефіцієнт, що враховує число прикладання колісних навантажень повітряних суден за проектний термін експлуатації покриття.

При терміні експлуатації жорстких покриттів, що дорівнює 20 років $k_u = 1,8$.

При визначенні розрахункового згинальний момент (m_d) враховується максимальний згинальний момент при центральному завантаженні плити

($m_{c,max}$), який в свою чергу головним чином залежить від значення згинального моменту від дії колеса, центр відбитка якого збігається з розрахунковим перерізом і обчислюється за формулою

$$m_1 = F_d (f(a)) \quad (10)$$

де F_d – розрахункове навантаження на колесо, МН;

$f(a) = f\left(\frac{R}{l}\right)$ – функція, значення якої наведено в [7];

R – радіус кола, рівновеликого за площею відбитка пневматика колеса, м;

l – пружна характеристика.

За розрахунковим навантаженням на колесо $F_d = 0,344$ МН і зведеним модулем пружності пакету шарів, визначеним за формулою (5),

$E_{3g} = 18069,32$ МН згідно методиці, описаній у [4] значення циліндричної жорсткості пакету шарів складає

$$D = 0,085 E_{3g} h^3 = 771,72 \text{ МН}\cdot\text{м},$$

що практично збігається зі значенням жорсткості, отриманим за модифікованим методом Шехтер ($D = 776,47$ МН·м).

При коефіцієнті основи $K_o = 80$ МПа/м значення пружної характеристики склало $l = 1,7623$, а відповідне значення функції $f(a) = 0,2342$.

Максимальний згинальний момент від дії колеса, центр відбитка якого збігається з розрахунковим перерізом, обчислений за формулою (3) складає $m_1 = 0,08056$ МН, що корелюється з

результатом, отриманим за модифікованим методом Шехтер ($M = 0,0877$ МН).

Відповідне максимальне навантаження на нижній поверхні цементобетонної плити, обчислене за формулою (3), дорівнює $\sigma_{max} = 1,1099$ МПа (за модифікованим методом Шехтер $\sigma_{max} = 1,148$ МПа).

Враховуючи, що значення максимального згинального моменту значно менше, ніж граничний згинальний момент ($m_u = 2,78$ МН), тому можна вважати, що міцність конструкції забезпечена.

Висновки із зазначенням перспективи подальших досліджень.

1. Значення максимальних моментів та максимальних напружень, обчислені всіма застосованими нескорельованими методами, підтверджують в межах потреб практичної точності фактичну достовірність результатів розрахунку аеродромного покриття з поверхневими нагрівними шарами.

2. За рахунок об'єднання методики розрахунку багат шарових плит з модифікованими методами розрахунку одношарових плит з'являється можливість ефективного використання їх для визначення напружено-деформованого стану конструкцій аеродромного покриття, що підігріваються.

3. Отримані результати досліджень можуть бути використані в діяльності проектних організацій при проектуванні аеродромних нагрівних покриттів.

4. Враховуючи, що практичний досвід конструювання аеродромних покриттів полягає в їх розрахунку на вінклеровій основі з відносно невеликими значеннями коефіцієнтів основи, подальші дослідження будуть пов'язані з визначенням напружено-деформованого стану покриттів з різними коефіцієнтами основи.

Список літератури

1. Піскунов В.Г., Володько О.В., Порхунув А.И. Композитные материалы для строительства подогреваемых покрытий дорог и взлетно-посадочных полос аэродромов // Механика композитных материалов. – Рига, 2008. – Т. 44. – № 3. – С. 317- 326.

Piskunov V.G., Volodko O.V., Porkhunov A.I. Composite materials for building of heated highway and airport runway coating // Mechanics of composite materials. – Riga, 2008. – Vol. 44. – No. 3. – P. 215-220.

2. Пат. на кор. модель № 50381, МПК E01H5/00, E01C11/24, E01C5/00, B64F1/00. Нагрівне автодорожнє та аеродромне покриття / Піскунов В.Г., Володько О.В., Демчук О.М., Порхунув О.І.; заявник та власник Національний транспортний університет. – №u 2009 11553; заявл.13.11.2009; опубл.10.06.10, Бюл. №11.

3. Пат. на корисну модель № 82232, H01C7/00. Резистивний композиційний матеріал / Піскунов В.Г., Володько О.В., Порхунув О.І.; Цибульський В.М.; заявник та власник Національний транспортний університет. – № u2013 01785; за-

явл. 13.02.13; опубл. 25.07.13, Бюл. № 14.

4. Володько О.В. Конструювання та розрахунок дорожнього та аеродромного нагрівних покриттів: дис. кан.тех.наук: 05.22.11/Володько Ольга Василівна. – 2012. – 186с.

5. Пискунов В.Г. Расчет неоднородных полых оболочек и пластин методом конечных элементов / В.Г. Пискунов, В.Е. Вериженко, В.К. Присяжнюк, В.С. Сипетов. – Изд. «Вища школа». – 1987. – 199с.

6. Родченко О. В. Вдосконалення методики розрахунку жорстких покриттів аеродромів у дію-

чих нормах проектування / О. В. Родченко // Будівництво України. – 2007. – №8. – С. 31–36.

7. Володько О.В. Конструювання та розрахунок нагрівного аеродромного покриття, термоізованого "Пеноситалом" / Пискунов В.Г., Володько О.В //Зб. тез Між. наук.-прак. конф. «Аеропорти – вікно в майбутнє», 15-16.06.12. – Київ. – С. 5-6.

8. Марчук О.В. Просторові задачі механіки деформування шаруватих тіл/ О.В. Марчук. – К.: Видавн. «Сталь», 2009. –124с.

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ

COMPUTING MATHEMATICS

Sandrakov G. V.

*Doctor of Physical and Mathematical Sciences,
Senior Scientific Researcher,*

*Faculty of Computer Science and Cybernetics
Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine*

Сандраков Г. В.

*доктор фізико-математичних наук,
провідний науковий співробітник,*

*Факультет комп'ютерних наук та кібернетики,
Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна*

MODELING AND HOMOGENIZATION OF HYDRODYNAMIC PROCESSES WITH OSCILLATING DATA

МОДЕЛЮВАННЯ ТА УСЕРЕДНЕННЯ ПРОЦЕСІВ ГІДРОДИНАМІКИ З ОСЦИЛЮЮЧИМИ ДАНИМИ

Summary: Models of beginning and development turbulence processes in complex viscous flows are proposed on the basis of mathematical homogenized method applications for linearized system of hydrodynamic equations with periodic two-scale data and a small viscosity. Asymptotic approximations for the equation solutions will be presented in the paper. We give a homogenized system of equations and periodic cell problems whose solutions determine asymptotic approximations of the solutions to the linearized system of hydrodynamic equations with a small viscosity. Applications of the approximations for computing calculations are guarantees that the computations are given approximated in according to the accuracy estimates, which are presented in the paper.

Keywords: *homogenization, modeling, asymptotic approximations, hydrodynamics equations, turbulence processes.*

Анотація: Досліджуються моделі виникнення та розвитку процесів турбулентності у складних в'язких течіях на підставі застосування математичних методів усереднення для лінеаризованих рівнянь гідродинаміки з малим коефіцієнтом в'язкості та періодично дрібномасштабними даними. Запропоновано асимптотичні апроксимації для розв'язків таких рівнянь. Наведено усереднену систему рівнянь і періодичні задачі на комірках, розв'язки яких визначають наближені асимптотичні апроксимації розв'язків рівнянь гідродинаміки з малим коефіцієнтом в'язкості. Використання у чисельних розрахунках цих апроксимацій дозволяє проводити обчислення із заданою точністю відповідно до оцінок точності презентованих у роботі.

Ключові слова: *усереднення, моделювання, асимптотичні апроксимації, рівняння гідродинаміки, процеси турбулентності.*

Постановка проблеми. Дослідження виникнення і розвитку процесів турбулентності має значне прикладне та теоретичне значення. Наприклад, у книзі [1] на с. 68 відзначено, що "турбулентність представляє собою широко розповсюджене і надто складне фізичне явище, присутнє в різноманітних природних середовищах і технічних системах". Аналогічні висновки наведені і в книзі відомих метеорологів та гідромеханіків: "Таким чином, турбулентність буквально оточує нас і в природі і в технічних пристроях, пов'язаних з течіями рідин та газів; тому її вивчення, безумовно, є дуже важливою практичною задачею. Велику зацікавленість представляють турбулентні течії і з суто теоретичної точки зору..." ([2], с. 10).

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В гідромеханіці розроблені деякі теоретичні підходи та експериментальні методи розгляду виникнення і розвитку процесів турбулентності та опис турбу-

лентних течій. Тим не менше, у книзі [2] на с. 31 відзначено, що "на жаль, однак, теорія турбулентності виявилась вкрай важкою і до цього часу вона просунута не надто далеко; тому багато робіт, які відносяться сюди, є суто емпіричними, вміщують самі початки теорії або навіть є помилковими". Слід також підкреслити, що практично відсутні строгі математичні результати в цьому напрямку, засновані на дослідженнях рівнянь гідродинаміки, які лежать в основі теоретичних підходів гідромеханіки. Однією з перешкод у цьому напрямку є проблема єдиності розв'язків, оскільки до цього часу невідомо чи є єдиними розв'язок, наприклад, рівнянь Нав'є-Стокса з малим коефіцієнтом в'язкості (або, еквівалентно, при великому числі Рейнольдса Re). З іншого боку, чисельні експерименти в гідромеханіці підтверджують, що турбулентні режими виникають при достатньо великому числі Re (або, еквівалентно, при малому коефіцієнті в'язкості). Таким чином, виникає проблема

математичного дослідження рівнянь гідродинаміки з малим коефіцієнтом в'язкості, оскільки проблема моделювання турбулентності не може бути розв'язана чисельними методами з коректною точністю обчислень, доки не доведені твердження про єдиність розв'язків.

Одним із сценаріїв виникнення турбулентності, прийнятим в гідромеханіці, є наступний: "Сили інерції, які викликають змішування різних об'ємів рідини, які рухаються "за інерцією" з різними швидкостями, здійснюють передачу енергії від великомасштабних компонент руху до дрібномасштабних і тим самим сприяють утворенню в струмені різких дрібномасштабних неоднорідностей, характерних для турбулентних течій." ([2], с. 14). Крім того, у книзі [1] на с. 34 підкреслено, що іноді в турбулізованій "рідині виникає періодична система конвективних комірок (валиків)...". Таким чином, виникає проблема математичного дослідження рівнянь гідродинаміки з малим коефіцієнтом в'язкості та періодично дрібномасштабними "силами", діючими на дану рідину.

В якості першого кроку в цьому напрямку природно розглянути лінеаризовані варіанти таких рівнянь. Деякі математичні результати про розв'язки таких рівнянь наведені в наступному пункті. На підставі цих результатів можна зробити висновок, що розв'язок таких рівнянь з достатньою точністю наближаються сумою вигляду

$$v(t, x) + \int_0^t A(t - \tau, x / \varepsilon) f(\tau, x) d\tau, \quad (1)$$

де $v(t, x)$ є розв'язком усередненої системи рівнянь, а другий доданок в цій формулі якраз і характеризує періодично "дрібномасштабні" рухи рідини. Такий висновок, що ґрунтується на фізичних експериментах, достатньо давно відомий в гідромеханіці, оскільки ще Рейнольдс "запропонував представляти значення всіх гідродинамічних величин у турбулентній течії у вигляді суми усереднених (регулярних) та пульсаційних (нерегулярних) складових і вивчати лише усереднені величини, які порівняно плавно змінюються в просторі і за часом, відмовившись від практично безнадійних спроб опису всіх деталей індивідуальних реалізацій гідродинамічних полів." ([2], с. 14). В цій цитаті мова йде про відомі роботи Рейнольдса 1883 та 1895 років, написаних за результатами фізичних експериментів. Тут подання (1) буде

отримано на підставі математичних досліджень відповідних рівнянь.

У випадку, коли в'язкість не є надто малою, останній доданок у формулі (1) є нульовим і наближення до рішення зазначених рівнянь містять тільки регулярну компоненту, яку прийнято ще називати ламінарною (коректні твердження на цю тему приведені в наступному пункті). Цей висновок, заснований на фізичних експериментах, також достатньо давно відомий в гідромеханіці: "Сили в'язкості, навпаки, приводять до згладжування дрібномасштабних неоднорідностей. Тому слід очікувати, що течії є достатньо малими значеннями Re будуть ламінарними, а з достатньо великими Re – турбулентними. Цей основний результат і був чітко сформульований Рейнольдсом" ([2], с. 14).

Наведені тут результати будуть отримані математичними методами теорії усереднення. Метод усереднення застосовується і в гідромеханіці. Більш того, в [3] на с. 266 відзначено, що "проблема усереднення є однією із центральних в механіці суцільних середовищ і взагалі в математичній фізиці." Однак, ці методи відрізняються підходами й цілями. В гідродинаміці основною ціллю є отримання усереднених рівнянь, тоді як при математичному підході прийнято отримувати математичними методами наближення до розв'язку і доводити, що це наближення дійсно є близьким в придатній нормі до розв'язку досліджуваних рівнянь. Наприклад, другий доданок у формулі (1), який характеризує "дрібномасштабні" рухи рідини, можливо отримати лише математичними методами, оскільки, як вже відзначалось, в гідромеханіці прийнято "вивчати лише усереднені величини, які порівняно плавно змінюються в просторі і за часом...".

Зображення (1) для наближення розв'язків, ймовірно, не може бути отримано з достатньою точністю чисельними методами розв'язку, наприклад, рівнянь гідродинаміки. З іншого боку, використання в чисельних розрахунках формули (1) дозволяє проводити обчислення із заданою точністю, принаймні, при малому параметрі дрібномасштабності у відповідності до оцінок точності, наведених надалі. Результати таких розрахунків, які ґрунтуються на часткових випадках формули (1), наведені на рисунках 1 та 2.

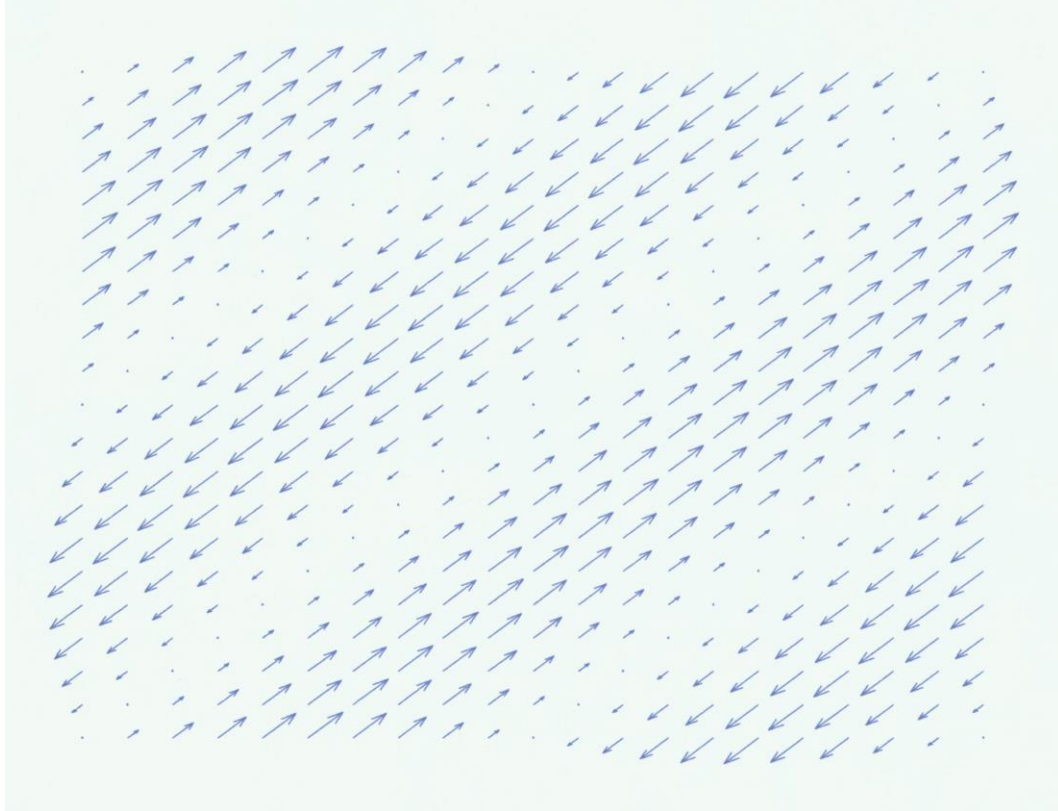


Рисунок 1. Періодична система комірок. Ламінарний випадок.

Ці рисунки цілком підтверджують висновок, який уже відзначався, отриманий на підставі фізичних та лабораторних експериментів, що в турбулізованій "рідині" виникає періодична система кон-

вективних комірок (валиків)..." ([1], с. 34). Ці рисунки також узгоджуються з результатами лабораторних експериментів, представлених у роботі [4].

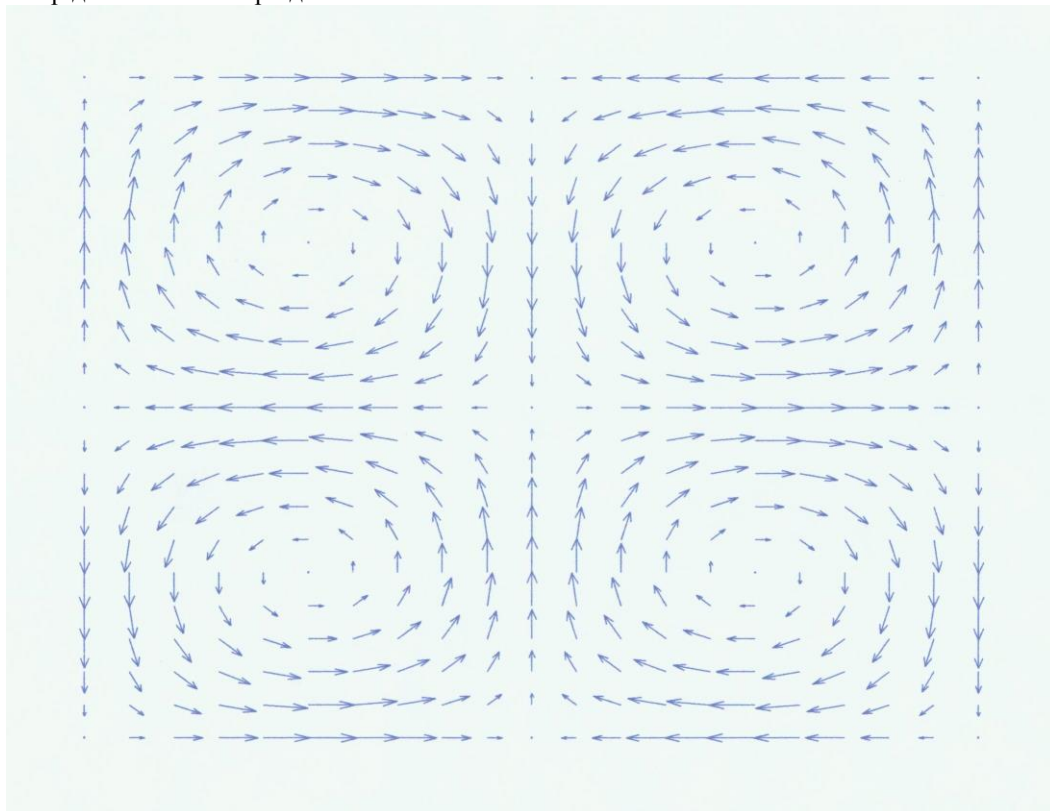


Рисунок 2. Періодична система комірок. Випадок осциляцій.

Крім того, в обчислювальній математиці відомо, що при розрахунках деяких рішень рівнянь гідродинаміки із все меншою і меншою в'язкістю може настати момент коли такі рішення стають осцилюючими і не зрозуміло, чи є це результатом накопичення обчислювальної похибки та нестійкості алгоритму, чи розрахунки приводять до рішень, що моделюють турбулентність. Наведені тут твердження прояснюють і цю ситуацію, оскільки "дрібномасштабна" завихреність обчислювальної похибки цілком може призводити до виникнення осциляцій чисельних рішень навіть лінеаризованих рівнянь гідродинаміки з малою в'язкістю. Деякі із таких тверджень частково анонсовані та презентовані у роботі [5].

Мета статті – дослідити деякі моделі виникнення та розвитку процесів турбулентності у складних в'язких течіях на підставі застосування математичних методів усереднення для лінеаризованих рівнянь гідродинаміки з малим коефіцієнтом в'язкості та періодично дрібномасштабними даними.

Виклад основного матеріалу. Розглядаються початково-крайові задачі для нестационарної лінеаризованої системи рівнянь гідродинаміки із періодичними, швидко осцилюючими за просторовими змінними, даними і малою в'язкістю. Період осциляцій даних визначається малим додатнім параметром ε , який задовольняє нерівності $0 < \varepsilon \leq \varepsilon_0$ для фіксованого додатного ε_0 . Припускається, що коефіцієнт в'язкості ν у розглянутій системі є додатнім і задовольняє при $\varepsilon \rightarrow 0$ співвідношенню $\nu \rightarrow 0$ на одній із наступних трьох умов:

$$\frac{\nu}{\varepsilon^2} \rightarrow \infty, \quad (2)$$

$$\frac{\nu}{\varepsilon^2} \rightarrow \mathcal{G}, \quad (3)$$

$$\frac{\nu}{\varepsilon^2} \rightarrow 0, \quad (4)$$

де $\mathcal{G}$ є заданою додатною постійною. Таким чином, у цих умовах припускається, що додатна величина $\nu = \nu(\varepsilon)$ є функцією від параметра $\varepsilon \in (0, \varepsilon_0]$. Крім того, ця функція ν є достатньо малою при малих ε (оскільки $\nu(\varepsilon) \rightarrow 0$ при $\varepsilon \rightarrow 0$), а взаємна малість ν і ε контролюється однією з умов (2)–(4), виконаній при $\varepsilon \rightarrow 0$.

Буде наведена усереднена (гранична при $\varepsilon \rightarrow 0$ і $\nu \rightarrow 0$) система рівнянь і періодичні задачі на комірках, розв'язок яких визначають наближені (початкові доданки) асимптотики рішень зазначеної системи, і сформульовані оцінки точності цих наближень. Такі оцінки точності отримані як при виконанні однієї з умов (2)–(4) так і в припущенні, що ε і ν є незалежними малими параметрами.

Нехай для цілого $n \geq 2$ задані обмежена область $\Omega \subset \mathbf{R}^n$ із гладкою (класу C^∞) межею, додатні числа η, γ і T , фінітні в Ω і гладкі вектор-функція $f \in C^\infty([0, T] \times \Omega)^n$ і функція $g \in C^\infty([0, T] \times \Omega)$, де $f \in C_0^\infty(\Omega)^n$ і $g \in C_0^\infty(\Omega)$ для кожного $f \in [0, T]$. Визначимо вектор-функцію u і функцію p як розв'язок початково-крайової задачі для наступної нестационарної лінеаризованої системи рівнянь гідродинаміки

$$\begin{aligned} u_t' - \nu \Delta u - \nu \eta \nabla \operatorname{div} u + \nabla p &= m_\varepsilon f \text{ в } \Omega \times (0, T), \\ \gamma p_t' + \operatorname{div} u &= k_\varepsilon g \text{ в } \Omega \times (0, T), \\ u|_{t=0} &= 0 \text{ в } \Omega, \quad p|_{t=0} = 0 \text{ в } \Omega, \\ u &= 0 \text{ на } \partial\Omega \times (0, T). \end{aligned} \quad (5)$$

Залежні від малого параметра ε матричнозначна функція m_ε і функція k_ε в задачі (5) є ε -періодичними і визначаються рівностями:

$$m_\varepsilon = m\left(\frac{x}{\varepsilon}\right), \quad k_\varepsilon = k\left(\frac{x}{\varepsilon}\right), \quad (6)$$

де компоненти матричнозначної функції $m(y)$ та функції $k(y)$ є гладкими 1-періодичними (періодичними з періодом 1 по кожній із незалежних змінних $y_1, y_2, \dots, y_n$) функціями на $\mathbf{R}^n$, що цілком визначаються своїми обмеженнями на комірку періодичності $Y = [0, 1]^n$.

Перевіряється, що для фіксованих ν і ε існує єдиний розв'язок (u, p) задачі (5) такий, що $u = C^0([0, T]; L^2(\Omega)^n)$ та $p = C^0([0, T]; L^2(\Omega))$. Тут використовуються функціональні простори, визначені, наприклад, у [6]. Основні результати роботи будуть сформульовані у формі теорем про граничне поведіння розв'язків задачі (5) при $\varepsilon \rightarrow 0$ і $\nu \rightarrow 0$.

Визначимо вектор-функцію v і функцію q як розв'язок початково-крайової задачі для усередненої системи рівнянь:

$$\begin{aligned} v_t' + \nabla q &= Mf \text{ в } \Omega \times (0, T), \\ \gamma q_t' + \operatorname{div} v &= Kg \text{ в } \Omega \times (0, T), \\ v|_{t=0} &= 0 \text{ в } \Omega, \quad q|_{t=0} = 0 \text{ в } \Omega, \\ (v, N) &= 0 \text{ на } \partial\Omega \times (0, T). \end{aligned} \quad (7)$$

де N позначає зовнішню нормаль до границі $\partial\Omega$, (v, N) – нормальна компонента вектора-функції v на цій границі і матриця із сталими компонентами M і стала K визначаються рівностями

$$M = \langle m \rangle \equiv \int_Y m(y) dy, \quad K = \langle k \rangle. \quad (8)$$

Перевіряється, що задача (7) може бути зведена до початково-крайової задачі із граничними умовами Неймана для хвильового рівняння відносно q і тому має єдиний гладкий розв'язок. Для

розв'язків задач (5) та (7) виконується наступне твердження:

Теорема 1. Нехай (u, p) є розв'язком задачі (5), (v, q) є розв'язком задачі (7) і виконана умова (2). Тоді, виконуються наступні оцінки

$$\max_{0 \leq t \leq T} \|p - q\|_{L^2(\Omega)}^2 \leq C(\varepsilon^2 + \nu) \quad (9)$$

і

$$\max_{0 \leq t \leq T} \|u - v\|_{L^2(\Omega)^n}^2 \leq C(\varepsilon^2 + \sqrt{\nu} + (\varepsilon^2/\nu)^2),$$

у яких стала C не залежить від ε і ν (при $\varepsilon \in (0, \varepsilon_0]$ і $\nu \in (0, \nu_0]$).

Нехай вектор-функція $b = b(y)$ є 1-періодичним розв'язком задачі на Y :

$$\Delta_y b = \operatorname{div}_y m \quad y \in Y, \quad \langle b \rangle = 0. \quad (10)$$

Відомо [7], що гладкий розв'язок цієї задачі існує і визначений однозначно. Визначимо матричнозначну функцію $A(t, y)$ і вектор-функцію $B(t, y)$ як 1-періодичне (відносно y) розв'язок початково-крайової задачі для системи рівнянь Стокса на Y :

$$\begin{aligned} A_t' - \mathcal{G} \Delta_y A + \nabla_y B &= 0 \quad \text{в } H \times (0, T), \\ \operatorname{div}_y A &= 0 \quad \text{в } Y \times (0, T), \end{aligned} \quad (11)$$

$$A|_{t=0} = m - M - \nabla_y b \quad \text{в } Y, \quad \langle A \rangle = 0, \quad \langle B \rangle = 0,$$

де $\mathcal{G}$ визначено в (3) і $b = b(y)$ є розв'язком задачі (10). Відомо також [6, 8], що гладкий розв'язок задачі (11) існує і визначено однозначно (для фіксованого $\mathcal{G}$). Для розв'язків задач (5) та (7) виконується також наступні два твердження, формулювання яких залежать від виконання умов (3) або (4):

Теорема 2. Нехай (u, p) є розв'язком задачі (5), (v, q) є розв'язком задачі (7) і виконана умова (3). Тоді виконуються оцінки (9) і наступна оцінка

$$\max_{0 \leq t \leq T} \|u - v - A_\varepsilon * f\|_{L^2(\Omega)^n}^2 \leq C(\varepsilon^2 + \sqrt{\nu} + \mathcal{G}^2 |\mathcal{G} - (\nu/\varepsilon^2)|^2)$$

у який стала C не залежить від ε , ν і $\mathcal{G}$. Тут $A_\varepsilon = A(t, x/\varepsilon)$, матричнозначна функція $A(t, y)$ є розв'язком задачі (11), стала $\mathcal{G}$ визначена в (3) і $*$ позначає згортку по часовій змінній:

$$[A_\varepsilon * f](t, x) = \int_0^t A(t - \tau, x/\varepsilon) f(\tau, x) d\tau. \quad (12)$$

Теорема 3. Нехай (u, p) є розв'язком задачі (5), (v, q) є розв'язком задачі (7) і виконана умова (4). Тоді виконуються оцінки (9) і наступна оцінка

$$\max_{0 \leq t \leq T} \|u - v - [m_\varepsilon - M - (\nabla_y b)_\varepsilon] f^{(-1)}\|_{L^2(\Omega)^n}^2 \leq C(\varepsilon^2 + \sqrt{\nu} + (\nu/\varepsilon^2)^2)$$

у який стала C не залежить від ε і ν . Тут

$$(\nabla_y b)_\varepsilon = (\nabla_y b)(x/\varepsilon), \quad \text{вектор-функція}$$

$b(y)$ є розв'язком задачі (10), матриця M визначена в (8) і $f^{(-1)}$ позначає первісну по часовій змінній:

$$f^{(-1)}(t, x) = \int_0^t f(\tau, x) d\tau.$$

Оцінки теореми 2 є рівномірними по параметру $\mathcal{G}$ у такому сенсі. Припустимо тепер, що ε і ν є незалежними малими додатними параметрами в задачі (5), що задовольняють нерівностям $0 < \varepsilon \leq \varepsilon_0$ та $0 < \nu \leq \nu_0$ для фіксованих додатного ε_0 та ν_0 . Позначимо $\mathcal{G} = (\nu/\varepsilon^2)$ і розглянемо $\mathcal{G}$ як параметр у задачі (11), тоді для розв'язків задач (5) та (7) виконується також наступне твердження:

Теорема 4. Нехай $\mathcal{G} = (\nu/\varepsilon^2)$ у задачі (11), (u, p) є розв'язком задачі (5) і (v, q) є розв'язком задачі (7). Тоді, виконуються оцінки (9) і

$$\max_{0 \leq t \leq T} \|u - v - A_\varepsilon * f\|_{L^2(\Omega)^n}^2 \leq C(\varepsilon^2 + \sqrt{\nu}),$$

у який стала C не залежить від ε і ν .

Відповідно до теореми 4 дослідження задачі (5) із двома малими параметрами (асимптотично) зводиться до розгляду задачі із сталими коефіцієнтами (7) і задачі (11) з додатним параметром $\mathcal{G} = (\nu/\varepsilon^2)$. Відповідно до теорем 1-3 дослідження задачі (5) можна звести до розгляду задач із постійними коефіцієнтами, але при виконанні однієї з умов (2), (3) чи (4). Асимптотичне зведення задачі з малими параметрами до декількох задач, що не залежать від цих параметрів, є класичним підходом теорії збурювань, що цілком ілюструється теоремами 1-3. Тоді як у теоремі 4 реалізується більш "природний" підхід до задачі (5) без додаткових припущень (2), (3) чи (4).

Оцінки теореми 4 є рівномірними за параметром (ν/ε^2) , від якого неявно залежить матричнозначна функція $A_\varepsilon = A(t, x/\varepsilon)$, де $A(t, y)$ є розв'язком задачі (11). Тому з оцінок теореми 4 нескладно вивести оцінки теорем 1 і 3 використовуючи придатні допоміжні твердження про асимптотичне поведіння розв'язків задачі (11) при малих та великих $\mathcal{G}$.

Оцінки теорем 1-4 є рівномірними за параметром γ при $\gamma=0$ у такому сенсі. Визначимо вектор-функцію u і функцію p як розв'язок початково-крайової задачі для нестационарної системи рівнянь Стокса:

$$\begin{aligned} u_t' - \nu \Delta u + \nabla p &= m_\varepsilon f \quad \text{в } \Omega \times (0, T), \\ \operatorname{div} u &= 0 \quad \text{в } \Omega \times (0, T), \end{aligned} \quad (13)$$

$$u|_{t=0} = 0 \quad \text{в } \Omega, \\ u = 0 \quad \text{на } \partial\Omega \times (0, T)$$

у припущеннях і позначеннях для вихідних даних з (5) і (6), де $g = 0$ (для простоти формулювань). Нехай вектор-функція v і функція q є розв'язком початково-крайової задачі для осередненої системи рівнянь:

$$v'_t + \nabla q = Mf \quad \text{в } \Omega \times (0, T), \\ \operatorname{div} v = 0 \quad \text{в } \Omega \times (0, T), \quad (14) \\ v|_{t=0} = 0 \quad \text{в } \Omega, \\ (v, N) = 0 \quad \text{на } \partial\Omega \times (0, T)$$

у позначеннях з (7) і (8). Відомо [10], що для фіксованих v і ε існує єдиний розв'язок (u, p) задачі (13) такий, що $u \in C^0([0, T]; L^2(\Omega)^n)$ і $p \in L^2(0, T; L^2(\Omega)/\mathbf{R})$. Відомо також [8, 9], що єдиний розв'язок задачі (14) існує, оскільки ця задача може бути зведена до (квазі)стаціонарного рівнянню Пуассона з граничними умовами Неймана для q . Для розв'язків задач (11) та (13) виконується наступне твердження:

Теорема 5. Нехай $\vartheta = v/(\varepsilon^2)$ у задачі (11), (u, p) є розв'язком задачі (13) і (v, q) є розв'язком задачі (14). Тоді, виконуються оцінки

$$\|p - q\|_{L^2(0, T; L^2(\Omega)/\mathbf{R})}^2 \leq C(\varepsilon^{3/2} + v) \quad (15) \\ \max_{0 \leq t \leq T} \|u - v - A_\varepsilon * f\|_{L^2(\Omega)^n}^2 \leq C(\varepsilon^{3/2} + \sqrt{v})$$

у яких стала C не залежить від v і ε .

Для розв'язків задач (11) та (13) виконані оцінки, аналогічні оцінкам теорем 1–4. Крім того, для розв'язків цієї задачі з оцінки теореми нескладно вивести оцінки, аналогічні оцінкам теорем 1 і 3. Відзначимо, як приклад тільки наступне твердження про "розгладження" швидких осциляцій.

Теорема 6. Нехай (u, p) є розв'язком задачі (13) і (v, q) є розв'язком задачі (14). Тоді, виконуються оцінки (15) і

$$\max_{0 \leq t \leq T} \|u - v\|_{L^2(\Omega)^n}^2 \leq C(\varepsilon^{3/2} + \sqrt{v} + (\varepsilon^2/v)^2),$$

у який стала C не залежить від v і ε .

З теорем 1–4 та теорем 5 і 6 нескладно вивести і деякі оцінки для розв'язку задач (5) і (13) з неоднорідними швидко осцилюючими початковими даними. Дійсно, у задачах (5) і (13) з такими даними можна перейти до первісних по часовій змінній від розв'язків. Тоді ці первісні задовольняють задачам, аналогічним задачам (5) і (13) (відповідно), з однорідними початковими даними. Для таких задач виконані відповідні оцінки теорем 1–4 та теорем 5 і 6. Однак ці оцінки для первісних від розв'язків еквівалентні оцінкам для вихідних розв'язків, але в більш слабких (чим у відповідних теоремах) нормах, наприклад, у нормі простору

$W^{-1, \infty}(0, T; L^2(\Omega))$ (для компонентів швидкості та тиску). Те, що такий підхід приводить до оцінок точності в більш слабких нормах, є istotним. У загальному випадку в задачах (5) і (13) зі швидко осцилюючими початковими даними виникають граничношарові явища поблизу границі $t = 0$, а перехід до первісних "зм'якшує" вплив таких граничношарових явищ відповідні оцінки. Тому для одержання таких оцінок у більш "сильних" нормах слід враховувати вклад підходящих граничношарових складових.

У фізичній літературі можна зустріти наступний метод розгляду задачі (5). При малих ε і v досить покласти $v=0$ і обчислити середнє від m_ε і k_ε для одержання граничної задачі. У цьому випадку стверджується, що розв'язок (u, p) задачі (5) і визначена цим розв'язком "енергія"

$$E_\varepsilon^v(t) \equiv \int_\Omega (u(t)^2/2) dx + \gamma \int_\Omega (p(t)^2/2) dx + \\ + v \int_0^t \int_\Omega (\nabla u)^2 dx d\tau + v\eta \int_0^t \int_\Omega (\operatorname{div} u)^2 dx d\tau$$

достатньо "близькі" до розв'язку (v, q) задачі (7) і відповідної граничної "енергії", обумовленої таким розв'язком.

Цей метод дає гарне наближення для p у силу оцінки (9). Однак, вибір $v=0$ у задачі (5) приводить до незадовільного наближення для u відповідно до оцінок теореми 4. З іншого боку, у випадку коли в'язкість не є занадто малою такий метод дає гарне наближення і для u у силу оцінок теореми 1. Цей висновок частково парадоксальний: при не надто малій в'язкості можна покласти $v=0$ у задачі (5) і обчислити середнє від вихідних даних для одержання задачі для гарного наближення, а при дуже малій (і навіть нульовій) в'язкості така процедура може приводити до незадовільного наближення для вектора-функції швидкості. Утім, така парадоксальність обумовлена зміною типу рівнянь з (5) з параболічного на гіперболічний, а доданок $A_\varepsilon * f$ з оцінки теореми 4 у деякому сенсі "розгладжує" таку зміну типу рівнянь.

Висновки. Таким чином, запропоновано асимптотичні апроксимації для розв'язків рівнянь гідродинаміки з малим коефіцієнтом в'язкості. Презентовано оцінки розв'язків лінеаризованих рівнянь гідродинаміки із періодичними, швидко осцилюючими за просторовими змінними, даними та малою в'язкістю. Наведено усереднену систему рівнянь і періодичні задачі на комірках, розв'язки яких визначають наближені асимптотичні апроксимації розв'язків рівнянь гідродинаміки, сформульовані оцінки точності цих наближень, які можуть застосовуватися для побудови ефективних алгоритмів для комп'ютерного моделювання складних турбулентних течій.

Список литературы

1. Колесниченко А.В., Маров М.Я. Турбулентность многокомпонентных. сред. Москва: Наука, 1999.
2. Монин А.С., Яглом А.М. Статистическая гидромеханика. Механика турбулентности. Часть 1. Москва: Наука, 1965.
3. Николаевский В. Н. Пространственное осреднение и теория турбулентности. Вихри и волны. Москва: Мир. 1984. С. 266–335.
4. Обухов А.М. Течение Колмогорова и его лабораторное моделирование. Успехи математических наук. 1983. Том 38, В. 4. С. 101–111.
5. Sandrakov G. B. The influence of viscosity on oscillations in some linearized problems of hydrodynamics. *Izvestiya: Mathematics*. 2007. V. 71, № 1. P. 97–148.
6. Темам Р. Уравнения Навье-Стокса. Москва: Мир, 1981.
7. Бахвалов Н.С., Панасенко Г.П. Осреднение процессов в периодических средах. Москва: Наука, 1984.
8. Ладыженская О.А. Математические вопросы динамики вязкой несжимаемой жидкости. Москва: Наука, 1970.
9. Ладыженская О.А. Об уравнениях с малым параметром при старших производных в линейных дифференциальных уравнениях с частными производными. Вестник ЛГУ. Сер. математика, механика и астрономия. 1957. №7. В. 2. С. 104–120.
10. Лионс Ж.-Л. Некоторые методы решения нелинейных краевых задач. Москва: Мир, 1972.

Timofeev A.M.,

Doctor of technical sciences, chief researcher

Malyshev A. V.,

Candidate of technical sciences, researcher

Protodyakonova N.A.,

Candidate of physico-mathematical sciences, researcher

Stepanov A. A.

Candidate of technical sciences, researcher

Institute of Physical and Technical Problems of the North, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Russian Federation, Yakutsk

THE CALCULATION OF THE THERMAL CONDUCTIVITY OF MOIST THAWED AND FROZEN SOILS TYPICAL OF YAKUTIA ON THE BASIS OF THE THEORY OF GENERALIZED CONDUCTIVITY

Abstract

The paper provides an overview of the empirical dependences of the thermal conductivity of typical dry and moist soils of Central and Southern Yakutia in thawed and frozen states. Based on the theory of generalized conductivity, the calculations of the thermal conductivity for coarse soil are made according to the Dulnev-Zarichnyak polystructural model, and for fine soils according to the model of a multicomponent shell environment proposed by Gavriliev R. I.

Keywords: thermal conductivity, soils, generalized conductivity.

At present, a large amount of experimental data has been accumulated on the thermal characteristics of typical soils in the dry and wet states at positive and negative temperatures [1, 2, 3]. To summarize these data and to reduce the amount of experimental work undertaken, it became necessary to systematize and expand the works on the calculation methods of definition of the thermal conductivity of soils. The thermal conductivity of dry and wet typical soils is calculated depending on moisture content, skeleton density and temperature in two ways:

- a) empirical formulae derived from the experimental data;
- b) using various models derived from the theory of generalized conductivity.

The thermal properties of soils vary significantly depending on the moisture content, temperature and composition. The nature of the change in the dependences of thermal conductivity on moisture content is

strongly influenced by the dispersity of the material. The soils are known to be subdivided into coarse and fine. As the results of experimental work show, the dependence of thermal conductivity on moisture content for coarse soils has the nature of the law of saturation, and for fine soils it is an exponential rule. These features arise from the different mechanism of water binding by mineral particles, depending on which structural models of soils are usually chosen. And on the basis of these models the formulae for calculating the thermal conductivity of soils are derived.

Loose sandy soils are granular systems, and to calculate their thermal conductivity we propose a model of a granular system with an averaged element [4]. Figure 1 shows the model of the freezing granular substance [3]. Using this model, we previously calculated the thermal conductivities of sandy soil in the thawed, freezing and frozen states [8].

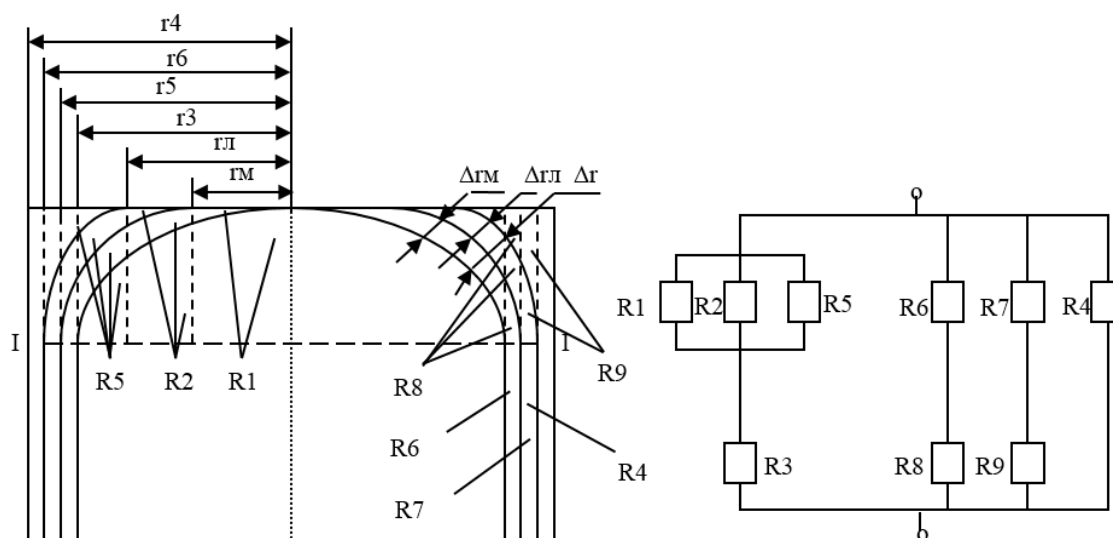


Fig 1. The distribution of thermal resistances of wet freezing sand and the diagram of their connection.

Figure 2 shows the temperature dependence of the thermal conductivity of the freezing - thawing sand at different values of the volume weight, when the moisture content is 15%. The same calculations were carried out at $W = 5, 10, 20, 25\%$. The discrepancy

of all the calculations results from the experimental data does not exceed 20%.

To calculate the thermal conductivity of finely dispersed soils in thawed and frozen states, we use the model of a multicomponent shell medium proposed in [6].

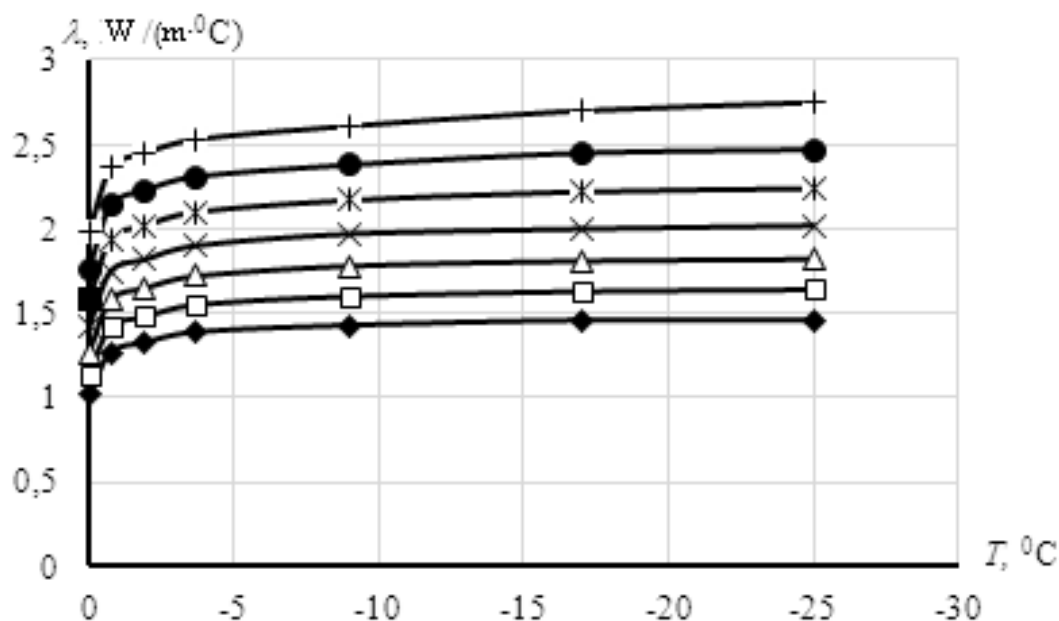


Fig.2. The temperature dependence of wet sand thermal conductivity at different values of the skeleton volume weight γ , kg/m^3 ♦ - 1200; □ - 1300; Δ - 1400; × - 1500; * - 1600; • - 1700; + - 1800.

According to this model, a fine soil in a frozen state can be considered as a four-component shell medium consisting of a mineral particle, a film of unfrozen water, a shell of ice and air. The formulae for calculating the thermal conductivity of a four-component shell medium are given in [5], the initial data in [8]. The results of calculations in thawed and frozen states are shown in Fig.3.

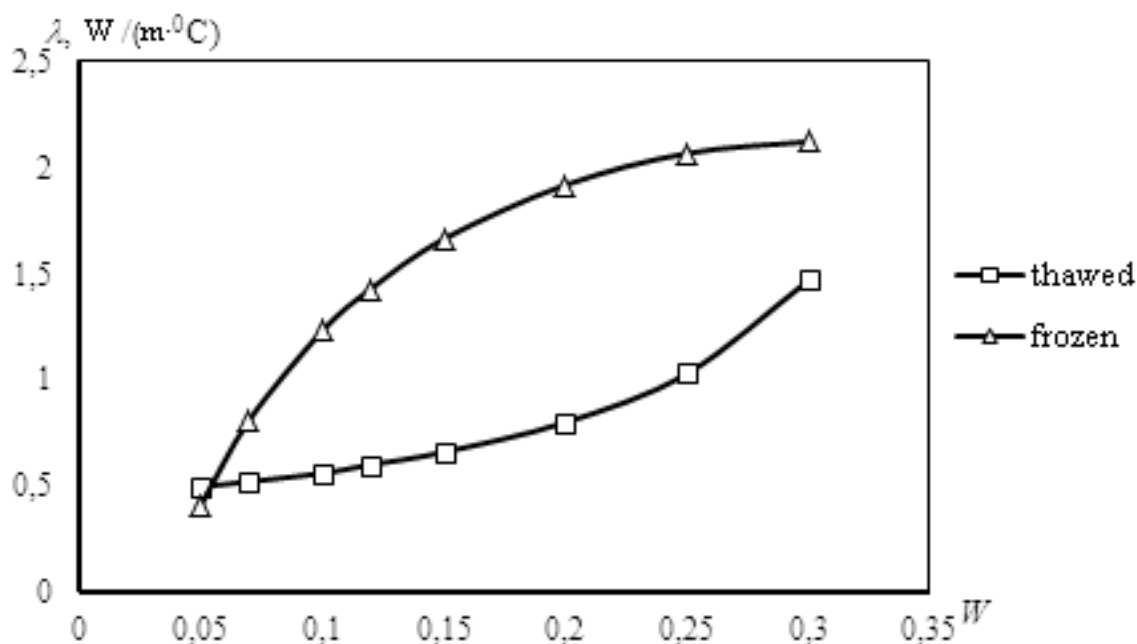


Fig.3.

The dependence of wet loam thermal conductivity $\gamma = 1,4 \text{ g/cm}^3$ in frozen and thawed states on moisture content

The empirical formulae for calculating the thermal conductivity of dry and wet soils of Central and South Yakutia, obtained by various researchers working in the field of thermal physics of soils, are widely used in practice at identifying mathematical models for predicting the temperature regime of soils in the active layer. The proposed Dulnev-Zarichnyak polystructural model [4] for calculating the thermal conductivity of sandy soils is in good agreement with experimental data for sandy soils. To determine the thermal conductivity of finely dispersed soils, we carried out a calculation using the multicomponent shell model proposed by R.I. Gavriliev [5]. The discrepancy between the calculation results and the experimental data does not exceed 20%.

References

1. Ershov E.D. Teplofizicheskiye svoystva gornykh porod [Thermophysical properties of rocks]. - Moscow: Publishing House of Moscow State University, 1984. - 204 p (in Russian).
2. Pavlov A.V. Raschet i regulirovaniye merzlotnogo rezhima pochvy [Calculation and regulation of the permafrost soil regime]. - Novosibirsk : Science, 1980. - 240 p (in Russian).
3. Stepanov A.V., Timofeev A.M. Teplofizicheskiye svoystva dispersnykh materialov [Thermophysical properties of dispersed materials]. - Yakutsk, 1994. -124 p (in Russian).
4. Dulnev G.N., Zarichnyak Yu.P. Teploprovodnost' smesey i kompozitsionnykh materialov [Thermal conductivity of mixtures and composite materials]. - Leningrad: Energy, 1974. - 269 p (in Russian).
5. Gavriliev R.I. Teplofizicheskiye svoystva gornykh porod i napochvennykh pokrovov kriolitozony [Thermophysical properties of rocks and soil covers of the cryolithozone]. - Novosibirsk: SB RAS, 1998. - 208 p (in Russian).
6. Gavriliev R.I. Teplofizicheskiye svoystva komponentov prirodnoy sredy v kriolitozone: Spravochnoye posobiye [Thermophysical properties of the components of the natural environment in the permafrost]. - Novosibirsk: SB RAS, 2004. - 146 p (in Russian).
7. Volkov D.P., Dulnev G.N., Muratova B.L., Utkin A.B. Teplo- i massoperenos v neftenosnykh gruntakh [Heat and mass transfer in oil-bearing soils] // Journal of Engineering Physics and Thermophysics - 1986 - vol.50. - №6. - p. 939-946 (in Russian).
8. Timofeev A.M. Metody i rezul'taty issledovaniya teplomassoobmennyykh svoystv i temperaturno-vlazhnostnogo rezhima mnogokomponentnykh sistem s fazovymi perekhodami. Dissertatsiya na soiskaniye uchenoy stepeni doktora tekhnicheskikh nauk [Methods and results of the study of heat and mass transfer properties and temperature and moisture content conditions of multicomponent systems with phase transitions. Thesis for the degree of Doctor of Technical Sciences]. - Yakutsk, 2006. (in Russian).

ХИМИЧЕСКИЕ НАУКИ

Gabbazova L.Z.

Student,

Nizhnekamsk Institute for Chemical Technology

Zemskiy D.N.

Candidate of Chemical Sciences, Director

Nizhnekamsk Institute for Chemical Technology

Linkova T.S.

Candidate of Technical Sciences, Head of the Department of Chemical Technology

Nizhnekamsk Institute for Chemical Technology

Zemskiy N.I.

Senior Lecturer

Nizhnekamsk Institute for Chemical Technology

Габбазова Ландыш Зульфатовна,

Студент,

Нижнекамский химико-технологический институт

Земский Дмитрий Николаевич,

кандидат химических наук, директор,

Нижнекамский химико-технологический институт

Линькова Татьяна Сергеевна,

кандидат технических наук, Заведующий кафедрой химической технологии органических веществ,

Нижнекамский химико-технологический институт

Земский Николай Иванович

старший преподаватель,

Нижнекамский химико-технологический институт

ENERGY-SAVING TECHNOLOGICAL SCHEME FOR THE SEPARATION OF PROPYLENE OXIDE FROM EPOXIDATE ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩАЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ СХЕМА ВЫДЕЛЕНИЯ ОКСИДА ПРОПИЛЕНА ИЗ ЭПОКСИДАТА

Summary: Construction and optimization of the mathematical model of the propylene oxide extraction process for reduce energy expenses

Аннотация: Построение и оптимизация математической модели процесса выделения оксида пропилена с целью снижения энергетических затрат

Key words: energy saving, propylene oxide, rectification, Halcon-process, mathematical modeling

Ключевые слова: энергосбережение, оксид пропилена, ректификация, Халкон-процесс, математическое моделирование

Введение

Оксиды низших олефинов – оксиды пропилена и этилена имеют стратегическое значение для народного хозяйства. Оксид пропилена, и его сополимеры используют для производства полиуретанов, эпоксидных каучуков, синтетических каучуков, которые в свою очередь, главным образом применяются в производстве комплектующих для автомобилей при изготовлении озоностойких покрытий, антивибраторов, амортизаторов.

Основное направление переработки оксида пропилена - для получения полипропиленгликолей, пропиленгликоля-1,2 и его производных, используемых в производстве ненасыщенных полиэфиров, изопропаноламинов, исходных продуктов для получения ПАВ и главным образом гибких пенополиуретанов. [1]

Главными мировыми производителями оксида пропилена являются: LyondellBasell в США (мощность 600 тыс. тонн в год), совместное предприятие BASF и Dow в Германии (мощность 300

тыс. тонн в год), совместное предприятие Covestro и LyondellBasell в Нидерландах (мощность 315 тыс. тонн в год), Sumitomo Chemical в Японии (мощность 200 тыс. тонн в год), Shandong Befar в Китае (мощность 280 тыс. тонн в год). Ежегодный прирост мощностей по оксиду пропилена составляет 8-10 % масс.

Объем производства оксида пропилена в России составляет около 100 тысяч тонн в год, а основное производство сосредоточено на ПАО «Нижнекамскнефтехим» и организовано оно по Халкон-технологии [2].

Совместное получение оксида пропилена и стирола применяется всего на нескольких производствах в мире, и одно из них располагается в России на предприятии ПАО «Нижнекамскнефтехим».

Процесс совместного получения оксида пропилена и стирола состоит из следующих стадий:

1) окисление этилбензола до гидроперекиси этилбензола (ГПЭБ), с получением 20% масс. раствора

2) эпексидирование ГПЭБ в смеси с молибденовым катализатором и избытком пропилена

3) разделение продуктов на лёгкую (с содержанием оксида пропилена) и тяжёлую (с содержанием метилфенилкарбинола и ацетофенона) фракции

4) дегидратация метилфенилкарбинола с получением стирола [2,3]

Цель

Данный процесс является достаточно энергозатратным, вследствие многокомпонентности образующейся реакционной смеси, а также высокой степени чистоты выделяемых целевых продуктов.

В работе представлена математическая модель технологического процесса выделения оксида пропилена из легкой фракции эпоксида, а также проведена ее оптимизация для снижения энергетических затрат.

Результаты и обсуждение

Имитационное моделирование – это метод исследования, заключающийся в имитации на ЭВМ (с помощью комплекса программ) процесса функционирования систем или отдельных ее частей и элементов. Имитационное моделирование позволяет осуществлять многократные испытания модели с нужными входными данными, чтобы определить их влияние на выходные критерии оценки работы системы. При таком моделировании компьютер используется для численной оценки модели, а с помощью полученных данных рассчитываются ее реальные характеристики. [4]

Решение поставленных задач можно осуществить с помощью моделирования технологического процесса узла выделения оксида пропилена с использованием современного программного обеспечения «UnisimDesign».

Объектом моделирования является установка выделения оксида пропилена из эпоксида мощностью 54,8 тыс. тонн в год. Установка состоит из 6 ректификационных колонн.

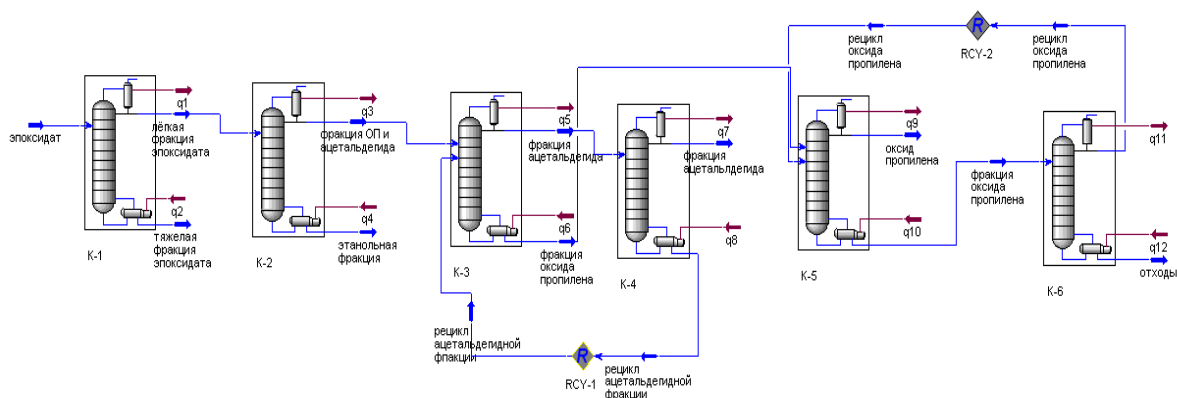


Рисунок 1 – Схема материальных потоков установки выделения оксида пропилена из эпоксида

Характеристика колонного оборудования установки выделения оксида пропилена из эпоксида представлена в таблице 1.

Таблица 1

Характеристика колонного оборудования

Характеристика	Аппарат					
	K-1	K-2	K-3	K-4	K-5	K-6
Тип колонны	тарельчатая					
Тип контактного устройства	Клапанные	Клапанные	Клапанные	Колпачковые	Клапанные	Колпачковые
Поточность	2	1	1	1	1	1
Количество контактных устройств, шт.	65	51	75	40	75	40
Межтарельчатое расстояние (мм)	600	500	400	300	500	300

Сводный материальный баланс и энергетическая нагрузка установки выделения оксида пропилена из эпоксида представлен в таблицах 2 и 3.

Таблица 2

Материальный баланс установки выделения оксида пропилена из эпоксида

Приход		Расход	
Состав	% масс	Состав	% масс
Эпоксидат	100	ОП	6,5
		Ацетальдегидная фракция	2
		Этанольная фракция	7
		Тяжелая фракция эпоксида	84
		Отходы	0,5
Итого	100	Итого	100

Таблица 3

Энергетическая нагрузка установки выделения оксида пропилена из эпоксида

Колонна	Энергетический поток	Нагрузка, кВт
К-1	Конденсатор q-1	27020
	Кипятильник q-2	26020
К-2	Конденсатор q-3	4427
	Кипятильник q-4	4399
К-3	Конденсатор q-5	5930
	Кипятильник q-6	5868
К-4	Конденсатор q-7	1218
	Кипятильник q-8	1349
К-5	Конденсатор q-9	3399
	Кипятильник q-10	3421
К-6	Конденсатор q-11	920,53
	Кипятильник q-12	1019,86
ИТОГО		84991,39

Полученная математическая модель позволяет оптимизировать процесс разделения эпоксида и выделения оксида пропилена. Изменения технологического режима влечет за собой изменение материальных и энергетических потоков. При этом качество получаемых продуктов и их товарные свойства не должны ухудшаться.

Оптимизируем полученную математическую модель путем замены шестиколонной системы выделения оксида пропилена на четырехколонную. При этом для сохранения качества получаемых продуктов необходимо изменить технологический режим. Данные приведены в таблице 4.

Таблица 4

Оптимизируемые параметры

№ п/п	Параметр	Исходная установка				Оптимизированная установка	
		К-3	К-4	К-5	К-6	К-3/1	К-4/1
1	Флегмовое число	5	3,5	3	1,5	7,2	4
2	Температура верха, °С	41,64	67,19	46,14	37,26	41,53	20,78
3	Температура куба, °С	46,13	70,7	54,9	42,1	46,14	92,54
4	Давление верха, бар	1,3	2,9	1,5	1,1	1,3	0,6
5	Давление куба, бар	1,5	3,17	1,98	1,3	1,5	0,8

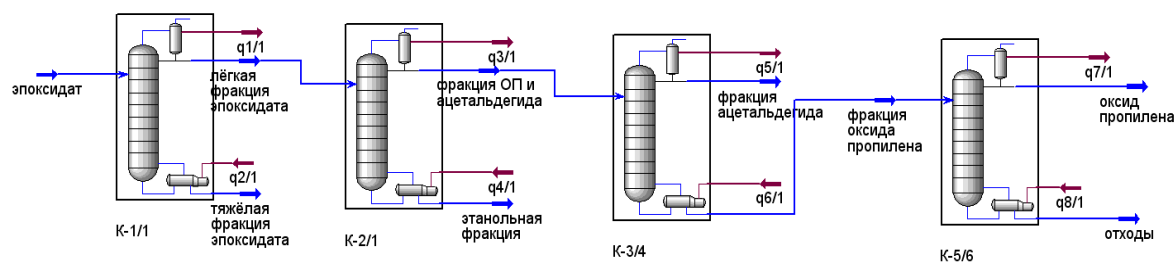


Рисунок 2 – Схема материальных потоков оптимизированной (четырёхколонной) установки выделения оксида пропилена из эпоксида

По полученным данным оптимизированной схемы видно соответствие качества полученных продуктов установки выделения оксида пропилена с исходным. Сравнительные данные составов

ацетальдегидной фракции и оксида пропилена, полученных по исходным и оптимизированным схемам, представлены в таблице 5.

Таблица 5

Сравнительные данные состава потока ацетальдегидной фракции от колонн К-4 и К-3/1

Состав, % масс.	Ацетальдегидная фракция		Оксид пропилена	
	Исходная колонна	Оптимизированная колонна	Исходная колонна	Оптимизированная колонна
Оксид пропилена	95,6	94,8	99,84	99,99
Ацетальдегид	4,1	5,1	0	0
Вода	0,3	0,1	0,16	0,01

Сравнительные данные энергетической нагрузки исходной и оптимизированной модели представлены в таблице 6.

Таблица 6

Энергетическая нагрузка исходной и оптимизированной установки выделения оксида пропилена из эпоксида

Исходная модель			Оптимизированная модель			
Колонна	Энергетический поток	Нагрузка, кВт	Колонна	Энергетический поток	Нагрузка, кВт	
К-1	Конденсатор q-1	27020	К-1/1	Конденсатор q-1	27020	
	Кипятильник q-2	26020		Кипятильник q-2	26020	
К-2	Конденсатор q-3	4427	К-2/1	Конденсатор q-3	4427	
	Кипятильник q-4	4399		Кипятильник q-4	4399	
К-3	Конденсатор q-5	5930	К-3/1	Конденсатор q-5	7349	
	Кипятильник q-6	5868		Кипятильник q-6	5393	
К-4	Конденсатор q-7	1218	К-4/1	Конденсатор q-7	3565	
	Кипятильник q-8	1349		Кипятильник q-8	3467	
К-5	Конденсатор q-9	3399		Итого	81640	
	Кипятильник q-10	3421				
К-6	Конденсатор q-11	920,53	Итого	81640		
	Кипятильник q-12	1019,86				
Итого		84991,39	Итого			

Выводы

В работе создана математическая модель установки выделения оксида пропилена из эпоксида. На основе созданной математической модели произведено изменение технологической схемы с целью уменьшения энергетических затрат.

По результатам оптимизации установки выделения оксида пропилена из эпоксида выявлено снижение энергетической нагрузки на установку на 3,94%.

Список литературы

1) Платэ Н.А. Основы химии и технологии мономеров: Учеб. Пособие / Н.А. Платэ,

Е.В.Сливинский. – М.: Наука: МАИК “Наука/Интерпериодика”, 2002.-696 с.: ил.

2) Лебедев Н.И. Химия и технология основного органического и нефтехимического синтеза: Учебник для вузов. 4-е изд., перераб. и доп. – М. Химия, 1988, - 592 с.: ил.

3) Белов П.С., Голубева И.А., Низова С.А. Экология производства химических продуктов из углеводородов нефти и газа. Учебник для вузов. – Москва, Химия, 1991. - 256 с.

4) Замятина О.М. – К34 Компьютерное моделирование: Учебное пособие. –Томск: Изд-во ТПУ, 2007. –121 с.

#12 (40), 2018 część 1

Wschodnioeuropejskie Czasopismo Naukowe
(Warszawa, Polska)

Czasopismo jest zarejestrowane i publikowane w Polsce. W czasopiśmie publikowane są artykuły ze wszystkich dziedzin naukowych. Czasopismo publikowane jest w języku polskim, angielskim, niemieckim i rosyjskim.

Artykuły przyjmowane są do dnia 30 każdego miesiąca.

Częstotliwość: 12 wydań rocznie.

Format - A4, kolorowy druk

Wszystkie artykuły są recenzowane

Każdy autor otrzymuje jeden bezpłatny

egzemplarz czasopisma.

Bezpłatny dostęp do wersji elektronicznej czasopisma.

Zespół redakcyjny

Redaktor naczelny - Adam Barczuk

Mikołaj Wiśniewski

Szymon Andrzejewski

Dominik Makowski

Paweł Lewandowski

Rada naukowa

Adam Nowicki (Uniwersytet Warszawski)

Michał Adamczyk (Instytut Stosunków Międzynarodowych)

Peter Cohan (Princeton University)

Mateusz Jabłoński (Politechnika Krakowska im. Tadeusza Kościuszki)

Piotr Michalak (Uniwersytet Warszawski)

Jerzy Czarnecki (Uniwersytet Jagielloński)

Kolub Frennen (University of Tübingen)

Bartosz Wysocki (Instytut Stosunków Międzynarodowych)

Patrick O'Connell (Paris IV Sorbonne)

Maciej Kaczmarczyk (Uniwersytet Warszawski)

Dawid Kowalik (Politechnika Krakowska im. Tadeusza Kościuszki)

Peter Clarkwood (University College London)

#12 (40), 2018 part 1

East European Scientific Journal

(Warsaw, Poland)

The journal is registered and published in Poland.

The journal is registered and published in Poland. Articles in all spheres of sciences are published in the journal. Journal is published in **English, German, Polish and Russian.**

Articles are accepted till the 30th day of each month.

Periodicity: 12 issues per year.

Format - A4, color printing

All articles are reviewed

Each author receives one free printed copy of the journal

Free access to the electronic version of journal

Editorial

Editor in chief - Adam Barczuk

Mikołaj Wiśniewski

Szymon Andrzejewski

Dominik Makowski

Paweł Lewandowski

The scientific council

Adam Nowicki (Uniwersytet Warszawski)

Michał Adamczyk (Instytut Stosunków Międzynarodowych)

Peter Cohan (Princeton University)

Mateusz Jabłoński (Politechnika Krakowska im. Tadeusza Kościuszki)

Piotr Michalak (Uniwersytet Warszawski)

Jerzy Czarnecki (Uniwersytet Jagielloński)

Kolub Frennen (University of Tübingen)

Bartosz Wysocki (Instytut Stosunków Międzynarodowych)

Patrick O'Connell (Paris IV Sorbonne)

Maciej Kaczmarczyk (Uniwersytet Warszawski)

Dawid Kowalik (Politechnika Krakowska im. Tadeusza Kościuszki)

Peter Clarkwood (University College London)

Igor Dzedzic (Polska Akademia Nauk)
Alexander Klimek (Polska Akademia Nauk)
Alexander Rogowski (Uniwersytet Jagielloński)
Kehan Schreiner(Hebrew University)
Bartosz Mazurkiewicz (Politechnika Krakowska im. Tadeusza Kościuszki)
Anthony Maverick(Bar-Ilan University)
Mikołaj Żukowski (Uniwersytet Warszawski)
Mateusz Marszałek (Uniwersytet Jagielloński)
Szymon Matysiak (Polska Akademia Nauk)
Michał Niewiadomski (Instytut Stosunków Międzynarodowych)
Redaktor naczelny - Adam Barczuk

1000 kopii.

Wydrukowano w «Aleje Jerozolimskie 85/21, 02-001 Warszawa, Polska»

Wschodnioeuropejskie Czasopismo Naukowe

Aleje Jerozolimskie 85/21, 02-001 Warszawa, Polska

E-mail: info@eesa-journal.com ,

<http://eesa-journal.com/>

Igor Dzedzic (Polska Akademia Nauk)
Alexander Klimek (Polska Akademia Nauk)
Alexander Rogowski (Uniwersytet Jagielloński)
Kehan Schreiner(Hebrew University)
Bartosz Mazurkiewicz (Politechnika Krakowska im. Tadeusza Kościuszki)
Anthony Maverick(Bar-Ilan University)
Mikołaj Żukowski (Uniwersytet Warszawski)
Mateusz Marszałek (Uniwersytet Jagielloński)
Szymon Matysiak (Polska Akademia Nauk)
Michał Niewiadomski (Instytut Stosunków Międzynarodowych)
Editor in chief - Adam Barczuk

1000 copies.

Printed in the "Jerozolimskie 85/21, 02-001 Warsaw, Poland»

East European Scientific Journal

Jerozolimskie 85/21, 02-001 Warsaw, Poland

E-mail: info@eesa-journal.com ,

<http://eesa-journal.com>