



ВОСТОЧНО ЕВРОПЕЙСКИЙ НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

DOI: 10.31618/ESSA.2782-1994.2021.2.75

#11(75), 2021 часть 2

Восточно Европейский научный журнал
(Санкт-Петербург, Россия)
Журнал зарегистрирован и издается в России
В журнале публикуются статьи по всем
научным направлениям.
Журнал издается на русском, английском и
польском языках.

Статьи принимаются до 30 числа каждого
месяца.

Периодичность: 12 номеров в год.

Формат - A4, цветная печать

Все статьи рецензируются

Бесплатный доступ к электронной версии
журнала.

Редакционная коллегия

Главный редактор - Адам Барчук

Миколай Вишневецки

Шимон Анджеевский

Доминик Маковски

Павел Левандовски

Ученый совет

Адам Новицки (Варшавский университет)

Михал Адамчик (Институт
международных отношений)

Питер Коэн (Принстонский университет)

Матеуш Яблоньски (Краковский
технологический университет имени
Тадеуша Костюшко)

Петр Михалак (Варшавский университет)

Ежи Чарнецкий (Ягеллонский университет)

Колуб Френнен (Тюбингенский
университет)

Бартош Высоцкий (Институт
международных отношений)

Патрик О'Коннелл (Париж IV Сорбонна)

Мацей Качмарчик (Варшавский
университет)

#11(75), 2021 part 2

Eastern European Scientific Journal
(St. Petersburg, Russia)
The journal is registered and published in Russia
The journal publishes articles on all scientific
areas.
The journal is published in Russian, English
and Polish.

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

Periodicity: 12 issues per year.

Format - A4, color printing

All articles are reviewed

Free access to the electronic version of journal
Editorial

Editor-in-chief - Adam Barczuk

Mikolaj Wisniewski

Szymon Andrzejewski

Dominik Makowski

Pawel Lewandowski

Scientific council

Adam Nowicki (University of Warsaw)

Michal Adamczyk (Institute of International
Relations)

Peter Cohan (Princeton University)

Mateusz Jablonski (Tadeusz Kosciuszko
Cracow University of Technology)

Piotr Michalak (University of Warsaw)

Jerzy Czarnecki (Jagiellonian University)

Kolub Frennen (University of Tübingen)

Bartosz Wysocki (Institute of International
Relations)

Patrick O'Connell (Paris IV Sorbonne)

Maciej Kaczmarczyk (University of Warsaw)

**Давид Ковалик (Краковский
технологический университет им. Тадеуша
Костюшко)**

**Питер Кларквуд (Университетский
колледж Лондона)**

Игорь Дзедзич (Польская академия наук)

**Александр Климек (Польская академия
наук)**

**Александр Роговский (Ягеллонский
университет)**

Кехан Шрайнер (Еврейский университет)

**Бартош Мазуркевич (Краковский
технологический университет им. Тадеуша
Костюшко)**

Энтони Маверик (Университет Бар-Илан)

**Миколай Жуковский (Варшавский
университет)**

**Матеуш Маршалек (Ягеллонский
университет)**

**Шимон Матысяк (Польская академия
наук)**

**Михал Невядомский (Институт
международных отношений)**

Главный редактор - Адам Барчук

1000 экземпляров.

Отпечатано в ООО «Логика+»

198320, Санкт-Петербург,

Город Красное Село,

ул. Геологическая,

д. 44, к. 1, литера А

«Восточно Европейский Научный Журнал»

Электронная почта: info@eesa-journal.com,

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

**Dawid Kowalik (Kracow University of
Technology named Tadeusz Kościuszko)**

Peter Clarkwood (University College London)

Igor Dzedzic (Polish Academy of Sciences)

**Alexander Klimek (Polish Academy of
Sciences)**

Alexander Rogowski (Jagiellonian University)

Kehan Schreiner (Hebrew University)

**Bartosz Mazurkiewicz (Tadeusz Kościuszko
Cracow University of Technology)**

Anthony Maverick (Bar-Ilan University)

Mikołaj Żukowski (University of Warsaw)

Mateusz Marszałek (Jagiellonian University)

**Szymon Matysiak (Polish Academy of
Sciences)**

**Michał Niewiadomski (Institute of
International Relations)**

Editor in chief - Adam Barczuk

1000 copies.

Printed by Logika + LLC

198320, Region: St. Petersburg,

Locality: Krasnoe Selo Town,

Geologicheskaya 44 Street,

Building 1, Litera A

"East European Scientific Journal"

Email: info@eesa-journal.com,

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

СОДЕРЖАНИЕ

АРХИТЕКТУРА

Шапранова М.Р., Бармашина Л.М., ОСОБЛИВОСТІ РЕНОВАЦІЇ ПРОМИСЛОВИХ ЗОН ЗІ СТВОРЕННЯМ ТЕХНОПАРКОВОГО СЕРЕДОВИЩА	4
--	---

НАУКИ О ЗЕМЛЕ

Туртыгина Н.А., Охрименко А.В. ОЦЕНКА СЛОЖНОСТИ ЗАЛЕГАНИЯ И ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ КАЧЕСТВА БОГАТЫХ РУД ПРИ РАЗРАБОТКЕ ЗАЛЕЖИ С-2.....	10
Черемисская О.М., Петруняк Г.М., Черемисский Ю.В., Петруняк М.Д. МЕТАСОМАТИЧЕСКИЕ ИЗМЕНЕНИЯ В ПОРОДАХ ОСАДОЧНЫХ КОМПЛЕКСОВ В КАРПАТСКОЙ НЕФТЕГАЗОНОСНОЙ ПРОВИНЦІЇ КАК ИНДИКАТОР МИГРАЦИИ УГЛЕВОДОРОДОВ	16

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Авдейчик С.В., Антонов А.С., Лесун А.Н. КОНЦЕПТ МНОГОУРОВНЕВОГО МОДИФИЦИРОВАНИЯ В ТЕХНОЛОГИИ ВЫСОКОНАПОЛНЕННЫХ ФТОРКОМПОЗИТОВ.....	25
Salimova N.A., Guseinova M.A. РАЦИОНАЛЬНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ КУБОВОГО ОСТАТКА ОТ ПРОИЗВОДСТВА ИЗОПРОПИЛОГО СПИРТА.	31
Мельник В.М., Гнатейко Н.В. ВПЛИВ АКУСТИЧНОЇ ХВИЛІ ТИСКУ НА ПЕРЕМІЩЕННЯ ПІДВОДНОГО АПАРАТУ	34
Мельник В.М., Бойко Г.В., Бойко О.Ф. СУЧАСНІ БЕЗПІЛОТНІ АПАРАТИ. ПЛАНІРУЮЧІ ВОГНЕВІ ЗАСОБИ	42
Хабибова Н.З. АНАЛИЗ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ПРОЦЕССОВ РАСШИРЕНИЯ НЕИДЕАЛЬНЫХ ГАЗОВ	53
Коротинський А.П., Шапошник А.А., Жученко Л.К. СИНТЕЗ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ЕНЕРГОЕМНИМ ТЕХНОЛОГІЧНИМ ПРОЦЕСОМ НА ОСНОВІ D-РОЗБИТТЯ	64

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ

Алиев Г.Г., Алиев А.Г. ПРОЧНОСТЬ МНОГОСЛОЙНОЙ ПОЛИМЕРНОЙ ТРУБЫ С УЧЕТОМ ИЗМЕНЕНИЯ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛА.....	68
--	----

АРХИТЕКТУРА

УДК 504:331.546:378:725(043.2)

*Shapranova M.,
magistrant**Barmashina L.,
PhD in Architecture, Associate Professor,
National Aviation University, Kyiv, Ukraine*

FEATURES OF THE RENOVATION OF PROMISLOVE ZONES FOR THE INDUSTRIES OF THE TECHNOPARK

*Шапранова М.Р.,
магістрант,**Бармашина Л.М.,
кандидат архітектури, доцент,
кафедра архітектури та просторового планування факультету архітектури,
будівництва та дизайну,
Національний авіаційний університет, м. Київ, Україна*

ОСОБЛИВОСТІ РЕНОВАЦІЇ ПРОМИСЛОВИХ ЗОН ЗІ СТВОРЕННЯМ ТЕХНОПАРКОВОГО СЕРЕДОВИЩА

DOI: [10.31618/ESSA.2782-1994.2021.2.75.157](https://doi.org/10.31618/ESSA.2782-1994.2021.2.75.157)

Annotation. The article considers a new typological object - a technopark as a research and production territorial complex, the main task of technopark is to create the most favorable environment for the development of small and medium-sized innovative companies. In the structure of technoparks can be represented such centers as innovation and technology, training, information, consulting, marketing, legal, financial and more.

Анотація. У статті розглядається новий типологічний об'єкт – технопарк як науково-виробничий територіальний комплекс, головне завдання якого полягає у формуванні максимально сприятливого середовища для розвитку малих і середніх наукомістких інноваційних фірм. У структурі технопарків можуть бути представлені такі осередки, як інноваційно-технологічний, навчальний, інформаційний, консультаційний, маркетинговий, юридичний, фінансовий тощо.

Keywords: technopark, industrial zone, renovation, innovation center.

Ключові слова: технопарк, промислова зона, реновація, інноваційний центр.

Постановка проблеми (актуальність). Аналіз світового досвіду показує, що економічне зростання розвинутих країн та їх окремих регіонів вже давно базується на використанні сфери знань і високих технологій, а їх ефективне поєднання гарантує прогресивний розвиток нації та людства. Однією з найбільш вдалих форм такої інтеграції є технопарки [1]. Для досягнення нового якісного рівня науково-технологічного, інноваційного та, як наслідок, економічного розвитку будь-яка країна повинна активно використовувати ефективні механізми стимулювання науково-дослідних розробок, головним з яких є формування технопарків як нових типологічних об'єктів. Поєднання в таких закладах різних просторових елементів і функціональних процесів має сприяти комерціалізації науки, зростанню конкурентоспроможності інноваційної продукції на світовому ринку [2]. Інтегровані науково-виробничі та навчально-дослідні установи формуються зокрема великими науковими центрами на спеціально відведених та облаштованих територіях, насичених необхідною інженерною, науково-виробничою, інформаційною і соціальною інфраструктурою. Технопарки як типологічні об'єкти можуть об'єднувати наступні

функції: розробка і реалізація наукомістких технологій; здійснення інноваційної діяльності - від генерації нових ідей до випуску й реалізації наукоємної продукції; навчання та дослідницька діяльність; відповідне громадське обслуговування. Існуючі технопарки пропонують вигідні умови ведення науково-виробничої та інноваційної діяльності не лише для своїх резидентів, а й для певного регіону в цілому, наприклад: диверсифікація місцевої економіки, що робить її більш стійкою; додаткові висококваліфіковані робочі місця і відповідні податкові надходження; розширення можливостей для підприємницької та інноваційної діяльності; поліпшення іміджу міста або іншого населеного пункту за рахунок утримання перспективної молоді; стимулювання економічного зростання регіону.

Станом на 2020 рік в Україні налічувалося 16 так званих технопарків, але на практиці працюючими є одиниці, наприклад, Київська політехніка, Інститут монокристалів, UNIT City, тощо. Натомість зарубіжний практичний досвід показує постійне збільшення темпів розвитку інноваційних центрів (технопарків), динамічність їх формування та вдосконалення.

В Україні практичне створення інноваційних центрів розпочалося в 2000-х роках. Першими до цього були залучені Інститут монокристалів та Інститут електрозварювання імені Є.О.Патона. Українські технопарки умовно можна поділити на такі категорії: створені при вищих навчальних закладах без підтримки держави (технопарк «Львівська політехніка»); такі, що функціонують у спеціальних економічних зонах (технопарк «Яворів», бізнес-інкубатор СЕЗ «Славутич»); сформовані на базі великих наукових центрів або вузів, що мають потужні дослідницькі підрозділи (технопарки «Інститут електрозварювання імені Е.О. Патона», «Інститут монокристалів», «Напівпровідникові технології та матеріали, оптоелектроніка та сенсорна техніка», «Вуглемаш», «Інститут технічної теплофізики», «Укрінфотех», «Інтелектуальні інформаційні технології», «Київська політехніка») [3]. Ці структури створювалися на базі потужних науково-виробничих колективів Національної академії наук. Передбачалося, що вони будуть займатися розробкою і впровадженням наукомістких приладів і матеріалів для охорони здоров'я, біотехнологіями, розвитком електроніки, радіаційного приладобудування, ядерної техніки і іншими галузями. Наявність наразі в Україні технологічних парків не відповідають зарубіжному рівню. Основні недоліки в діяльності українських технопарків пов'язані з дефіцитом фінансів, недостатньою державною підтримкою, відсутністю суміжної інфраструктури тощо. Крім того вагомою причиною є відсутність усталених методик і типологічних підходів щодо архітектурно-планувальної організації технопарків.

Економічні умови сучасності ставлять перед архітекторами задачу розробляти науково-виробничі комплекси нового типу, внутрішній та зовнішній простір яких має бути мобільним і гнучким для забезпечення безперешкодного впровадження, експлуатації та трансформації технологічних процесів. При цьому архітектурний аспект формування нових інноваційних центрів ускладнюється зокрема дефіцитом відповідних територій, що зумовлює потребу пошуку нових шляхів. Таким рішенням може стати проектування технопаркового середовища на

на місці промислової зони, яка вже втратила свою потужність і не є вигідною. В умовах стану сьогоденної економіки гострим питанням є втрата промисловими підприємствами своєї первинної виробничої функції. Це призводить до скорочення виробництва, в подальшому до закриття, веде до утворення занедбаної, покинутої території величезних масштабів. Така територія ідеально підходить для створення технопаркового середовища та завдяки реновації може отримати нове життя. Таким чином можна адаптувати занедбані промислові райони для потреб сучасного інноваційного процесу.

Мета статті: визначення особливостей формування технопаркового середовища в процесі реновації промислових зон.

Основна частина. Тенденція реновації промислових районів і окремих об'єктів набуває широкого поширення у всьому світі. В Україні це явище є відносно новим, проте з кожним роком все більше відчувається потреба в цьому. Враховуючи зростання кількості населення, забудовники та інвестори приділяють більше уваги створенню житлових зон та об'єктів. Генеральний план розвитку Києва на період до 2020 року за обсягами будівництва комерційного житла виконано на 130%, при цьому програма реконструкції, розвитку та формування інженерної та містобудівної інфраструктури виконана всього лише на 30% [4]. Залишається все менше територій для перспективного розвитку міста, тому промислові зони, які втратили свою початкову потужність, становлять великий інтерес як для інвесторів, так і для архітекторів, Завдяки реновації вони можуть отримати друге життя.

Проектування технопарків на місці промислових зон відбувається як у зарубіжній, так вітчизняній практиці. Муніципальна влада в розвинених країнах прагне створити на територіях індустриальних пустирів кластери із зручними місцями для працевлаштування і життя. Історично така практика бере початок із Західної Європи, одного з головних регіонів у світі щодо розвитку науки та інноваційних досліджень. Із посиленням прикладних розробок науково-технічні центри почали виникати в старих промислових районах – наприклад, у Рурській області (Німеччина), в Мідленді, Ланкаширі, Йоркширі (Великобританія).

Створення технопарків та інших інноваційних виробництв є сучасним підходом до реорганізації колишніх промислових зон. Саме таку стратегію – розвиток на основі інновацій, реалізують деякі старі європейські міста, наприклад, німецький Дортмунд. Колись тут було розташовано безліч підприємств вугільної та металургійної промисловості. Потім ці напрями стали нерентабельними, і влада міста розробила нову довгострокову стратегію розвитку. В результаті Дортмунд став майданчиком для інноваційних технологічних компаній, одним із найсильніших науково-технологічних кластерів у світі.

Ще одним яскравим європейським прикладом є район Поблену в Барселоні. Він був забудований текстильними фабриками. З їх закриттям район занепав. Врятувало його створення високотехнологічного центру з бізнес-інкубаторами та офісами. Сьогодні Ель Поблену – престижний район, в якому зосереджена інноваційна діяльність, наприклад, офіси Yahoo!, Microsoft тощо.

Українська практика заснування технопарків із самого свого початку намагалась іти шляхом реновації. Перша ідея створення технопарку виникла на основі розформованої ракетної бази біля м. Броди Львівської області. Нажаль перший

крок не привів до успіху через ряд причин. Під час формування першого технологічного парку в Україні влада м. Броди змінилася, нові керівники не виявили зацікавленості в продовженні експерименту, і він поступово перестав діяти [5].

В Україні, зокрема у Києві, який наразі залишається головним осередком новітніх технологій, існують успішні приклади реновації промислових районів, а саме, Завод Арсенал і ЖК «Комфорт Таун» на місці заводу «Вулкан». Цікаво

також розглянути приклад перетворення занедбаної промислової зони у технопарк UNIT.City. Він вважається першим в Україні технопарком, який було створено на території колишнього заводу. Станом на 2021 рік в інноваційному парку налічується 110 компаній-резидентів. Серед них чотири лабораторії, три бізнес-кампуси та коворкінг, вісім акселераторів і три інвестиційні фонди для підтримки та розвитку українських стартапів [6] (рис.1, 2).



Рис.1. Територія мотозаводу до створення технопарку



Рис.2. Технопарк Unit City, Київ, Україна

Реновацію промислових територій, які наразі не використовуються за призначенням, доцільно розглядати як актуальний спосіб створення нових технопаркових комплексів. При цьому слід враховувати вплив наступних факторів: обмежена кількість земельних ділянок, які виділяються місцевою владою під нову (нежитлову) забудову; накопичення значної кількості занедбаних промислових територій у центральній частині або на периферії населених пунктів; наявність досить універсальної об'ємно-планувальної структури промислових об'єктів та інженерної інфраструктури. Таким чином, перетворення промислової зони на технопаркове середовище обумовлене вагомими причинами:

- потреба у виробничій функції. Головною спрямованістю технопарків є розробка і впровадження наукомістких технологій. Для реалізації інноваційних технологій та виготовлення необхідної продукції з урахуванням визначених супутніх функцій необхідна відповідна структура виробничої будівлі та певне інженерне обладнання;

- необхідність змін щодо переоблаштування містобудівного середовища. Проаналізувавши етапи становлення тих чи інших населених пунктів, можна зауважити, що заводи та інші виробничі потужності завжди були певною домінантою та навіть композиційним центром. Промислові зони часто мали розвинену інфраструктуру та інженерні мережі, а також були осередком економічної активності. Аналогічним містобудівним вимогам має відповідати технопаркове середовище, адже так звані інноваційні центри є місцями зосередження економічної активності. Насправді вони поєднують потенціал університетів, науково-

дослідних структур, промислових підприємств та суб'єктів інноваційної інфраструктури регіонального загальнодержавного та міжнародного рівнів. Технопаркам необхідна наявність потужних транспортних зв'язків із міжнародними аеропортами, логістичними центрами та іншими транспортними об'єктами. Це дозволить розмістити технопаркові структури з найбільшою ефективністю, прийняти грамотну стратегію інноваційного розвитку.

Успішна трансформація промислової зони у технопаркове середовище залежить зокрема від статусу структуроутворюючого об'єкта, його історичної значущості, конструктивних та інженерних особливостей промзони тощо, наприклад, від того, чи вимагає рекультивації земля у зоні. Готових рішень щодо реновації промислових зон немає, у кожному випадку повинні проводитися експертні обстеження та оцінка.

Промислові території та об'єкти можна умовно поділити на дві головні групи:

- такі, що мають статус архітектурної спадщини – тобто, на метою є максимальне збереження первинного вигляду та змісту;

- типові промислові території або виробничі будівлі, внутрішню та зовнішню організацію яких можна і потрібно змінювати.

У випадку повного збереження окремої будівлі або цілої промислової зони, які являються архітектурною спадщиною, доцільним є влаштування другого (за висотою) рівня. Це означає створення надбудов чи добудов зверху та навколо існуючої споруди. Такий метод було використано на всеукраїнському архітектурному

воркшопі «Фабрика Івана Левинського: Львівський баухауз». Учасникам було запропоновано завдання: реновація території та комплексу фабрики Левинського, яка є архітектурною спадщиною. Фабрика була збудована на початку двадцятого століття і об'єднувала вісім земельних ділянок, на яких розташовувалося п'ять будівель різних розмірів і призначення. Вирішенням задачі

стало створення «другого місця» - платформи, що об'єднує усі історичні будівлі в єдину композицію, а також служить транзитною зоною. Одна з історичних будівель за проектом мала б стати культурно-дослідним центром для архітекторів, не змінюючи при цьому свого початкового вигляду (рис.3).

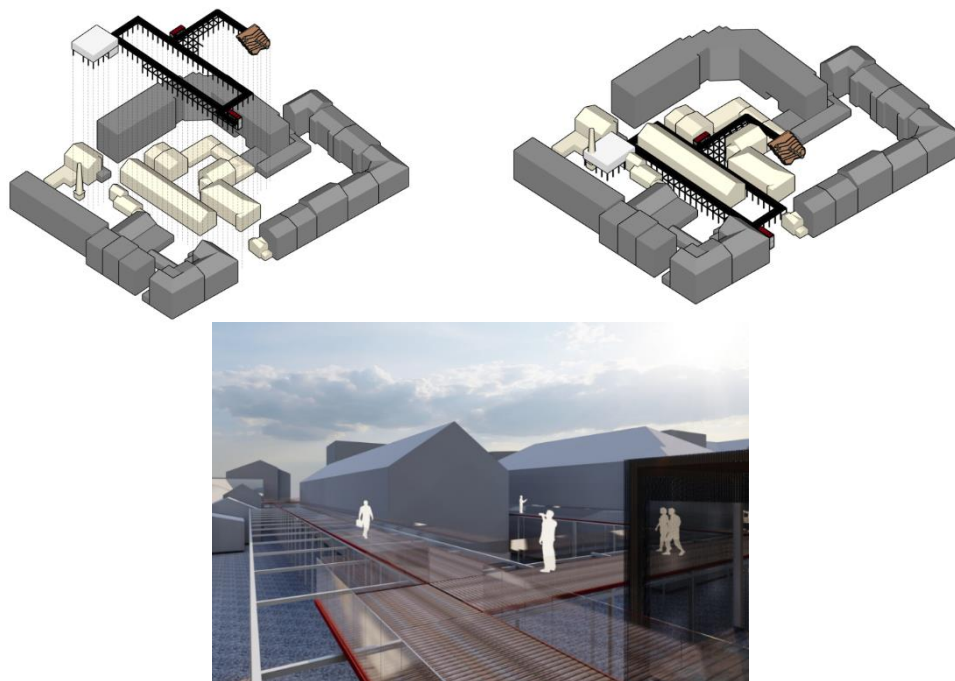


Рис. 3. Проектне рішення реновації Фабрики Івана Левинського із збереженням історичної спадщини

В іншому випадку, коли промислова зона не є історичною спадщиною, найбільш вдалим з економічної точки зору є варіант часткового збереження первинної виробничої функції об'єкту та подальше її поєднання з функціями інноваційного спрямування.

Об'ємно-планувальні та містобудівні рішення щодо реновації промислових зон зі створенням технопарків мають базуватись на таких головних принципах:

створення вільного та комфортного громадського середовища;

дотримання принципів екологічності задля покращення стану визначеної промислової ділянки;

забезпечення виконання першочергових функцій технопарку (дослідження, навчання, розробка, виробництво, впровадження).

Найбільш ефективною методикою реновації промислового об'єкту у технопаркове середовище можуть стати сценарні методи проектування архітектурно-містобудівних об'єктів, які базуються на оцінюванні можливих варіантів трансформації об'єкта у часі, а також відкривають можливості динамічного використання. Це дозволяє адаптувати об'єкт у ситуації багатовекторного розвитку подій [7]. Такий підхід буде сприяти досягненню синергії за рахунок гнучкого розміщення обладнання

колективного користування, центрів сертифікації, інжинірингу, підтримки експорту та інших функціональних елементів і відповідних просторів, необхідних для інноваційної діяльності. Це також важливо для створення інтелектуальної та креативної атмосфери технопарку. Наразі актуальним є створення в технопарках елементів і просторів, гнучких щодо функціонального використання, а також формоутворення об'єктів на основі принципу змінної геометрії. Це забезпечить комфортне середовище та можливість пристосування до будь-яких умов і потреб.

Одна з основних особливостей промислових виробництв — їх постійне вдосконалення, пов'язане з модернізацією технології та частковою або повною заміною обладнання [8]. Тому для технопарків найбільш перспективним є універсальний тип промислових будівель для розміщення різних виробництв однієї або декількох галузей промисловості, влаштованих на принципах гнучкості використання просторів і змінної геометрії формоутворення.

Зарубіжний досвід проектування має приклади ефективних рішень споруд-конструкторів, одна з головних особливостей яких полягає у гнучкості та багатофункціональності. Прикладом є Науково-дослідний центр за проектом Захи Хадід в Ер-Ріяде,

де кожне приміщення може бути універсальним і змінювати своє попереднє призначення в залежності від потреб і заходів. У будь-який момент до центральної будівлі можна приєднати ще кілька, з'єднаних по типу конструктора [9]. Принцип змінної геометрії дозволить технопарковому середовищу безкінечно розвиватись. Зміна функціонального призначення приміщень та просторів будівлі – це той фактор, який суттєво впливає на конфігурацію елементів і можливість їх динамічної трансформації щодо площі та об'єму за обмежений проміжок часу.

Принцип енергоефективності та екологічності можна втілити за допомогою облаштування промислових споруд «зеленими технологіями». Саме територія промислових зон дозволяє проводити будь-які подібні експерименти.



Наприклад, корпус B12 інноваційного парку UNIT.City у Києві отримав срібний сертифікат LEEDv.4 Core&Shell з екологічного будівництва США (USGBC). Він був названий першою комерційною спорудою в Україні, нагородженою таким сертифікатом. Було відзначено такі особливості корпусу: наявність підземного паркінгу із зарядками для електромобілів, енергоефективний дизайн, інженерне обладнання, LED-освітлення, водоефективна сантехніка та система ландшафтного поливу, роздільний збір сміття [10]. Втілювати цей принцип можна також за допомогою створення експлуатованої покрівлі та оновлення фасадів. Наприклад, Тайванський науковий центр запровадив технологію «розумного фасаду», сформованого із алюмінієвих жалюзі та сонячних батарей [11] (рис.4).

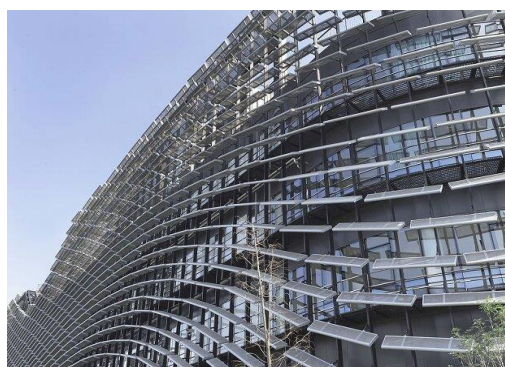


Рис.4. Вирішення енергоефективних фасадів у Тайванському дослідному центрі

Актуальним є створення рекреаційних зон із використанням зелених технологій, наприклад, формування штучного другого рівня землі – створення системи озелених платформ, які могли б також стати місцем відпочинку, та спілкування («третім місцем») Комунікативні майданчики – «третє місце», організують вільний, неформальний обмін знаннями та концепціями, визначають загальну картину життя в інноваційному центрі, таким чином вони підвищують загальну продуктивність, є запорукою синергії та співпраці. Рекреаційні простори технопарку можуть займати 30-60% від усієї площі. Саме завдяки великій значущості природних просторів технопарк одержав свою назву.

Також у створенні продуктивного спільного простору значну роль відіграють світлопрозорі огорожувальні конструкції. Архітектурна прозорість як принцип візуального взаємозв'язку є новим стандартом у створенні внутрішнього технопаркового середовища. Такі простори, як офіси, коридори тощо, часто відокремлені один від одного непрозорими конструкціями. Цю ситуацію можна виправити створенням відкритих просторів, які відокремлені скляними перегородками, формуючи при цьому безперешкодні лінії зору. Відповідні ідеї присутні в передових робочих середовищах, таких як Google та Apple кампусах. Наприклад, архітектурну концепцію UNIT.City

розроблено польською компанією Wojciechowski Architekti спільно із нідерландським ландшафтним архітектором Хірокі Мацуурою. В її основу покладено ідею про створення міського простору, продуктивного та комфортного водночас. Тут можна вчитися та працювати, творити й вигадувати, взаємодіяти та жити повним життям без перерв і бар'єрів. Великопролітні промислові будівлі допомагають втілювати такий підхід.

Висновки. Технопарк – науково-виробничий територіальний комплекс, головне завдання якого полягає у формуванні максимально сприятливого середовища для розвитку наукоємних інноваційних фірм. У структурі технопарків представлені такі основні осередки: інноваційно-технологічний, навчальний, консультаційний, інформаційний, маркетинговий, юридичний, фінансовий, економічний, виробничий. Промислова зона технопарку виконує одну з найважливіших функцій — виготовлення певної продукції, тому в умовах стану сьогодення економіки більш доцільним є не створення технопарку з нуля, а формування шляхом реновації існуючої промислової зони. Наразі гострим питанням постає втрата промисловими підприємствами своєї первинної виробничої функції. Завдяки реновації вони зможуть отримати нове життя. Створення вільного та комфортного громадського середовища, дотримання принципів

екологічності задля покращення стану визначеної промислової ділянки та забезпечення виконання першочергових функцій технопарку (дослідження, навчання, розробка, виробництво, впровадження) є головними принципами, на яких мають базуватись об'ємно-планувальні та містобудівні рішення в процесі реновації промислових зон зі створенням інноваційних центрів – технопарків.

Література:

- (1) О. Дорошко. Технопарки як засіб стимулювання інноваційної діяльності. Електронний журнал «Ефективна економіка» № 1, 2011 р. <http://www.economy.nayka.com.ua/index.php?operation=1&iid=507>.
- (2) Ревуцький С.. Формування та розвиток технопаркової інноваційної інфраструктури в Російській Федерації. Теорія та практика інтелектуальної власності. 2010 р., С. 57.
- (3) Уханова І.О. Розвиток та функціонування технопарків: світовий досвід та специфіка в Україні. Монографія. Одеса, 2012 р., С. 86.
- (4) Основні положення генерального плану м. Києва на період до 2020 р. <https://kga.gov.ua/generalnij-plan>

- (5) Тараненко О.М., Корновенко С.В.. Технопарки в Україні як елемент інноваційної інфраструктури. Теоретичні і практичні аспекти економіки та інтелектуальної власності. 2014 р., Випуск 1(10), том 2, С.45.

- (6) Офіційний сайт UNIT.City [Електронний ресурс] / Режим доступу: <https://unit.city/>

- (7) Буравченко С.Г. Аспекти систематизації сценарних методів проектування об'єктів архітектури. Сучасні проблеми Архітектури та Містобудування, 2019 р.

- (8) Конспект лекцій з дисципліни «Проектування будівель і споруд»: Частина друга. Проектування промислових будівель і споруд. Для магістрів напряму 192- Будівництво та цивільна інженерія, Укл. - Чернігів: ЧИТУ, 2015 р.

- (9) Исследовательский центр по проекту Захи Хадид в Эр-Рияде <https://www.admagazine.ru/architecture/issledovateliskij-centr-po-proektu-zahi-hadid-v-er-riyade>

- (10) UNIT.City <https://uk.wikipedia.org/wiki/UNIT.City>

- (11) Эко-архитектура: Тайваньский научный центр с живой крышей <https://hvoya.wordpress.com/2015/08/03/bioformosa/>

НАУКИ О ЗЕМЛЕ

УДК 622.273

Коды ГРНТИ 52.31 Разработка рудных и россыпных месторождений, цветных и благородных металлов и алмазов.

Turtygina Natalia Alexandrovna

*Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of
the Polar State University named after N.M. Fedorovsky,
Norilsk, Russia*

Okhrimenko Alexander Vladimirovich

*Head of the Planning Center, Komsomolsky Mine,
Polar Division PJSC MMC Norilsk Nickel*

ASSESSMENT OF THE COMPLEXITY OF OCCURRENCE AND GEOLOGICAL VARIABILITY OF THE QUALITY OF HIGH-GRADE ORES DURING THE DEVELOPMENT OF THE C-2 DEPOSIT

Туртыгина Наталья Александровна

*кандидат технических наук, доцент
Заполярного государственного университета им. Н.М. Федоровского;
663310, г. Норильск, Россия*

Охрименко Александр Владимирович

*руководитель центра планирования рудник «Комсомольский» ЗФ
ПАО «ГМК «Норильский никель»*

ОЦЕНКА СЛОЖНОСТИ ЗАЛЕГАНИЯ И ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ КАЧЕСТВА БОГАТЫХ РУД ПРИ РАЗРАБОТКЕ ЗАЛЕЖИ С-2

DOI: [10.31618/ESSA.2782-1994.2021.2.75.159](https://doi.org/10.31618/ESSA.2782-1994.2021.2.75.159)

Резюме: Большое значение, в связи с проблемой обеспечения качества добытых руд, имеет объективная количественная оценка геологической изменчивости полезного ископаемого в пределах залежей, которая является первопричиной колебания качества.

Summary: Of great importance, in connection with the problem of ensuring the quality of mined ores, is an objective quantitative assessment of the geological variability of a mineral within the deposits, which is the primary cause of quality fluctuations.

Abstract. The work is devoted to a very topical issue - predicting quality indicators in underground mining of ore deposits. In this work, the conditions and ways of improving the quality of ores during mining were studied on the example of deposits of rich ores in the northern flanks of the Talnakh and Oktyabrsky deposits of Talnakh. The studies were carried out in specific conditions at the mining enterprises of the Polar Division of the Public Joint Stock Company Mining and Metallurgical Company Norilsk Nickel.

The northern deposits of the Talnakhskoye deposit represent the main prospect for replenishing the retired production capacities for the extraction of high-grade ores. The significant heterogeneity of the distribution of the metal content in industrial reserves of rich copper-nickel ores is the primary cause of high fluctuations in the quality of ore flow, which requires the use of the most advanced mining technologies to control the quality of ores during extraction.

The process of forming the required quality level of mined ores at the mines of the Polar Division of PJSC MMC Norilsk Nickel is of paramount importance. However, during the development of deposits of «rich» ores in the ore stream «mine - processing plant», significant fluctuations in the quality of the ore mass are formed, which lead to losses of metals in the process of concentration and during metallurgical redistribution, thereby reducing the economic efficiency of the entire mining and metallurgical complex, as determines the relevance of the work.

Аннотация. Работа посвящена весьма актуальному вопросу – прогнозированию качественных показателей при подземной разработке рудных месторождений [4]. В работе условия и пути улучшения качества руд при добыче изучались на примере залежей богатых руд Северных флангов Талнахского и Октябрьского месторождений Талнаха. Исследования выполнялись в конкретных условиях на горнодобывающих предприятиях Заполярного филиала Публичного акционерного общества «Горно-металлургической компании «Норильский никель».

Северные залежи Талнахского месторождения представляют основную перспективу для восполнения выбывающих производственных мощностей по добыче богатых руд. Значительная неоднородность распределения содержания металлов в промышленных запасах богатых медно-никелевых руд является первопричиной высоких колебаний показателей качества рудопотока, что требует применение наиболее глубоких технологий ведения горных работ для управления качеством руд при добыче [3].

Процессу формирования требуемого уровня качества добытых руд на рудниках ЗФ ПАО «ГМК «Норильский никель» уделяется первостепенное значение. Однако, при разработке месторождений «богатых» руд в рудопотоке «рудник - обогатительная фабрика» формируются значительные колебания качества рудной массы, которые приводят к потерям металлов в процессе обогащения и при металлургическом переделе, снижая тем самым экономическую эффективность всего горно – металлургического комплекса, что и определяет актуальность работы [1].

Key words: mine, quality, stability, ore, assessment, complexity, correlation dependences, grade, management, production.

Ключевые слова: рудник, качество, стабильность, руда, оценка, сложность, корреляционные зависимости, содержание, управление, добыча.

Постановка проблемы. Для современного горнодобывающего производства Талнахского рудного узла характерна интенсивная отработка наиболее богатых промышленных запасов полезных ископаемых [2]. Талнахский рудный узел приурочен к области сочленения Кайеркано – Пясинской антиклинали с юго-западной частью Хараелахской мульды на юге и протягивается вдоль Норильско-Хараелахского разлома. В него входят два крупнейших в мире медно-никелевых месторождения: Талнахское и Октябрьское вмещающие около 90% запасов сульфидных медно-никелевых руд Норильского района [5]. «Обеднение промышленных запасов руд практически на всех горнорудных предприятиях, негативно сказывается на результатах деятельности как горнодобывающего, так и перерабатывающего производств» [6, с. 147].

Анализ последних исследований и публикаций. В поле рудника сульфидные медно-никелевые руды представлены тремя промышленными типами руд: богатыми (сплошными), вкрапленными в интрузиве и «медистыми» – вкрапленными во вмещающих породах. Залежи богатых руд делятся на: крупнейшие (площадь свыше 2 км²); крупные (более 0,5 км²); средние (до 0,5 км²) и отдельные мелкие тела, линзы и жилы.

Богатые руды представляют собой сплошные сульфидные массы, заполняющие трещинные полости в подошвенной части интрузива и зоны его расщепления – жильные или оруденелые породы, окаймляющие сплошные сульфиды. Контакт богатых руд, как с вмещающими породами, так и с вкрапленными и «медистыми» рудами – резкий и устанавливается визуально по геологическим границам в процессе геологической документации

керна скважин и подземных горных выработок. Все скопления богатых руд Северных флангов Талнахского рудного узла представляют собой крупные геологические образования, а также часто проявляются в виде отдельных мелких тел (линз), вскрытых одиночными скважинами и имеющих мощность, превышающую минимальную промышленную вдвое и более. «В целом под качеством руды, следует понимать – совокупность свойств руды (содержание полезных компонентов, гранулометрический состав, примеси, влажность, кусковатость и др.) определяющих степень ее пригодности для дальнейшей переработки, согласно требованиям рынка. Качество руды, выдаваемой из рудника, формируется в результате совокупного влияния большого числа факторов: геологических (природных), технологических, информационных, организационно – технических и экономических (табл. 1)» [7, стр. 6].

Выделение нерешенных ранее частей общей проблемы. Увеличение содержания никеля в богатой медно-никелевой руде, поступающей на обогащение с 0,8 до 4,6% приводит к повышению извлечения металла с 52,4 до 79% и увеличению выхода никелевого концентрата с 5 до 15,5%, и сопровождается увеличением относительного размаха изменений содержания никеля в рудопеке в 3...4 раза и более [8].

Цель статьи. Геологическая изменчивость показателей в объеме рудного тела является первопричиной колебания качества добытой руды. Величина изменчивости может варьировать в очень широких пределах, в зависимости от типа полезного ископаемого, а также от условий его залегания в недрах. Наибольшее значение при этом имеет общий уровень содержания компонентов и сложность формы рудного тела.

Таблица 1

Факторы, формирующие качество руды при добыче

№№ п.п.	Наименование факторов
<i>Геологические (природные)</i>	
1	Изменчивость показателей качества в рудном массиве
2	Средний уровень содержания металла в запасах руды
3	Наличие включений пустых пород в рудном теле
4	Наличие в руде вредных примесей
5	Физико-технические свойства руд и вмещающих горных пород
6	Условия залегания рудных тел
7	Наличие явления гранулометрической сегрегации
<i>Технологические</i>	
8	Эксплуатационные границы залежи (по бортовому содержанию металла в руде)

9	Последовательность и порядок отработки залежи
10	Способ вскрытия и подготовки залежи
11	Соотношение объемов добычи разнокачественных руд
12	Системы разработки и их параметры
13	Способ отбойки руды и параметры буровзрывных работ
14	Способ доставки руды
15	Наличие, тип и параметры рудоспусков
16	Крупность рудной массы
17	Потери и разубоживание руды
18	Наличие подземного механического дробления руды, рудосортировки и грохочения
	<i>Информационные</i>
19	Объем представительности пробы
20	Частота опробования
21	Способ опробования руды
22	Наличие оперативного управления добычными работами и транспортом руды в режиме стабилизации качества
	<i>Организационно - технические</i>
23	Порядок ведения процессов очистной выемки
24	Наличие и тип смесительных систем в руднике и на его поверхности
25	Параметры сосудов транспортного оборудования
26	Режим выпуска руды из очистного пространства
27	Наличие раздельной выемки руды
28	Число действующих очистных забоев и выпускных выработок
29	Наличие концентрационного горизонта
30	Система оплаты добычных работ
31	Производительность добычных забоев
32	Состав и уровень требований к добытой руде
	<i>Экономические</i>
33	Себестоимость добычи и переработки руды
34	Ценность руды
35	Требования кондиций
36	Цена на товарную руду и концентрат
37	Форма стимулирования за качество добытой руды

Изложение основного материала. С целью прогнозирования качества горных работ и ожидаемого содержания руд при подземной добыче в работе были выполнены исследования по изучению геологической изменчивости качества руд при разработке Северной залежи С-2

Октябрьского месторождения и оценки сложности ее залегания. В качестве исходных материалов были использованы материалы эксплуатационной разведки и исходные данные ГГИС Micromine (план залежи, панель № 11,12,13,14, профили участка месторождения) (рис.1) [11].

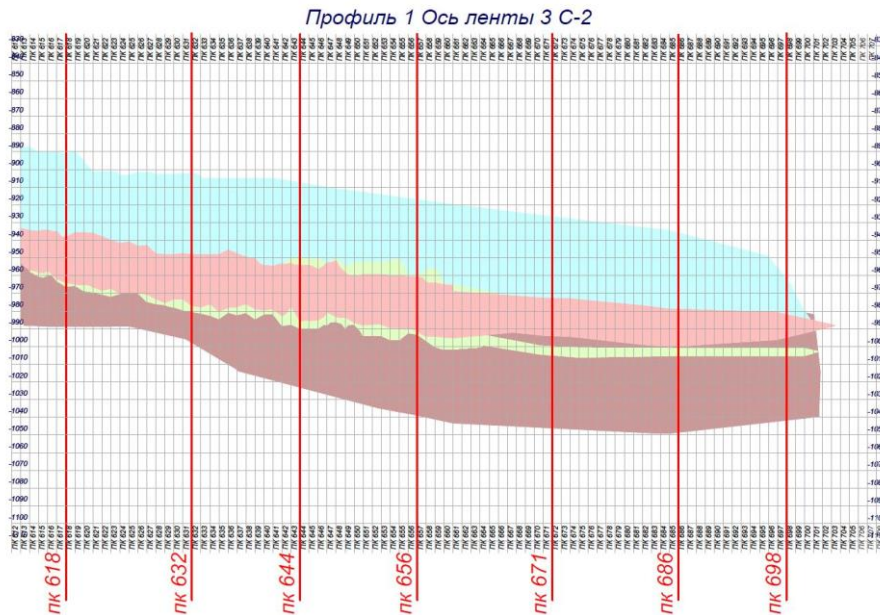


Рисунок 1. Профильный разрез №1 плана панелей 11,12,13,14 залежи С-2, обрабатываемой рудником «Скалистый»

Установив геометрические условия залежи С-2 богатых руд, используя программу AutoCAD определяли сложность залегания залежи с помощью показателя сложности залегания рудного тела, который учитывает криволинейную форму контактов и его размеров Δ , который определяется из соотношения суммарных площадей контактов $\sum S$ и объёмов $\sum V$ [9]:

$$\Delta = \frac{\sum S}{\sum V}, \frac{M^2}{M^3} \text{ или } M^{-1}. \quad (1)$$

Сложность залегания в плоскости сечения плана (разреза) устанавливается по соотношению суммарной длины контакта $\sum l$ и общей площади рудного тела $\sum S$ на плане (разрезе) с учётом масштаба чертежей, т.е.

$$\Delta' = \frac{\sum l}{\sum S}, \frac{M}{M^2}, \text{ или } M^{-1} \quad (2)$$

Таким образом, критерием сложности залегания рудного тела является относительная длина его контакта с вмещающими породами: чем

длиннее суммарная линия контура, тем труднее обеспечить при добыче малые потери и разубоживание руды [10].

В качестве исходных материалов были взяты данные геологической разведки, которая выполнялась на основании бурения 7 скважин через 40-90 метров по рудной залежи С-2, а также геологические разрезы (профили) и погоризонтные планы месторождения. Полученные данные сведены в таблицу 1, согласно которой определен общий показатель сложности залегания λ по рудной залежи богатых руд.

В результате вычислений показатель сложности залегания рудной залежи С-2 оставил: по ленте 3 0,04362738; по ленте 12 - 0,0461675; по ленте 23 - 0,04311467; по ленте 32 - 0,05489783; по ленте 41 - 0,24873634. В целом среднее значение показателя сложности залегания залежи «С-2» в приделах границ панелей составил 0,072. По результатам химического анализа размах колебаний по профильным сечениям составил: 1,31...2,94% по никелю и 0,72...2,49% по меди. В свою очередь среднее квадратичное отклонение по никелю 0,87%; по меди 0,60%, а средний коэффициент вариации по никелю и меди соответственно 38,6 % и 20,4%.

Таблица 1

Данные профильных значений показателя сложности

Профиль 1, пикет 644 лента 3					
Участок	λ	l, м	mxh, м	h, м	m, м
1	0,0383272	297,1535	7753,082	70	25,5
2	0,0401152	272,0904	6782,7344	60	29
3	0,0376405	280,9204	7463,2492	65	31
4	0,0425617	312,8127	7349,6279	75	30
5	0,0467325	281,3066	6019,5107	70	21
6	0,0563873	240,8985	4272,2086	60	21
Общий по профилю	0,04362738	1685,182	39640,413		

Подсчет среднеквадратичного отклонения содержания Ni и Cu в руде, поступающей, выполняли по формуле:

$$\delta = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\alpha_i - \bar{\alpha})^2}{n-1}} \quad (3)$$

где α_i – содержание металла в рассматриваемой пробе; $\bar{\alpha}$ – среднее содержание металла по горизонтам; n- число проб.

В свою очередь абсолютные значения коэффициентов вариации находили из выражения:

$$v = \frac{\delta}{\bar{\alpha}} 100\% \quad (4)$$

где δ –среднеквадратичное отклонение по горизонтам в партии;

$\bar{\alpha}$ – среднее содержание металлов в партии по горизонтам.

Статистические показатели по профильным сечениям представлены в таблице 2.

Таблица 2

Статистические показатели по профильным сечениям

Показатели качества	Профили				
	1	2	3	4	5
Среднеквадратичное отклонение, Ni	0,60	0,90	0,75	1,12	0,99
Коэффициент вариации, Ni	0,13	0,25	0,22	0,59	0,69
Среднеквадратичное отклонение, Cu	0,48	0,68	0,26	1,01	0,56
Коэффициент вариации, Cu	0,12	0,18	0,08	0,41	0,23

Характер неоднородности природной изменчивости качества в рудном массиве прослеживается на рисунке 3.

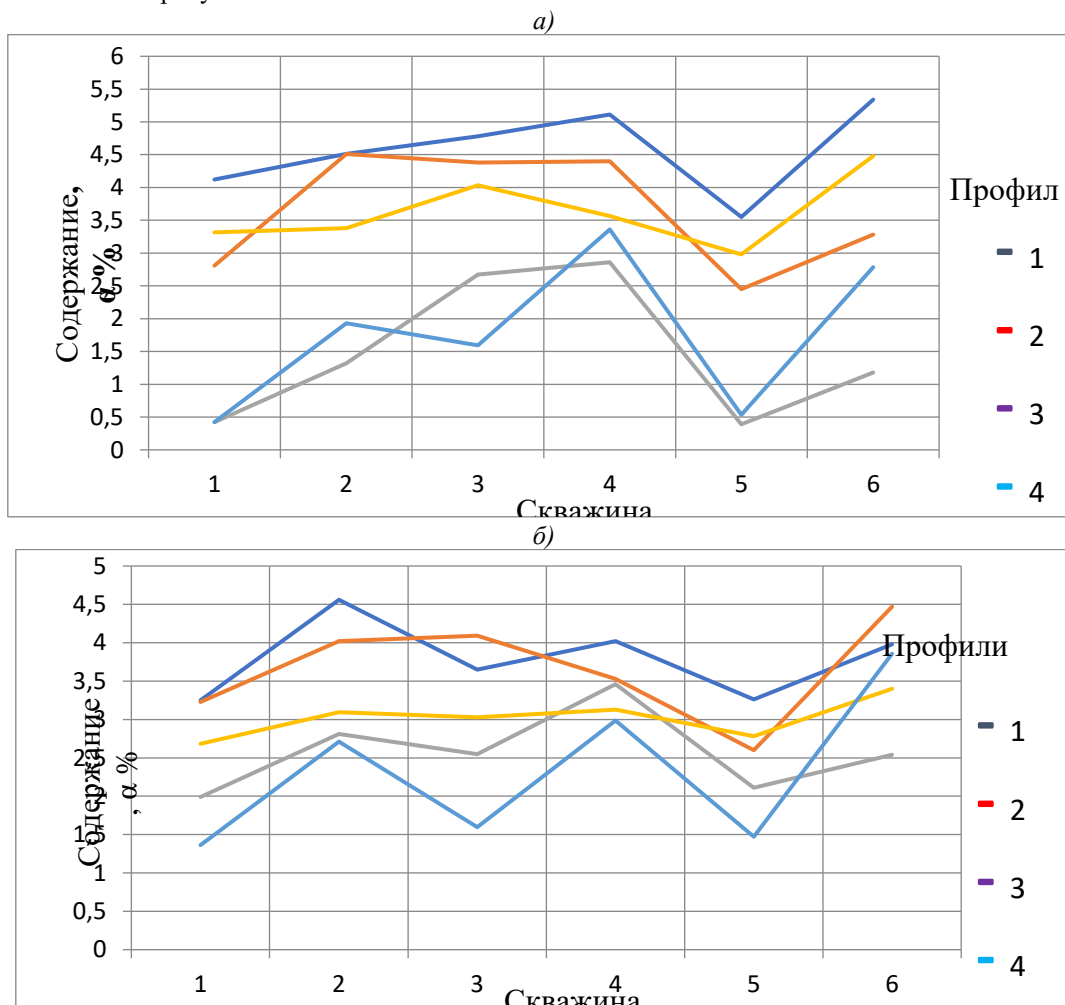


Рисунок 3. Распределение содержания металлов в недрах залежи С-2 по профильным сечениям: а) по никелю; б) по меди

Выводы и предложения. Согласно исследованиям среднеквадратичное отклонение содержания металлов в теле залежи С-2 составляет 0,26...1,12 %, а коэффициент вариации - 8...69 %. В результате исследований в работе установлено, что размах колебаний по профильным сечениям составляет соответственно 0,72 и 2,94% или в относительных величинах изменения составляют в 1,5 и 3,1 раза.

Таким образом, рудная залежь богатых медно-никелевых руд С-2 по уровню природной изменчивости качества медно-никелевых руд относится к числу сложных с позиции обеспечения стабильности вещественного состава добытой рудной массы, для достижения чего требуется применение наиболее глубоких технологий для управления качеством руд при добыче непосредственно на руднике.

В целом показатель λ может быть использован как для оценки сложности залегания всего рудного месторождения, так и для сравнения изменения условий залегания внутри одного участка месторождения в процессе ведения горных работ. Полученные данные необходимо рассматривать как ориентировочные, однако, результаты исследования необходимо учитывать при разработке рудных залежей Талнахского рудного узла, имеющих сложный качественный характер.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Батугина Н. С., Гаврилов В. Л., Ткач С. М. Погрешность изменения прибыли горного предприятия при разработке сложноструктурного месторождения // Горный журнал. — 2018. — № 12. — С. 26—30;
2. Ломоносов Г. Г. Производственные процессы подземной разработки рудных месторождений: монография. — М.: Изд-во «Горная книга», 2013. — 512 с.;
3. Павлишина Д. Н., Шумилов П. А., Терещенко С. В. Разработка программного модуля «Управление качеством руды» / Сборник научных трудов КФ Петр ГУ. — Апатиты, 2015. — С. 27—30;

УДК 553.98
ГРНТИ 438.35.19:

4. Терещенко С. В., Марчевская В. В., Черноусенко Е. В., Павлишина Д. Н., Рухленко Е. Д. Исследования по приоритетным направлениям переработки минерального сырья // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2015. — № 6. — С. 105—112;

5. Туртыгина Н. А., Мирошникова Л. К., Волков Н. А., Карпенко И. О. Перспективный метод прогнозирования и поиска сформировавшихся норильских месторождений с целью управления качеством добытых руд // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2016. — № 2. — С. 313—318;

6. Туртыгина Н. А., Охрименко А. В. Количественная оценка природной изменчивости качества медистых руд, залегающих в кровле интрузива // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2019. — № 8. — С. 146—156;

7. Туртыгина Н.А., Охрименко А. В. Характеризация качества руд при добыче на руднике «Комсомольский» // Научный вестник Арктики. — 2021 г. - №10. - С. 5 — 14;

8. Changik H., Ende W., Jianming X., Sunggi Y. Application of Multi-Gene Genetic Programming in Kriging Interpolation // Journal of Geoscience and Environment Protection, 2015, Vol. 3, no 5, pp. 27—34;

9. Pitombo C. S., Da Costa A. S. G., Salgueiro A. R. Proposal of a Sequential Method for Spatial Interpolation of Mode Choice // Boletim de Ciências Geodésicas, 2015, Vol. 21, no 2, pp. 274—289;

10. Poniewierski J. Negatively Geared Ore Reserves — A Major Peril of the Break-even Cutoff Grade / Good Practice and Communication: proceedings AusIMM Project Evaluation Conference, 8—9 March 2016. Carlton South: The Australasian Institute of Mining and Metallurgy, 2016. pp. 236—247;

11. Oggeri C., Oreste P. Underground Quarrying for Marble: Stability Assessment through Modelling and Monitoring // International Journal of Mining Science (IJMS), 2015, Vol. 1, no 1, pp. 35—42.

Cheremisska O.M.

PhD of Geology,

Institute of Geology and Geochemistry of Combustible Minerals of NASU

Petruniak G.M.

Member of Ukrainian Geological Community

Cheremissky Yu. V.

Engineer,

Institute of Geology and Geochemistry of Combustible Minerals NASU

Petruniak M.D.

Member of Ukrainian Mineralogical Community

METASOMATIC CHANGES IN ROCKS OF SEDIMENTARY COMPLEXES IN THE CARPATHIAN OIL AND GAS PROVINCE AS AN INDICATOR OF CARBOHYDRATE MIGRATION

Черемиская Оксана Мирославовна

кандидат геологических наук,

Институт геологии и геохимии полезных ископаемых НАН Украины

Петруняк Галина Мирославовна

член Украинского геологического сообщества

Черемиский Юрий Васильевич

инженер,

Институт геологии и геохимии полезных ископаемых НАН Украины

Петруняк Мирослав Дмитриевич

член Украинского минералогического сообщества

МЕТАСОМАТИЧЕСКИЕ ИЗМЕНЕНИЯ В ПОРОДАХ ОСАДОЧНЫХ КОМПЛЕКСОВ В КАРПАТСКОЙ НЕФТЕГАЗОНОСНОЙ ПРОВИНЦИИ КАК ИНДИКАТОР МИГРАЦИИ УГЛЕВОДОРОДОВ

DOI: 10.31618/ESSA.2782-1994.2021.2.75.155

Summary. A field and laboratory investigation of sedimentary rocks in Carpathian oil and gas province was carried out. The theoretical and practical aspects of the peculiarities of the development of metasomatic process during the migration of fluids at the postsedimentation stage of rock formation were investigated. Based on detailed field researches, a consistent pattern of mineral aggregates' and their crystalloid individuals developing was defined. The arguments for developing a new geochemical model of oil deposits indication in Carpathian oil and gas province were provided.

Аннотация. Проведено полевое и лабораторное исследование осадочных пород в Карпатской нефтегазоносной провинции. Исследованы теоретические и практические аспекты особенностей развития процесса метасоматоза при миграции флюидов на постседиментационной стадии формирования пород. На основе детальных полевых наблюдений установлена закономерность развития явлений развития минеральных агрегатов и их кристаллических индивидов с участием углеводородов. Приведены основания для построения новой геохимической модели индикации нефтяных залежей в Карпатской нефтегазоносной провинции.

Key words: Carpathian oil and gas province, oil, salt, metasomatic process, geochemistry of mineragenesis.

Ключевые слова: Карпатская нефтегазоносная провинция, нефть, соль, метасоматоз, геохимия минерогенеза.

Постановка проблемы. Изменения пород на стадии постседиментационных преобразований может свидетельствовать об изменениях показателей геохимической среды. Минералы, образующиеся в трещинах и на поверхностях пород, являются индикаторами процессов миграции флюидов разных составов, начиная от солевых растворов, заканчивая углеводородами. Комплексный подход к изучению вторичного минералообразования с учетом структурных, литологических, геохимических, петрографических, фациальных и климатических факторов позволяет рассматривать процесс метасоматических изменений как индикатор залежей рудных и нерудных полезных ископаемых на территории Карпатской нефтегазоносной провинции.

Структурные единицы покровов Украинских Карпат построены осадочными комплексами пород мелово-неогенового возраста и сорваны со своей основы с амплитудой горизонтального перемещения. Мармарошское кристаллическое выступление Внутренних Карпат смещено около 18 км. Предполагается, что амплитуда смещения отдельных тектонических единиц Внешних Карпат более 30 км, а Самборского покрова Предкарпатского прогиба до 20 км. В то же время считается, что Внешняя (Бильче-Вольцкая) зона залегает без смещений на основе Волыно-Подольской плиты Восточно-Европейской

платформы. Глубоким бурением обнаружены пологие надвигающиеся кембрийские породы на силурийские в фундаменте Карпат.

Полевое изучение, помимо общих признаков тектонических преобразований, способствовало нам обратить внимание на полуцилиндрические отделения, S-образные деформации кручения, горизонтальные плоскости смещения в толщах отложений вертикального залегания и других особенностей. Вот почему рассмотрение структурного контроля поверхностных выходов нефти и минералообразования нами производится с соблюдением генетических принципов геодинамических процессов и основ структурной геологии [7, 15].

Анализ последних исследований и публикаций. Наружные Карпаты и Самборский покров Предкарпатского прогиба характеризуются линейным протяжением тектонических единиц с залеганием пород в нормальном, опрокинутом, вертикальном состоянии. Во фронтальных частях надвигающихся пород соединены в мелкие складки. На дневной поверхности в коренных выходах обнаруживается мозаичное строение структурных элементов, определенное значительным количеством поперечных разломов и второстепенных плоскостей надвигающихся.

Однако сколько раз не обследовались бы нами знакомые геологические объекты, постоянно обнаруживаются детали геологических

осложнений, литолого-фациальной изменчивости, минералообразования, метасоматоза, признаки миграции флюидов, рассолов и углеводородов [15, 8, 18, 12].

На основании модельных экспериментов изучение массопереноса нефти газом выявлены особенности состояния флюидов в условиях высоких давлений и температур. Установлено, что чрезмерно сжатый газ растворяет все компоненты нефти, образуя однофазную систему, обладающую огромной энергией прорыва. Прорыв и движение ее вверх, в зоны более низких давлений и температур, сопровождается ретроградной ступенчатой конденсацией и дифференциацией всех компонентов системы в обратной растворимости в газе последовательности [6].

Вышеприведенное позволило отвергнуть ряд заимствованных и собственных рабочих гипотез в выборе рационального направления дальнейших исследований [13, 16]. Особое внимание привлек факт, что над крупными нефтяными резервуарами мощные глинистые покрывки раздроблены, а также имеют признаки термального, метасоматического замещения, механического и импрегнационного воздействия на них флюидов [1].

В Карпатах описаны проявления сульфатного, карбонатного и кремнезёмового инфильтрационного метасоматоза, которые обнаружены в керне разных глубин нефтяных залежей [18]. Также установлено, что процесс эксплуатации нефтяных месторождений сопровождается деформационно-метасоматическими замещениями [3]. Лабораторным моделированием подтверждено, что с понижением пластового давления действительно происходят деформации в образцах керна разных глубин [19].

Выделение нерешенных ранее частей общей проблемы. В настоящее время при решении проблемных вопросов нефтеносности Карпат придается особое значение исследованиям кварца типа мармарошского «бриллианта» и ореолов его распространения [11].

В Внешних Карпатах во главе надвигающихся структурных субэлементов Черногорского, Силезского, Скибового и Бориславо-Покутского покровов отложения мела иссечены бессистемными и кливажными трещинами, заполненными жильным кальцитом без признаков рудной минерализации или присутствия углеводородов.

Плоскость надвига между Черногорским и Силезским покровами отмечается значительным развитием прожилок белого кальцита, который в редких случаях розово окрашен от присутствующих в нем люминесцентных углеводородов (с. Ясиня). И только севернее нефтяного месторождения Стебный в кальцитовых прожилках переходной пачки появляются мелкие кристаллы «бриллиантов».

На этом месторождении, среди собранных в бессистемные складки пород кросненской свиты в русле потока Стебный, наблюдается пласт плотного карбонатного алевролита, в который проникает нефть по внутренней поверхности расслоения [14].

Длительный процесс подобного проникновения нефти в ряде других обнажений приводит к внутреннему раздуванию пластов по наслоению под влиянием кристаллизационной силы роста минералов и проникновением нефти. Подобные соотношения отчетливо прослеживаются в Гукливом на склоне правого борта г. Вича. Аналогичные выделения минералов и нефти сохраняются в отдельных пластах Голятинского поднятия и кое-где на отдаленные в Силезском покрове.

В Гукливом сначала наше внимание привлекли кристаллы мармарошских «бриллиантов». Их размеры достигают 6 мм, блочного строения, оптически неоднородные, находящиеся среди кальцитовой массы в кайме твердых битумов, с дисперсными включениями нефти по зонам роста (рис. 1 а, б). Образуют двойники, часто вмещающие меньшие по размерам кристаллы кварца, грани которых дают дополнительные блики в световой гамме материнского кристалла.

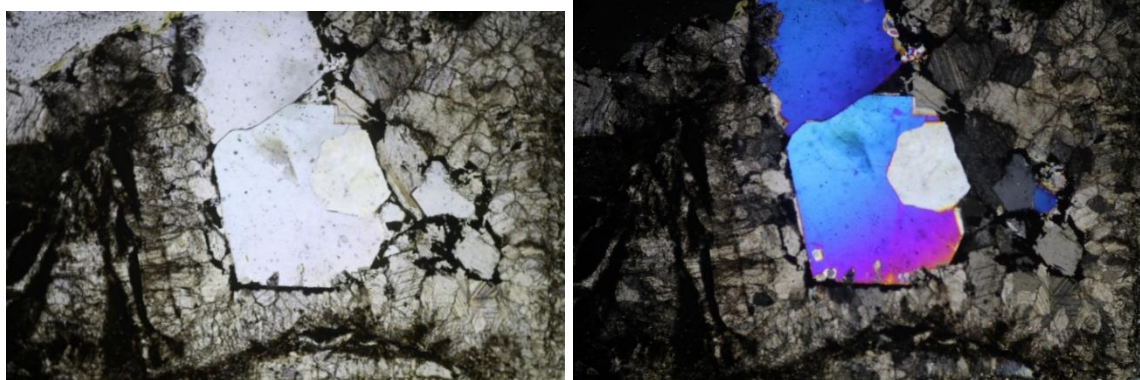


Рис. 1. Кристалл мармарошского «бриллианта» в зернистой кальцитовой массе прожилка в песчанике. Переходная пачка пород от менилитовой свиты до отложений кросненской свиты. Оligоцен. Поток Стебный, правая притока р. Лазецина. Месторождение нефти Стебный, возле с. Ясиня. Увеличено в 30 раз, (а) в сквозном свете, (б) при скрещенных николях.

В ходе очередного обзора выявлено, что соотношение между минералами намного сложнее. С первоначальным проникновением нефти поверхности покрывались тяжелыми компонентами нефти, а вслед из флюидов кристаллизовался кальцит, масса которого содержит единичные черные кристаллы мармарошских «бриллиантов». Очевидно, именно в таких кристаллах диагностирован антраксолит [9]. Выделение антраксолита обнаружено и в породах газоконденсатного месторождения Шебелинки [4]. Вероятно, образование этого минерала связано с проявлением какой-либо формы углеродного метасоматоза. Ведь доказано, что углеродное вещество в породах и рудах бывает представлено рядом керита – оксикерита – антраксолита – шунгита – графита, развитие которых нередко прослеживается в пределах одного шлифа. [5].

В следующую стадию кристаллизовались типичные мармарошские «бриллианты», а в заключительную кое-где кристаллизовался кварц с совершенным развитием ромбоэдров. Кальцитовая масса в их субстрате и пространство между кристаллами позднего кварца выполнены углеграфитовой массой и фуллеренами.

Ореолы развития «бриллиантов» охватывают территорию Голятинского поднятия и Силезского покрова подробно изучались многими

исследователями как важный показатель нефтеносности [11].

На нефтяном месторождении Слобода Рунгурская фирмой СП «Дельта» земляными работами открыты условия залегания зеленовато-серых глин быстрицкой свиты верхнего эоцена, вмещающие тонкие, насыщенные нефтью прослойки песчаников, алевролитов и карбонатных конкреций. Во внутренней плотной массе последних находятся хорошо ограненные «бриллианты».

На месторождении с отсутствующими коллекторскими свойствами площадью 48 га добыто около 1 млн тонн нефти. Отложения илитовых глин быстрицкой свиты на месторождении Слободы Рунгурского наклонного залегания (около 30°), очевидно, с юго-запада, что способствовало в прослойках последовательному образованию в трещинах кальцита первого поколения с последующей кристаллизацией «бриллиантов». В глинах свиты нефть отсутствует.

В процессе добычи нефти прослойки подверглись деструктивному дроблению с образованием брекчии перемешанных обломков сцементированных кремнисто-карбонатной массой, а высвободившееся пространство заполнилось кальцитом последней второй генерации (рис. 2), что является не чем иным как проявлением деформационно-метасоматического замещения [3].

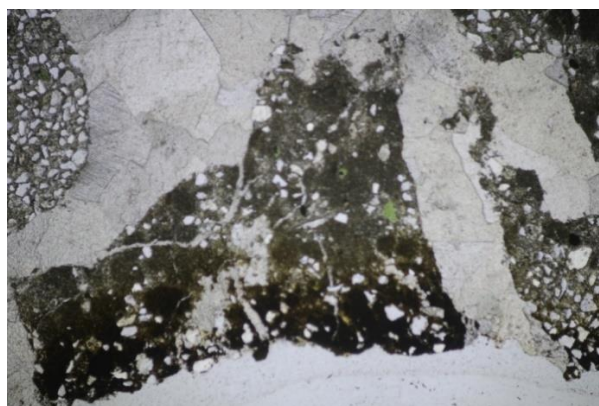


Рис. 2. Шлиф из алевролита с остаточной нефтью, обломки которого соединены между собой прожилками кальцита. Быстрицкая свита верхнего эоцена. Месторождение нефти Слобода Рунгурская. Увеличено в 20 раз.

При прокладке тоннеля «Бескид» наше внимание привлекли расчлененные прожилки между плоскостями скольжения, содержащими кальцит и кварц-«бриллиант», залитых флюорисцентной нефтью [13]. В шлифах наблюдаем другую особенность распределения тяжелых углеводородов в клиновидных прожилках, от подошвы пересекающих алевролиты под острым углом. Одни сначала заполнялись углеводородами и более поздним кальцитом, а в других рядом размещенных в пределах шлифа – наоборот. [13]

В отобранных образцах кальцита, доломита, арагонита, гипса, целестина термическим анализом на кривых дифференциального нагревания только в гипсе катагенетических прожилков стембникской свиты неогена и образцах гипсовой формации Вольно-Подольской плиты наблюдаются небольшие экзопиксы (рис. 3). В минералах, окрашенных от черного до белого, люминесцентным анализом подтверждено наличие углеводородов [14].

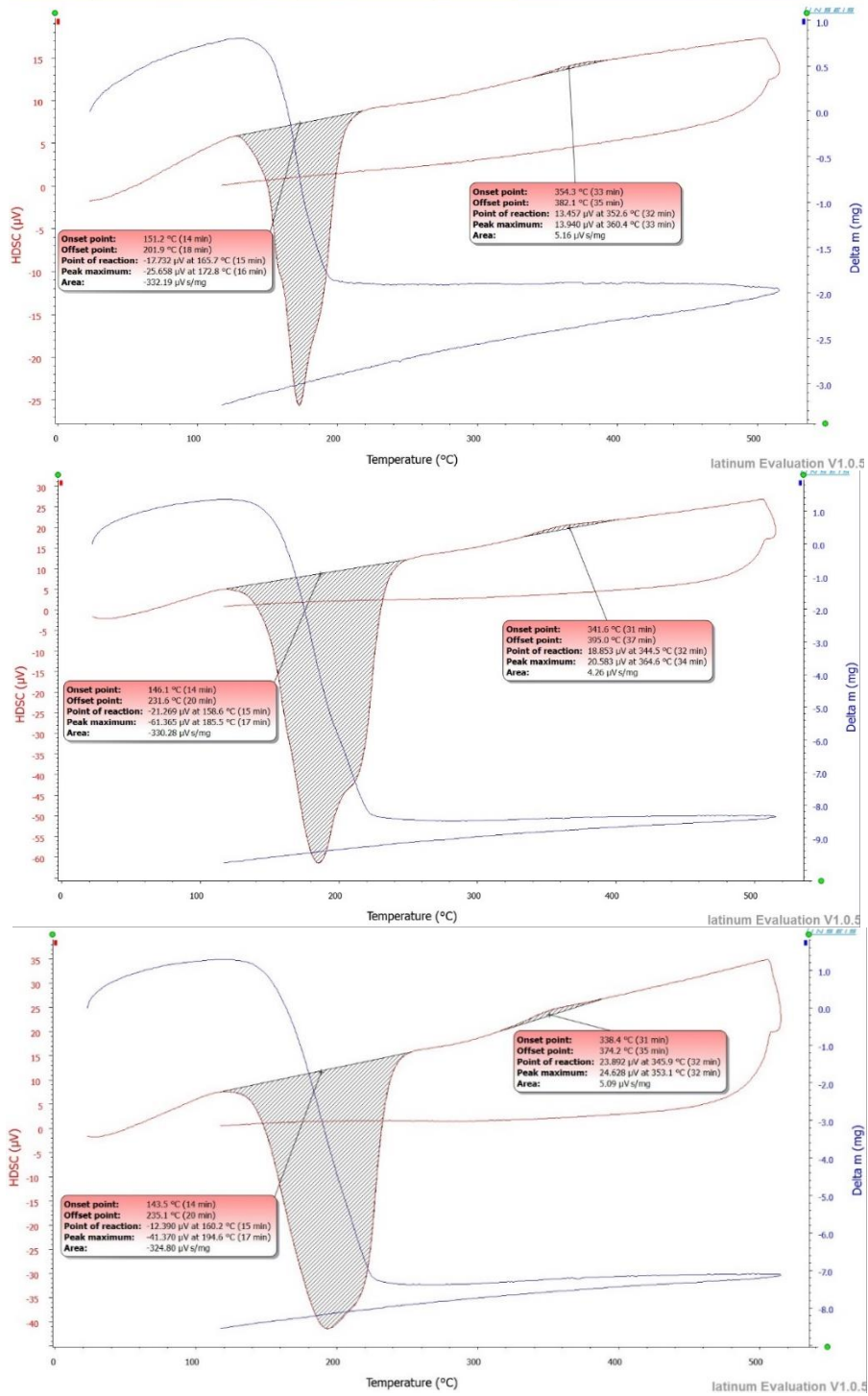


Рис. 3. Кривые дифференциального нагрева образцов гипса катагенетических прожилков стибникской свиты неогена.

Ряд последовательно выделенных минералов нарушается в зависимости от первичного состава породы, что отображает приоритетное развитие

минералов кремнезема или исключительно кальцита (рис. 4).



Рис. 4. (а) Строение инкрустации кварца на доломитовой основе, обогащенной тяжёлыми углеводородами. Карбонатное образование. Правый берег р. Прут, пгт. Делятин. (б) Обогащенная нефтью кальцит-доломитовая инкрустация, разбитая снизу эпигенетическим прожилком кальцита с отсутствующими углеводородами. Карбонатное образование в горизонте бориславского песчаника эоцен-олигоценового возраста. Река Пистинка, с. Шешори.

Морфологические признаки инкрустаций не являются основанием для определения закономерности их развития в массе породы.

Цель статьи. Из квинтесцентных источников узнаем, что метасоматоз проявляется в самых разных геологических процессах, в том числе при седиментогенезе (сингенез – диагенез – катагенез – гипергенез) [2].

Функциональная система метасоматоза рассматривается как саморегулирующаяся, комбинационного развития с разнотипной зональностью макросистем. Метасоматические сорбционно-адгезионные, массо- и энергообъемные процессы оставляют свои следы как в строении всей апосомной зоны, так и в сложившихся пределах сложных и простых апосом и метасоматитов. Происходит пуск и самоотбор, энергетическая минимизация энергетически выгодных процессов в таких динамических системах [17].

Метасоматические замещения рассмотрены на примерах значительного количества химических реакций при различных термодинамических условиях магматизма и метаморфизма. В областях активного вулканизма, где по условиям образования выделены две метасоматические группы:

1. Взаимодействие газов с породой (ральстонит $\text{NaAl}_3\text{MgF}_8(\text{OH})_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$, флюорит CaF_2).
2. Взаимодействие конденсатов с породой (гипс, галотрихит, пиккерингит, алуноген, квасцы, мелантерит $\text{Fe}[\text{SO}_4] \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, алунит).

Иногда массоперенос сопровождается плюмами нефти [10]. В нефтегазоносных провинциях взаимодействие флюидов и нефти несколько отличное и доступное для изучения в застывших, действующих природных и техногенных поверхностных проявлениях, относимых к разряду помарок (rockmarks). В Карпатах их связь в 3D пространстве настолько сложна, что может быть определена только с

соблюдением генетических принципов геодинамики [7].

На основании исследования проявлений метасоматических замещений и аномального развития минеральных агрегатов и их кристаллических индивидов с участием углеводородов основаны для построения новой геохимической модели индикации нефтяных залежей.

Изложение основного материала. Впервые кварц-карбонатный, карбонатный и сульфатный метасоматоз изучался в керне нефтяных месторождений Карпат, проявления которого связываются с восходящей инфильтрацией глубинных флюидов, а с метасоматическим замещением пластов песчаников кварцем и халцедоном связывалось по горизонтали. Развитие последнего нами рассматривается в зависимости от присутствующего во флюидах подвижного Ca^{+2} органического вещества и углеводородов $\text{C}_{\text{орг}}$ [11]. В пестроцветных отложениях наблюдаем метасоматически замещенные форамениферы кварцином, глауконитом, родохрозитом, марказитом.

В особых геологических ситуациях с миграцией флюидных потоков кристаллизовались органические и неорганические минералы, что однозначно относилось к проявлению углеводородно-минерального метасоматоза [13]. Но основания для выделения чисто углеводородного метасоматоза остаются неопределенными.

Аутометасоматоз. В подсолевой вулканогенно-осадочной толще стебельской свиты обнаружены калистронцит, минералы бора, монтмориллонит, цеолиты, кристаллы ангидрита, гипс и другие минералы. В Самборском покрове Предкарпатского прогиба цеолиты и гипс постоянно вмещают в себя углеводороды, которые определяют их буровато-медовую окраску, повышенное двупреломление и люминесцентность (рис. 5).



Рис. 5. Выделение цеолитов в алевро-песчаниках. Бурый окрас цеолитов определяется присутствие углеводов. Стебникская свита неогена. Поток Дубовой, пгт. Яблунув. Увеличено в 50 раз.

В гипсе это связано с диффузией углеводородов по спайности, а в цеолитах с канальной диффузией на кристаллохимическом уровне. Отметим, что в вмещающей среде и пластах монтмориллонитовых глин углеводороды отсутствуют полностью.

В значительно больших масштабах диффузное проникновение нефти и флюидов в пластах песчаников вызывает своеобразную регенерацию обломочного кварца как это наблюдается во вторичных кварцитах Казахстана.

В застывших и действующих поверхностных нефтепроявлениях наблюдаем, что на своем пути миграция нефти сопровождается минералообразованием, а в исключительных условиях аморфными выделениями углеводородов в ассоциации с их кристаллическим состоянием. В общем, развитие минеральных ассоциаций находится в постоянной зависимости от состава вмещающих пород.

При формировании нефтяных залежей растет аномально высокое давление, вызывающее своеобразные разномасштабные разрывные деформации (high-pressure-structure), требующие более тщательного изучения. В Карпатах это нельзя приблизительно рассматривать на примере развития наиболее распространенного кальцита и кварца-«бриллианта».

Между тем на месторождении Слобода Рунгурска выявлены последствия взаимодействия

нефти и флюидов с породами при формировании залежей. Исчерпание залежей нефти сопровождалось образованием брекчий деструктивного дробления сцементированных кремнисто-карбонатной массой. Поверхности карбонатных стяжений покрыты тонкими корочками игольчатых агрегатов витерита BaCO_3 , в самой середине содержат хорошо ограненные кристаллы мармарошских «бриллиантов». Промежутки дробления заполнены кальцитом II-генерации, но не во всю полноту пространства растворения прослоек от первичного залегания [14]. Приведенные признаки относим к проявлению деформационных метасоматических замещений, сопровождающих нефтедобычу при эксплуатации всех без исключения месторождений нефтегазоносных провинций [3].

В естественно разрушенных до базиса эрозии залежах в пластах песчаников углеводороды небулярно рассеяны по всей массе породы, а поверхности наслаения сплошь насыщены тяжелыми нелюминесцентными углеводородами. Внутри масса песчаника с особенно типичной структурой «oil – pressure – texture». В антиклиналях Длинки и Побука обломочный кварц иссечен трещинами, которые выполнены вторичным кварцем, а в отдельных участках в пределах шлифа, замещенного кальцитом или глауконитом (рис. 6).

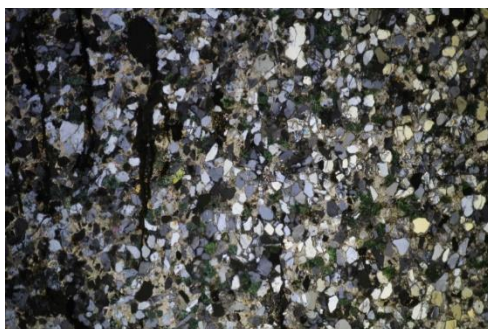


Рис. 6. Метасоматическое образование кварца в трещинах обломочного кварца песчаников. Антиклиналь Побук, менилитовая свита олигоцена, р. Опор, с. Верхнее Синевидное. Увеличено в 20 раз.

Метасоматоз зоны гипергенеза. Его развитие связано с исходной капиллярной пропиткой

рассолов из соленосных горизонтов в надвинутые отложения других формаций и нисходящим

проникновением вадозных осадков, в частности из-за толщи битуминозных отложений менилитовой свиты олигоценца.

В Самборском покрове по р. Прут (с. Ланчин) тектонический пакет медистых песчаников надвинут на соленосные неогеновые отложения стибникской свиты. Восходящая инфильтрация рассолов спровоцировала метасоматическое выщелачивание рудных компонентов и только в отдалении сохранилось гнездо минерализованной породы халькозином, борнитом, кальцитом, кофинитом, сафлоритом, кобальтином с присыпками глобулярных выделений розового лозеита. В редких случаях утечка рассолов на поверхность приводит к образованию уникальных травертинов. Резкие выступы насыщенных галитом пород в засушливый период покрываются тонкими корочками бишофита [16, 20, 21].

В поверхностных выступах менилитовой свиты развитие выцветов галотрихита в ассоциации мелантерита и ярозита, а их образование объясняется генерацией сульфат-иона SO_4^{2-} за счет окисления пирита [8].

Во время летней засухи 2015 года на отложениях менилитовой свиты в с. Шешоры нами опробованы розетки белых выцветов. Рентгенофазовым анализом установлена серия базальных отражений, принадлежащих алуногену – {97(5); 43 (10); 39,5, 30,5) нм}, галотрихита – {60,3(6); 47,9 (10); 42,1 (10); 35,0(10) нм}, бишофита – {41,0(8); 28,8(8); 27,5 (5); 26,7(8) нм} и слабо выраженными пиками мелантерита и алунита.

Отметим, что седиментогенное накопление К и Mg для отложений менилитовой свиты, как и вообще для формаций битуминозных сланцев, не свойственно, но в зоне гипергенеза эти два элемента отличаются высокой миграционной способностью, в определенной геохимической обстановке калий фиксируется в ярозите. Магний с более высокой растворимостью его сульфатов и хлоридов мигрирует через поровое пространство породы в выцветах. Развитие бишофита в ассоциации с галитом зафиксировано также на поверхности гребенчатых выступов песчаников менилитовых отложений Береговой ломти по р. Прут.

Исследования этого процесса (с. Верхнее Синевидное) показали, как происходит окисление пирита и частично органического вещества $S_{орг}$. Вследствие этого грунтовые воды подкисляются рН 2,0–4,5 и разрушаются гидрослюды и монтмориллонит. Как следствие высвободившиеся К, Al, Fe, Mg в присутствии сульфат-иона SO_4 формируют фиброферит, галотрихит, керамогалит (алуноген), мелантерит. Значительная часть этих сульфатов выносятся кроме ярозита и гипса [8]. Приведенный ряд, по-видимому, отражает последовательность образования этих минералов.

Обследование профиля крутого склона, составленного битуминозными отложениями менилитовой свиты (с. Подзахаричи), показало, что

в гипсометрически более высокой части ярозит в отложениях отсутствует. Вниз его содержание постепенно растёт и образует в породах обогащенную ярозитом полосу до высоты 4–5 м от уровня воды в р. Черемош. В низовьях этого стремительного склона породы непомерно обогащены ярозитом в виде желтой маркой массы. До высоты 1,5 м породы содержат значительное количество кристаллов мелантерита, который в песчаниках составляет густо переплетенные прожилки (1–19 мм). На контакте с проточной водой, обогащенной кислородом, образует стойкие корки, сложенные гидроксидами железа.

Выводы и предложения. Вышеприведенные результаты полевых и лабораторных исследований указывают на широкое развитие функциональной системы метасоматоза в зоне гипергенеза по всей территории Карпатского региона. Детальное изучение подобных процессов в нефтегазоносных провинциях позволяет нам утверждать, что в отвалах горнодобывающей промышленности происходит активное перераспределение химических элементов в масштабах хозяйственного значения.

Список литературы:

1. Аникиев К.А. Прогноз сверхвысоких пластовых давлений и совершенствования глубокого бурения на нефть и газ / К. А. Аникиев – 1971. – Л.: Недра – 166 с. [Anikiev K.A. Prognoz sverhvysokih plastovyh davlenij i sovershenstvovaniya glubokogo bureniya na neft' i gaz / K. A. Anikiev – 1971. – L.: Nedra – 166 s. (In Russ)]
2. Геологический словарь. Том 1 (А - М). Геологический словарь. Том 1 (А-М). Том 1, Издание 2. Редактор(ы): Криштофович А. Н. – 1978. М.: Недра, – 487 с. [Geologicheskij slovar'. Tom 1 (A - M). Geologicheskij slovar'. Tom 1 (A-M). Tom 1, Izdanie 2. Redaktor(y): Krishtofovich A. N. – 1978. M.: Nedra, – 487 s. (In Russ)]
3. Гладков Е. А., Ежова А. В., Алтунина Л. К., Кувшинов В. А., Родионова Н. А., Переверзнецов С. А., Гладкова Е. Е. Деформационно-метасоматические преобразования залежей углеводородов в процессе их разработки. / Е. А. Гладков, А. В. Ежова, Л. К. Алтунина, В. А. Кувшинов, Н. А. Родионова, С. А. Переверзнецов, Е. Е. Гладкова // ЛИТОСФЕРА. – 2013, №2. – С. 167–172. [Gladkov E. A., Ezhova A. V., Altunina L. K., Kuvshinov V. A., Rodionova N. A., Pereverzencev S. A., Gladkova E. E. Deformacionno-metasomaticheskie preobrazovaniya zalezhej uglevodorodov v processe ih razrabotki. / E. A. Gladkov, A. V. Ezhova, L. K. Altunina, V. A. Kuvshinov, N. A. Rodionova, S. A. Pereverzencev, E. E. Gladkova // LITOSFERA. – 2013, №2. – S. 167–172. (In Russ)]
4. Заріцький П. В. Антраксоліт у нижньопермських породах-колекторах Шебелинського газо-конденсатного родовища / П. В. Заріцький. // Записки Українського мінералогічного товариства. – 2007. – С. 73–76.

[Zaric'kyj P. V. Antraksolit u nyzhn'operms'kyh porodah-kolektorah Shebelyns'kogo gazo-kondensatnogo rodovyshha / P. V. Zaric'kyj. // Zapysky Ukrai'ns'kogo mineralogichnogo tovarystva. – 2007. – S. 73–76. (In Ukr)]

5. Иванкин П. Ф., Назарова Н. И. Проблема углеродистого метасоматоза и рассеяной металлоносности осадочно-метаморфических пород. / П. Ф. Иванкин, Н. И. Назарова // Советская геология. – 1984, №2. – С. 90–100. [Ivankin P. F., Nazarova N. I. Problema uglerodistogo metasomatoza i rassejanoj metallonosnosti osadochno-metamorficheskikh porod. / P. F. Ivankin, N. I. Nazarova // Sovetskaja geologija. – 1984, №2. – S. 90–100. (In Russ)]

6. Кордус В. И. Мотовилов П. И. Геохимическая модель высокотемпературного образования нефти и газа / В. И. Кордус П. И. Мотовилов // Сборник научных трудов, М.: Наука. – 1992. – С. 86–89. [Kordus V. I. Motovilov P. I. Geohimicheskaja model' vysokotemperaturnogo obrazovanija nefti i gaza / V. I. Kordus P. I. Motovilov // Sbornik nauchnyh trudov, M.: Nauka. – 1992. – S. 86–89. (In Russ)]

7. Крупський Ю.З. Геодинамічні умови формування і нафтогазоносність Карпатського та Волино-Подільського регіонів України. – К.: УкрГДРІ, 2001. – 144 с. [Krupsk'ij Ju.Z. Geodynamichni umovy formuvannja i naftogazonosnist' Karpats'kogo ta Volyno-Podil's'kogo regioniv Ukrai'ny. – K.: UkrGDRI, 2001. – 144 s. (In Ukr)]

8. Лазаренко Є. К., Габінет М. П., Сливко О. П. Мінералогія осадочних утворень Прикарпаття / Є. К. Лазаренко, М. П. Габінет, О. П. Сливко. — Львів: Вид-во Львів. Ун-ту, 1962. — 482 с. [Lazarenko Je. K., Gabinet M. P., Slyvko O. P. Mineralogija osadochnyh utvoren' Prykarpattja / Je. K. Lazarenko, M. P. Gabinet, O. P. Slyvko. — L'viv: Vydvo L'viv. Un-tu, 1962. — 482 s. (In Ukr)]

9. Мельников В. С., Возняк Д. К., Кульчицька Г. О. До умов утворення антраксоліту с. Нижні Ворота (Закарпаття). / В. С. Мельников, Д. К. Возняк, Г. О. Кульчицька. // Записки Українського мінералогічного товариства. – 2007. – С. 39–47. [Mel'nikov V. S., Voznjak D. K., Kul'chic'ka G. O. Do umov utvorennja antraksolitu s. Nizhni Vorota (Zakarpattja). / V. S. Mel'nikov, D. K. Voznjak, G. O. Kul'chic'ka. // Zapiski Ukraïns'kogo mineralogichnogo tovarystva. – 2007. – S. 39–47. (In Russ)]

10. Набоко С. И. Вулканические эксгалляции и продукты их реакций. / Тр. Лаборатории вулканологии, М.: Изд. АН СССР. – Вып. 16, 1959. – 304 с. [Naboko S. I. Vulkanicheskie jeksgaljacii i produkty ih reakcij. / Tr. Laboratorii vulkanologii, M.: Izd. AN SSSR. – Vyp. 16, 1959. – 304 s. (In Russ)]

11. Петруняк Г. М. Вуглеводні та геохімія мінеральних перетворень кремнезему в породах Українських Карпат / Г. М. Петруняк // Мін. зб. № 66. – Вип. 1. – 2016. – С. 142–151. [Petrunjak G. M. Vuglevodni ta geohimija mineral'nyh peretvoren' kremnezemu v porodah Ukrai'ns'kyh Karpat / G. M.

Petrunjak // Min. zb. № 66. – Vyp. 1. – 2016. – S. 142–151. (In Ukr)]

12. Петруняк, Г. М. Головні критерії нафтоносності "бориславського пісковика" / Г. М. Петруняк // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2016. – № 2. – С. 7–16. [Petrunjak, G. M. Golovni kryterii' naftonosnosti "boryslavs'kogo piskovyka" / G. M. Petrunjak // Rozvidka ta rozrobka naftovyh i gazovyh rodovyshh. – 2016. – № 2. – S. 7–16. (In Ukr)]

13. Петруняк Г. М. Углеводородно-минеральный метасоматоз Украинских Карпат / Вопросы естествознания. – Иркутск, 2016. – Вып. 1(9). – С. 60–69. [Petrunjak G. M. Uglevodorodno-mineral'nyj metasomatoz Ukrainskih Karpat / Voprosy estestvoznaniya. – Irkutsk, 2016. – Vyp. 1(9). – S. 60–69. (In Russ)]

14. Петруняк Г. М. Геолого-геохімічні передумови міграції нафти та мінерагенезу (Карпати) / Матеріали II Міжнародної наукової конференції «Геологія горючих копалин: досягнення та перспективи (6-8 вересня 2017 року). – Київ, 2017. – С. 118–122. [Petrunjak G. M. Geologo-geohimichni peredumovy migracii' nafty ta mineragenezu (Karpaty) / Materialy II Mizhnarodnoi' naukovoi' konferencii' «Geologija gorjuchyh kopalyn: dosjagennja ta perspektivu (6-8 veresnja 2017 roku). – Kyïv, 2017. – S. 118–122. (In Ukr)]

15. Петруняк Г. М., Черемисская О. М., Черемисский Ю. В., Петруняк М. Д. О наппизме, солёности и углеводородах Береговой скибы Карпат в районе Дилиятина / Г. М. Петруняк, О. М. Черемисская, Ю. В. Черемисский, М. Д. Петруняк // Сб. материалов конф. –Тула, 2015. – С. 203–212. [Petrunjak G. M., Cheremisskaja O. M., Cheremisskij Ju. V., Petrunjak M. D. O nappizme, solenosnosti i uglevodovodah Beregovoj skiby Karpat v rajone Diljatina / G. M. Petrunjak, O. M. Cheremisskaja, Ju. V. Cheremisskij, M. D. Petrunjak // Sb. materialov konf. –Tula, 2015. – S. 203–212. (In Russ)]

16. Петруняк Г.М., Петруняк М.Д. Углеводороды на границе раздела Земля-атмосфера. / Г. М. Петруняк, М. Д. Петруняк // Нефть и газ. – 2019. Вып. 6 (114). – С. 86–100. [Petrunjak G.M., Petrunjak M.D. Uglevodorody na granice razdela Zemlja-atmosfera. / G. M. Petrunjak, M. D. Petrunjak // Neft' i gaz. – 2019. Vyp. 6 (114). – S. 86–100. (In Russ)]

17. Поспелов Г. Л. Парадоксы геолого-физической сущности и механизма метасоматоза. / Г. Л. Поспелов // Новосибирск: Изд. «Наука» СО АН СССР, 1973. – 355 с. [Pospelov G. L. Paradoksy geologo-fizicheskoy sushhnosti i mehanizma metasomatoza. / G. L. Pospelov // Novosibirsk: Izd. «Nauka» SO AN SSSR, 1973. – 355 s. (In Russ)]

18. Рипун М. Б., Ткачук Л. Г. Про деякі аутигенні мінералоутворення в нафтових відкладах Передкарпаття / М. Б. Рипун, Л. Г. Ткачук // Геол. Журн. АН УРСР. – Т. XVIII, вип. 4. – 1958. – С. С. 108–115. [Rypun M. B., Tkachuk L. G. Pro dejaki autygenni mineraloutvorennja v naftovyh vidkladah Peredkarpattja / M. B. Rypun, L. G. Tkachuk // Geol.

Zhurn. AN URSS. – T. XVIII, vyp. 4. – 1958. – S. S. 108–115. (In Ukr)]

19. Тишков А. А. Проявление деформационных процессов при снижении пластового давления в залежах нефти Припятского прогиба / А. А. Тишков, О. К. Абрамович // Литосфера. – 2017. – № 1 (46). – С. 135–142. [Tishkov A. A. Projavlenie deformacionnyh processov pri snizhenii plastovogo davlenija v zalezah نفتи Pripjatskogo progiba / A. A. Tishkov, O. K. Abramovich // Litosfera. – 2017. – № 1 (46). – S. 135–142. (In Russ)]

20. Череміський Ю. В., Петруняк Г. М., Череміська О. М., Петруняк М. Д. Структурно-літологічний контроль метасоматозу поверхневих сольових та вуглеводневих проявів у Скибовій зоні Карпат і Передкарпатському прогині. / Ю. В. Череміський, Г. М. Петруняк, О. М. Череміська, М. Д. Петруняк // Матеріали Десятих наукових читань імені академіка Євгена Лазаренка. Львів. – 2016. – С. 105–107. [Cheremiss'kyj Ju. V., Petrunjak G. M., Cheremiss'ka O. M., Petrunjak M. D. Strukturno-litologichnyj kontrol' metasomatozu

poverhnevyyh sol'ovyh ta vuglevodnevyyh projaviv u Skybovij zoni Karpat i Peredkarpats'komu progyni. / Ju. V. Cheremiss'kyj, G. M. Petrunjak, O. M. Cheremiss'ka, M. D. Petrunjak // Materyaly Desjatyh naukovyyh chytan' imeni akademika Jevgena Lazarenka. L'viv. – 2016. – S. 105–107. (In Ukr)]

21. Череміська О. М., Череміський Ю. В., Петруняк Г. М., Петруняк М. Д. Структурно-літологічний контроль метасоматозу, поверхневих сольових і вуглеводневих проявів в Скибових Карпатах та Передкарпатському прогині / О. М. Череміська, Ю. В. Череміський, Г. М. Петруняк, М. Д. Петруняк // Wschodnioeuropejskie Czasopismo Naukowe (East European Scientific Journal). – №5(45). – 2019. – С. 4–9. [Cheremiss'ka O. M., Cheremiss'kyj Ju. V., Petrunjak G. M., Petrunjak M. D. Strukturno-litologichnyj kontrol' metasomatozu, poverhnevyyh sol'ovyh i vuglevodnevyyh projaviv v Skybovyh Karpatah ta Peredkarpats'komu progyni / O. M. Cheremiss'ka, Ju. V. Cheremiss'kyj, G. M. Petrunjak, M. D. Petrunjak // Wschodnioeuropejskie Czasopismo Naukowe (East European Scientific Journal). – №5(45). – 2019. – S. 4–9. (In Ukr)]

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

УДК 678.073:661.481
ГРНТИ 61.59.29

Avdeychik S.V.

*PhD in engineering, associate professor,
Leading Engineer, Molder LLC*

Antonov A.S.

*PhD in engineering, associate professor,
associate professor of the department of material science and resource-saving technologies
Yanka Kupala State University of Grodno*

Lesun A.N.

*PhD student,
Yanka Kupala State University of Grodno*

THE CONCEPT OF MULTI-LEVEL MODIFICATION IN THE TECHNOLOGY OF HIGHLY FILLED FLUOROCOMPOSITES

Авдейчик Сергей Валентинович

*кандидат технических наук, доцент,
ведущий инженер ООО «Молдер»*

Антонов Александр Сергеевич

*кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры материаловедения и ресурсосберегающих технологий,
Гродненский государственный университет имени Янки Купалы*

Лесун Александр Николаевич

*аспирант,
Гродненский государственный университет имени Янки Купалы*

КОНЦЕПТ МНОГОУРОВНЕВОГО МОДИФИЦИРОВАНИЯ В ТЕХНОЛОГИИ ВЫСОКОНАПОЛНЕННЫХ ФТОРКОМПОЗИТОВ

DOI: [10.31618/ESSA.2782-1994.2021.2.75.154](https://doi.org/10.31618/ESSA.2782-1994.2021.2.75.154)

Summary. The structural and technological aspects of obtaining composite materials based on polytetrafluoroethylene are considered. It is shown that due to the existence of inert components in the process of interfacial interaction with the degree of filling in the traditional technological paradigm implemented, structural paradox manifests itself in proportion to the reduction of the parameter of tensile strength with increasing degree of filling. According to the concept of multi-level modification, the technological principles are proposed to eliminate the negative impact of the structural paradox fluorine composites by controlling the structure of the organization at various levels – molecular, supramolecular, and interfacial phase. Efficient methods of manufacture of products from highly filled fluorine composites containing 25–35 wt. % carbon fiber with parameters of deformation and strength characteristics higher than the corresponding parameters of analogs.

Аннотация. Рассмотрены структурно-технологические аспекты получения композиционных материалов на основе политетрафторэтилена. Показано, что вследствие проявления инертности компонентов в процессах межфазного взаимодействия с увеличением степени наполнения в рамках традиционной технологической парадигмы реализуется структурный парадокс, проявляющийся в пропорциональном снижении параметра прочности при растяжении с увеличением степени наполнения. На основе концепта многоуровневого модифицирования компонентов предложены технологические принципы устранения негативного влияния структурного парадокса путем управления структурой фторкомпозитов на различных уровнях организации – молекулярном, надмолекулярном, фазовом и межфазовом. Разработаны эффективные приёмы изготовления изделий из высоконаполненных фторкомпозитов, содержащих 25–35 масс. % углеродного волокна и обладающих параметрами деформационно-прочностных характеристик, превосходящими соответствующие параметры аналогов.

Key words: *polytetrafluoroethylene, nanocomposite, modifier, energetic activity, interfacial interaction, energy and technological compliance.*

Ключевые слова: *политетрафторэтилен, наноккомпозит, модификатор, энергетическая активность, межфазное взаимодействие, энергетическое и технологическое соответствие.*

Введение. Политетрафторэтилен (ПТФЭ) и композиционные материалы на его основе находят широкое применение для изготовления изделий герметизирующего и триботехнического назначения [1–8], а также обладающих повышенной теплостойкостью [9], теплопроводностью [10] и электропроводностью [11].

Анализ литературных источников, посвященных исследованию физико-химических и технологических аспектов получения и переработки функциональных фторкомпозитов, свидетельствует о сформировавшихся традиционных методологических подходах, основанных на классических представлениях полимерного материаловедения, физикохимии и технологии пластических масс и композиционных материалов [1–3, 12]. Сущность этих подходов состоит в применении методов регулирования надмолекулярной структуры композита путем использования фрагментов органических и неорганических волокон – стеклянных, оксалоновых, базальтовых, углеродных [1–3, 13].

Для получения фторкомпозитов используют эффективные приемы управления структурой на различных уровнях организации [2, 6, 8], которые позволили разработать и промышленно освоить марочный ассортимент, включающий несколько десятков наименований с различными параметрами деформационно-прочностных, триботехнических и теплофизических характеристик [1–4, 6–8, 14]. При всем многообразии марок фторкомпозитов (материалы серии «Флубон», «Флувис», Ф4К20, Ф4Г10 и др.) при их получении реализован общий технологический принцип формирования и переработки в изделия, сочетающий операции смешения компонентов в заданных соотношениях, холодного прессования заготовок и их горячего спекания в атмосфере воздуха. Этот технологический принцип, близкий по сущности к используемому в технологии порошковой металлургии, в настоящее время доминирует в литературных, патентных и коммерческих источниках, став основой технологической парадигмы функциональных фторкомпозитов [1–3, 9, 14, 15].

Традиционная технология обусловила достижение определенного уровня деформационно-прочностных и триботехнических характеристик функциональных фторкомпозитов, превышение которого в ее рамках не представляется возможным или сопряжено со значительными затратами материальных и энергетических ресурсов, снижающих эффективность практического применения полученных изделий [1–4, 6–9, 16]. Неэффективность традиционных подходов в реализации технологии функциональных фторкомпозитов особенно ярко проявляется при создании композитов, содержащих более 20 масс. % наполнителя в виде частиц различного состава и дисперсности, что резко сужает диапазон их практического применения в триботехнических и герметизирующих системах, эксплуатируемых при повышенных нагрузках, скоростях и температурах [17].

Цель настоящей работы состояла в разработке принципов совершенствования технологии функциональных фторкомпозитов на базе концепции многоуровневого модифицирования.

Материалы и методы исследования. В качестве базового связующего при получении фторкомпозитов использовали промышленно выпускаемый политетрафторэтилен (ПТФЭ) марок Ф-4ПН, Ф-4ПН90, Ф-4ТМ, различающихся средним размером порошкообразной фракции (ОАО «ГалоПолимер», Россия). Для армирования матричного ПТФЭ использовали фрагменты углеродного волокна (УВ), полученные механическим диспергированием углеродной ленты марки ЛО-1-12Н (ОАО «СветлогорскХимволокно», Беларусь), с размером фракций не более 200 мкм. Целевое модифицирование ПТФЭ осуществляли введением в состав технического углерода (ТУ) марок П234 и П803 со средним размером единичных частиц 20 и 80 нм соответственно, ультрадисперсного ПТФЭ (УПТФЭ), промышленно выпускаемого под торговой маркой «Форум» (Институт химии ДВО РАН, Россия) и представляющего собой полимер-олигомерные продукты термогазодинамического синтеза политетрафторэтилена [6], и фторсодержащих олигомеров «Фолеокс» («Эпилам») [7]. Кроме того, в качестве модификаторов структуры ПТФЭ использовали дисперсные частицы полуфабрикатов органического и неорганического происхождения – глины, трепела, оксидов металлов, углеродных нанотрубок, ультрадисперсных углеродсодержащих продуктов детонационного синтеза УДА и УДАГ (ЗАО «Синта») и др.

Образцы для исследований деформационно-прочностных и триботехнических характеристик разработанных фторкомпозитов изготавливали в соответствии с требованиями нормативной документации на материалы типа «Флубон» (аналог «Флувис») [8] и по оригинальным технологиям, позволяющим реализовать принцип многоуровневого модифицирования: МА – механохимическое активирование компонентов на стадии их совмещения, ВС – всестороннее сжатие компонентов на стадии высокотемпературной монолитизации, ПД – механохимическое активирование компонентов на стадии низкотемпературной монолитизации композита. Для модифицирования поверхностного слоя УВ использовали короткоимпульсное лазерное излучение с длиной волны $\lambda = 1,06$ мкм.

Параметры деформационно-прочностных и триботехнических характеристик определяли по стандартным методикам, рекомендованным в нормативной документации, с применением установок МР-200, ComTen 94С, Р-0,5, ХП-250, машин трения СМЦ-2, ХТИ-72. Анализ физико-химических свойств и структуры образцов осуществляли на основе данных ИК-спектроскопии (Tensor-27), атомной силовой (Nanotop-III), оптической (Micro200T-01), растровой электронной (LEO1455VP) микроскопии и рентгеноструктурного анализа (Дрон-2,0).

Результаты и обсуждение. В ряде литературных источников отмечена невозможность сохранения некоторых исходных параметров

свойств матричного полимера ПТФЭ (например, предела прочности при растяжении σ_p , удельной ударной вязкости УУВ) либо их увеличения при введении наполнителей любого состава и дисперсности, в том числе высокопрочных, особенно при их повышенном содержании [2, 3, 8]. Для фторкомпозитов характерным является проявление структурного парадокса, состоящего в значительном снижении значений ряда важнейших параметров фторкомпозитов (плотности, предела прочности при растяжении σ_p , коэффициента трения f) при введении армирующих наполнителей (например, УВ) [6]. Введение в состав композита более 20 масс. % любого, в том числе высокопрочного, наполнителя нецелесообразно, так как наблюдается значительное снижение параметра σ_p , определяющего область применения изделий из него.

Экспериментально наблюдаемый негативный эффект снижения значений ряда важнейших параметров фторкомпозитов при введении в их состав высокопрочных наполнителей не может быть объяснен с точки зрения классических представлений о роли структуры на надмолекулярном и межфазном уровнях в реализации механизмов деформирования и разрушения изделий из них под действием эксплуатационных факторов.

Вместе с тем, для различных типов фторкомпозитов, содержащих высокодисперсные, в том числе наноразмерные [1, 2, 5], а также волокнистые армирующие наполнители и их смеси [2, 3, 6, 8, 13], реализуется эффект многократного повышения износостойкости при трении изделий по металлическому контртелу. Очевидно, что этот эффект является следствием создания частицами наполнителей механических препятствий деформированию и перемещению локальных областей матричного связующего под действием тангенциальных напряжений и их собственной стойкости к воздействию триботехнических факторов – температурных и механических.

Системный анализ влияния структуры фторкомпозитов на механизмы деформирования, разрушения и изнашивания изделий из них в различных условиях нагружения и эксплуатации позволил выявить основные факторы (на молекулярном, надмолекулярном, фазовом и межфазовом уровнях), влияющие на проявление структурного парадокса при реализации традиционных технологий их изготовления [6].

Несовершенство структуры фторкомпозитов на молекулярном уровне предопределено специфическим строением макромолекулы ПТФЭ, обуславливающим отсутствие вязко-текучего состояния. Молекулярное строение ПТФЭ диктует необходимость применения специальных технологических приемов, обеспечивающих образование малодефектной структуры при температурном воздействии на спрессованный образец. Наиболее эффективным приемом является введение в межчастичный граничный слой

термодинамически совместимых с ПТФЭ модификаторов, выполняющих роль высокомолекулярного пластификатора.

На надмолекулярном уровне формирования структуры фторкомпозита парадокс проявляется в невозможности одновременного получения градиентной структуры с ламеллярным строением поверхностного слоя изделия, обеспечивающим низкое сопротивление сдвигу, и мелкосферолитным строением матрицы в объеме, обуславливающим повышенные параметры деформационно-прочностных характеристик. Формирование оптимальной надмолекулярной структуры в наполненной матрице ПТФЭ в процессе монолитизации затруднено вследствие низкой подвижности макромолекул связующего. Поэтому важнейшую роль играет активность дисперсной частицы в процессах перекристаллизации исходной структуры матричных частиц ПТФЭ.

С повышением активности частиц дисперсных модификаторов, которая может быть достигнута путем применения специальных технологий образования наноразмерных фракций [1, 6], механическим или термическим воздействием на полуфабрикат [1, 2, 4], эффективность их действия на процесс надмолекулярной организации усиливается, что обеспечивает необходимый эффект модифицирования при существенно меньших концентрациях наполнителя [1, 7]. Поэтому наноразмерные модификаторы (УДАГ, цеолиты, сиалоны и др.), подвергнутые механоактивации, обеспечивают существенное увеличение параметров деформационно-прочностных и триботехнических характеристик фторкомпозитов при содержании до 1 масс. % [1, 4].

На фазовом уровне образование несовершенной структуры фторкомпозита обусловлено формированием в процессе смешивания частиц матричного полимера и наполнителя, агломератов кластерного типа, обуславливающих возникновение микродефектов в образце после холодного прессования и сохраняющихся после спекания заготовки вследствие действия сил межчастичного трения, стерических и реологических препятствий для заполнения полостей кластеров связующим.

Межфазовый уровень несовершенства структуры композиционных материалов на основе ПТФЭ, приводящего к снижению параметров их служебных характеристик, реализуется вследствие дефектности граничных слоев в системе «матрица – наполнитель», обуславливающей их низкую прочность, которая предопределена инертностью макромолекул ПТФЭ в процессах адсорбционного взаимодействия и отсутствием вязко-текучего состояния связующего, препятствующего его растеканию по поверхности наполнителя. Поэтому в композитах, наполненных дисперсными фрагментами углеродных, стеклянных и других волокон, не реализуются в полной мере их прочностные параметры, которые в других термопластичных матрицах, обладающих высокой

текучестью расплава, приводят к существенному повышению значения параметров прочности.

Методом РЭМ установлено, что независимо от индивидуальных параметров дисперсных частиц (состава, структуры и технологии получения) для них характерно кластерообразование в процессе

получения и хранения (рис. 1), а также наличие у частиц микроразмерного диапазона (механически диспергированного кремня, силикатных стекол, формиата меди, трепела, глины, оксидов металлов, ПТФЭ, УПТФЭ и др.) наноразмерных компонентов в поверхностном слое частиц.

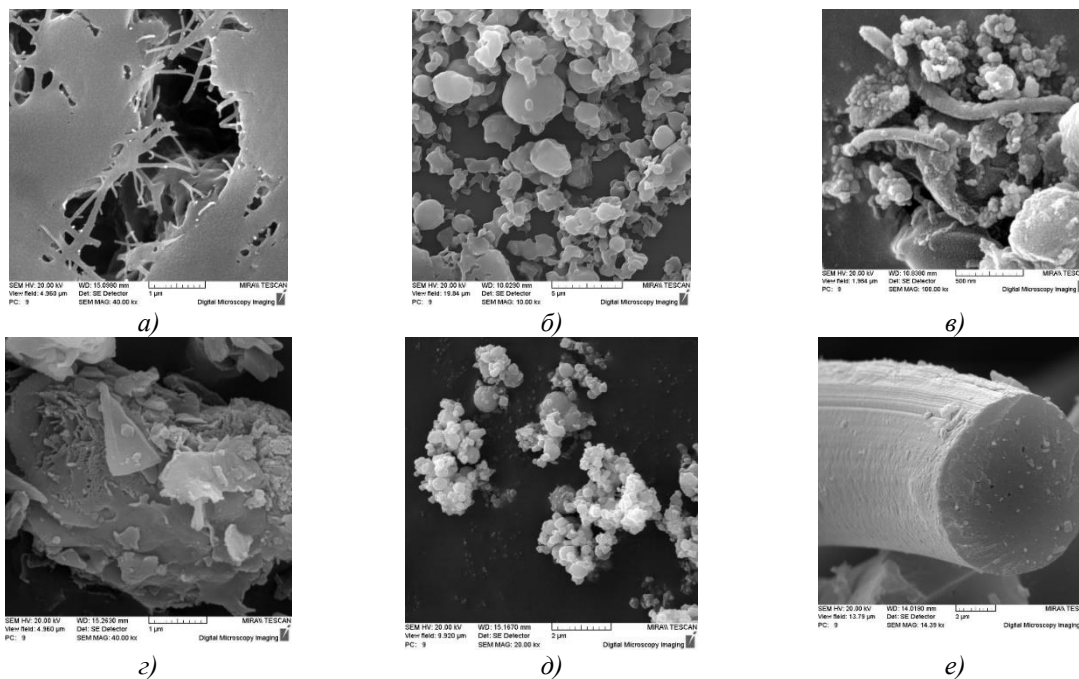


Рис. 1. Характерная морфология частиц ПТФЭ (а), УПТФЭ (б), углеродных нанотрубок (в), трепела (г), оксидов металлов (д), углеродного волокна (е) в состоянии поставки

Анализ спектров ТСТ модификаторов различного состава, строения и технологии получения свидетельствует не только об их активном состоянии, но и о различных температурных диапазонах проявления этого состояния [18]. Учитывая, что для модифицирования были выбраны дисперсные частицы преимущественно микрометровой размерности (50–200) мкм, полученные механическим диспергированием природных полуфабрикатов (шунгит, трепел, глины) и термодинамическим синтезом при абляции блока ПТФЭ (УПТФЭ «Форум»), при получении и хранении которых произошли процессы кластеризации, следует полагать, что существенное влияние на проявление энергетической активности оказывают структурные компоненты поверхностного слоя, находящиеся в наносостоянии. Поэтому для повышения эффективности модифицирующего действия дисперсных компонентов целесообразно использовать технологические приемы, обуславливающие формирование морфологии поверхностного слоя с наноразмерными компонентами, которые обеспечивают образование оптимальной структуры композитов на надмолекулярном и межфазовом уровнях организации.

Такая морфология будет способствовать не только процессам ориентации макромолекул связующего под действием энергетического поля

наноконструктов, но и образованию межфазного слоя с повышенной адгезией вследствие заполнения связующим неровностей рельефа частиц.

Совокупный анализ факторов, обуславливающих проявление структурного парадокса, приводящего к проявлению негативного эффекта снижения параметров деформационно-прочностных и триботехнических характеристик фторкомпозитов при увеличении содержания модификаторов, свидетельствует о преобладании факторов, связанных с технологией получения матричного связующего (порошкообразного ПТФЭ) и армирующего наполнителя (преимущественно УВ), которые усугубляют неблагоприятные процессы, препятствующие формированию оптимальной структуры композита. Поэтому для повышения значений прочности и износостойкости композиционных материалов на основе ПТФЭ с содержанием наполнителей более 20 масс. %, относящихся к высоконаполненным, необходимо изменить традиционные подходы, сформировавшие технологическую парадигму [2, 3, 16].

Сущность этих изменений состоит в необходимости следующих операций:

– осуществление технологической подготовки компонентов, позволяющей достичь оптимальных размеров частиц преобладающей фракции и снизить негативное влияние нестабильного молекулярно-массового распределения матричного

полимера на параметры деформационно-прочностных, реологических характеристик и межчастичного взаимодействия;

– применение технологии совмещения компонентов материала, обеспечивающей разрушение кластерных структур, образованных частицами ПТФЭ и наполнителя (УВ) в процессе смещения;

– использование в качестве целевых модификаторов компонентов с высокой термодинамической совместимостью, которые повышают пластичность матрицы при холодном прессовании и монолитизации благодаря эффекту пластификации; эффективным модификатором этого типа являются олигомерные и полимер-олигомерные продукты химического и термогазодинамического синтеза – фторсодержащие олигомеры (ФСО), ультрадисперсный политетрафторэтилен (УПТФЭ);

– реализация принципа многоуровневого модифицирования с использованием компонентов различной дисперсности, размеров и энергетического состояния, оказывающими

оптимальное структурирующее действие на различных уровнях организации;

– достижение оптимального соотношения энергетических характеристик матрицы и наполнителя для реализации преобладающего межфазного процесса, который формирует граничный слой с повышенной адгезией.

Механохимическое активирование компонентов на стадии их совмещения (технология МА), высокотемпературной монолитизации в замкнутом объеме технологической оснастки (технология ВС) или низкотемпературной монолитизации путем пластического деформирования заготовок (технология ПД) обеспечивает значимые технические эффекты, особенно при увеличении содержания армирующего компонента (УВ) свыше 20 % масс. (рис. 2).

Активирующие технологии (МА, ВС, ПД) оказывают благоприятное влияние на параметры триботехнических характеристик композитов при высокой степени наполнения (25–35 масс. %) вследствие уменьшения дефектности на различных структурных уровнях (рис. 2, кривые 1', 2'), что подтверждается исследованием поверхности сколов образцов методом РЭМ.

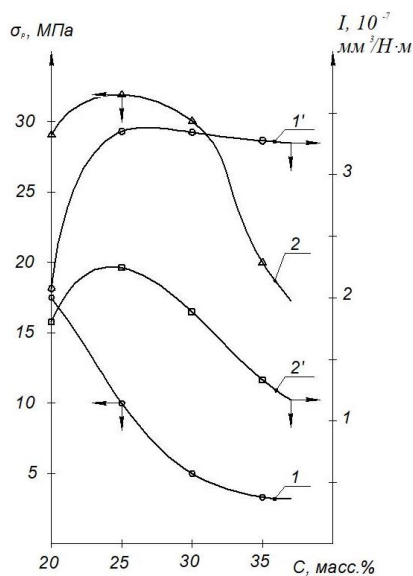


Рис. 2. Зависимость параметра прочности при растяжении (1, 2) и интенсивности изнашивания (1', 2') от содержания в композиционном материале углеродного волокна при использовании традиционной (1, 1') и разработанной технологии всестороннего сжатия (ВС) формования образцов (2, 2')

Предложенные технологии формирования и переработки компонентов на различных стадиях (МА, ВС, ПД) позволили разработать составы с повышенным содержанием УВ (25–35 масс. %),

существенно превосходящие аналоги по параметрам деформационно-прочностных и триботехнических характеристик (табл.).

Таблица

Сравнительные параметры служебных характеристик фторкомпозитов

Параметр	Показатель для материала									
	Флу-бон	Флувис	20*	Супер-флувис		сформированного по технологии				
				30	20*	МА	ВС	ВС+ПД		
Содержание УВ, масс. %	30	30	20*	30	20*	20	30	20	30	30
σ_p , МПа	9	14	17*	18	27*	28	26	29,3	30	32
$\sigma_{сж}$, МПа	27	30	–	33	–	–	35	–	40	45
I , 10^{-7} мм ³ /(Н·м)	5,0	5,0	3,5*	4,5	1,5*	2,19	2,4	1,96	2,3	1,5

*Данные нормативной технической документации (Технических условий) на композиционные материалы «Флувис» и «Суперфлувис» ОАО «Гродненский механический завод»

Технически значимой особенностью применения разработанных технологий в различных вариантах сочетания является возможность значительного увеличения параметров деформационно-прочностных и триботехнических характеристик при превышении содержания УВ свыше 20 масс. %, что расширяет нагрузочный диапазон применения изделий из них.

Выводы. При выборе методологического подхода к реализации технологии получения фторкомпозитов целесообразно обеспечить механизмы проявления энергетического состояния модифицирующего компонента, необходимого в процессах структурообразования на межфазном уровне. Оптимальное управление параметрами энергетического состояния дисперсных частиц наполнителя обуславливает реализацию совокупного эффекта структурирования граничного слоя под действием силового поля модификатора и оптимизации адсорбционных процессов в активном нанорельефе поверхностного слоя. Для управления параметрами энергетического состояния дисперсных частиц наполнителей перспективно применение технологий термической, лазерной и механохимической активации компонентов, применяемых для создания функциональных материалов на основе фторсодержащих матриц в рамках предложенного концепта многоуровневого модифицирования компонентов.

Благодарности. Исследования проводились в рамках выполнения комплексного задания 8.4.1.4 «Механизмы направленного структурообразования функциональных термопластичных композитов при энергетических и механических воздействиях» НИР «Исследование механизмов многоуровневого структурирования функциональных нанокомпозитов на основе термопластов в условиях реализации синергических эффектов физико-химической природы» и НИР «Исследовать механизмы структурообразования регенерированных термопластов и разработать методы повышения параметров деформационно-прочностных и реологических характеристик функциональных композитов на их основе» подпрограммы «Многofункциональные и композиционные материалы» государственной программы научных исследований «Материаловедение, новые материалы и технологии» на 2021–2025 годы, а также комплексного задания 5.6 «Исследование процессов создания и использования полимерных упаковочных материалов для обеспечения качества и безопасности пищевых продуктов» НИР «Исследование процессов структурообразования термопластичных нанокомпозитов для получения плёночных полуфабрикатов с повышенными параметрами характеристик» подпрограммы «Продовольственная безопасность»

государственной программы научных исследований «Сельскохозяйственные технологии и продовольственная безопасность» на 2021–2025 годы.

Список литературы:

1. Охлопкова А. А., Андриянова О. А., Попов С. Н. Модификация полимеров ультрадисперсными соединениями. – Якутск: Изд-во СО РАН, 2003. – 224 с.
2. Машков Ю. К., Овчар З. Н., Байбарацкая М. Ю. и др. Полимерные композиционные материалы в триботехнике. – М.: Недра-Бизнесцентр, 2004. – 262 с.
3. Сиренко Г. А. Антифрикционные карбопластики. – Киев: Техника, 1985. – 195 с.
4. Охлопкова А. А., Петрова П. Н., Гоголева О. В. Разработка полимерных нанокомпозитов триботехнического назначения // Перспективные материалы. – 2008. – № 6, Ч. 2. – С. 213–217.
5. Гинзбург Б. М., Точильников Д. Т. Влияние фуллеренсодержащих добавок к фторопластам на их несущую способность при трении // Журнал технической физики. – 2001. – Т. 71, вып. 2. – С. 120–124.
6. Воропаев В.В., Авдейчик С.В., Струк В.А. Технология формирования высокопрочных износостойких фторкомпозитов / Весці НАН Беларусі: сер. фіз.-тэхн. навук, 2014, № 1. – С. 51–59.
7. Авдейчик С. В., Захаров Ю. Н., Ищенко М. В. и др. Фторсодержащие ингибиторы изнашивания металлополимерных систем. – Минск: Тэхналогія, 2011. – 270 с.
8. Шелестова В. А. Конструкционные материалы триботехнического назначения на основе модифицированных углеволокон и политетрафторэтилена: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.02.01. – Гомель: ИММС НАН Беларусі, 2002. – 22 с.
9. Игнатъева Л.Н., Машенко В.А., Шаулов А. и др. Композитные материалы на основе фторопласта Ф-4МБ и низкоплавкого оксифторидного стекла // Российский журнал физической химии А, 2019. – Т. 93, С.1652–1656.
10. Baronin G.S., Buznik V.M., Yurkov G.Yu., et al. Study of Structure and Properties of Polymer Composites Based on Polytetrafluoroethylene and Cobalt Nanoparticles // Inorganic Materials: Applied Research, 2015, Vol. 6, No. 2, pp. 179–186.
11. Mikhilchan A.A. Lysenko V.A., Salnikova P.Yu. Carbon-fluoropolymer composites: increased electrical conductivity // Fibre Chemistry, 2012, Vol. 44, No 1, p. 46–49.
12. Берлин А.А. Принципы создания композиционных материалов. – М.: Химия, 1990. –240 с.

13. Васильев А.П., Охлопкова А.А., Стручкова Т.С. и др. Разработка антифрикционных материалов на основе политетрафторэтилена с углеродными волокнами // Вестник СВФУ, 2017, №3 (59), с. 39-47.

14. Машков Ю.К., Кургузова О.А., Рубан А.С. Разработка и исследование износостойких полимерных нанокомпозитов // Вестник СибАДИ, 2018. – Том 15, № 1 (59), с. 36-45.

15. Маркова М.А., Готовцева М.Е. Исследование композитов на основе ПТФЭ и углеродных наполнителей // Вестник науки и образования Северо-Запада России, 2017, т. 3, № 1, С. 1–6.

16. Пугачев А. К., Росляков О. А. Переработка фторпластов в изделия: технология и оборудование. – Л.: Химия, 1987. – 168 с.

17. Авдейчик С. В., Лиопо В. А., Рыскулов А. А. и др. Введение в физику нанокомпозиционных машиностроительных материалов / под науч. ред. В.А. Лиопо, В.А. Струка. – Гродно : ГГАУ, 2009. – 439 с.

18. Охлопкова А. А., Виноградов А. В., Пинчук Л. С. Пластики, наполненные ультрадисперсными неорганическими соединениями. – Гомель: ИММС НАН Беларуси, 1999. – 164 с.

UOT 661.725.3.002.68

Salimova N.A., Guseinova M.A.
Azerbaijan State Oil and Industry University,
20 Azadlig ave., Baku, AZ-1010

RATIONAL USE OF CUBIC RESIDUES FROM ISOPROPYL ALCOHOL PRODUCTION

Салимова Н.А, Гусейнова М.А.
Азербайджанская Государственная Нефтяная Академия,
Баку, Азербайджан
Азадлыг 20, АЗ-1010

РАЦИОНАЛЬНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ КУБОВОГО ОСТАТКА ОТ ПРОИЗВОДСТВА ИЗОПРОПИЛОВОГО СПИРТА.

Summary. Analysis one of the wastes of sulphate production of isopropyl alcohol-cube residue of the process of dehydration diisopropyl ether was spent.

Physical-chemical methods. Studing of composition allowed to carry out synthesis with getting of useful product.

Резюме. Проведен анализ одного из отходов сернокислотного производства изопропилового спирта кубового остатка процесса абсолютирования диизопропилового эфира.

При исследовании были использованы физико-химические методы анализа. Изучение состава позволили осуществить синтез с получением полезного продукта.

Keys words: ethyl glycol, catalyst KU-2, diisopropyl ether.

Ключевые слова: этилгликоль, катализатор КУ-2, диизопропиловой эфир.

With the advent of new types of engines, the requirements for quality indicators in terms of resistance to oxidation at high temperatures have increased.

The authors of [1] carried out research on the development of hydrocarbon and non-hydrocarbon synthetic lubricants. The interest in synthetic lubricating oils is due to their unique performance properties. Esters of aliphatic fatty acids, which have a low pour point and are in great demand in the Far North, are widely used in the chemical industry. The lubricity of these esters is maintained over a wide temperature range from 650 to 1200C. Esters are also used in the preparation of combination oils.

Ethers have a number of valuable performance properties, for example, relatively high thermal and antioxidant stability, low pour point, low viscosity, which make these ethers very promising for use in electrical devices in different climatic conditions.

The aim of this work is to obtain esters based on high molecular weight acids contained in the waste of

the process of sulfuric acid production of isopropyl alcohol. The propylene oligomers contained in the waste and remaining in the esterification in the esterification give it low-temperature properties, allowing the use of oils in the Far North.

The creation of low-waste and non-waste technology is a fundamentally new approach to the development of the industry of basic organic and petrochemical synthesis, which means the rational use of natural resources and the protection of the environment. Manufacturing processes must be designed so that, if waste is generated, the latter is transformed into new products.

It is known that in the sulfuric acid production of isopropyl alcohol, waste is generated that does not find any qualified application.

Sulfuric acid [2] production of isopropyl alcohol at the Ethylene Polypropylene plant in Sumgait city is accompanied by the formation of a number of by-products that are numb for qualified use.

In the literature, the results of studies of the process of obtaining esters by alkoxycarbonylation using monohydric low molecular alcohols are given in some detail.

But on the synthesis of esters, in which polyhydric alcohols are used, there are only patent data, from which it is impossible to identify the basic laws of the reaction, and even more so to recommend the technology for the production of these esters.

In this work, we studied the main regularities of the reaction of alkoxycarbonylation of olefins with monohydric alcohols, in which the conversion of olefin

is completely carried out with a two- or four-fold excess of alcohol.

The specificity of the reaction when using polyhydric alcohols to obtain esters creates the need to use an excess of olefin, which is subsequently recycled in the process.

When studying the effect of the ratio of olefin and alcohol, it was found that the best results in the conversion of alcohol and selectivity to diester are obtained at a ratio of 4; with a further increase in the ratio, no additional effect is observed (Table 1).

Table 1.

Effect of the olefin-alcohol ratio on the alcohol conversion and selectivity for esters (160 ° C, 16 MPa, reaction time 2 h, Comet concentration = 1 wt%, Py: Cometh ratio (molar) = 3)

Olefin-alcohol ratio (mol)	Alcohol conversion,%	Selectivity	
		diester	mono ether
2	91,3	80,4	7,1
3	98,2	80,2	5,3
4	98,4	85,6	4,2
5	98,4	86,4	5,1

The work [3] presents the results of a study aimed at increasing the yield of diester at pressures below 10 MPa.

An increase in the catalyst concentration from 1 to 3 wt%, at a pressure of 5 MPa, did not give a significant

change in the conversion of monoester to diester. With an increase in pressure in the process to 9 MPa, the effect of the catalyst concentration on the reaction rate of diester formation is observed (Table 2)

Table 2.

Influence of the olefin-alcohol ratio on the alcohol conversion and selectivity for esters (160 ° C, 16 MPa, reaction time 2 hours, Comet concentration = 1 wt%, Py: Cometh ratio (molar) = 3).

Pressure MPa	Concentration Comet,% wt..	Alcohol conversion,%	Selectivity	
			diester	mono ether
5	2	97,2	60	36,5
8	1	97,2	82,1	12,2
9	1	97,6	91,2	6,1
10	1	99,9	98,8	0,16

The study of the effect of temperature on the process of esterification of the fraction 140-2500C of the DIE waste with ethylene glycol was carried out at a ratio of reagents: the 140-2500C fraction of the DIE waste to ethylene glycol equal to 1: 1.4 (mol). The temperature was maintained from 140-1600C. The KU-2 catalyst is taken as 1% of the mass. Water was taken into the Dean-Stark trap. The experiment was carried

out at a temperature of 1470C. After the introduction of the reagents into the three-necked flask and when the temperature reached 1470C, water accumulated in the Dean-Stark trap, and when equilibrium was reached, water stopped collecting and the formation of monoesters stopped. The material balance of this process is shown in Table 3.

Table 3

Material balance of the esterification process of the 140-2500C fraction of the DIE waste with ethylene glycol at 1470C.

Taken			Received		
Reagents	Quantities		Reagents	Quantities	
	g	% (mass)		g	% (mass)
Acid in the fraction 140-2500C	65,0	72,2	Unreacted products	43,5	48,3
Ethylene glycol	25,0	27,8	esterificate	42	46,7
			H ₂ O	3,0	3,3
			Losses	1,5	1,7
Total:	90,0	100,0	Total:	90,0	100,0

The yield of the esterificate is 53.64% of the mass of the theoretically possible.

The study was carried out with the ratio of the reagents: fractions 140-2500C of the waste DIE to

ethylene glycol equal to 1 ÷ 1.4 (mol). The temperature varies from 140-1600C. The KU-2 catalyst is used as 1% of the mass. Water is taken from the Dean-Stark trap. An experiment at a temperature of 1580C is

described below. When the amount of water reached 4.5, equilibrium was reached. The material balance of

the esterification process at temperature is summarized in Table 4.

Table 4

Material balance of the esterification process of the 140-2500C fraction of the DIE waste with ethylene glycol at 1580C.

Taken			Received		
Reagents	Quantities		Reagents	Количество	
	g	% (mass)		g	% (mass)
Acid in the fraction 140-250 ^o C	65,0	72,2	Unreacted products	35,6	39,5
Ethylene glycol	25,0	27,8	esterificate	49,3	54,8
			H ₂ O	3,4	3,8
			Losses	1,7	1,9
Total:	90,0	100,0	Total:	90,0	100,0

The esterificate yield is 63.2% of the theoretically possible.

The study was carried out at a ratio of reagents: fractions 140-2500C of DIE waste to ethylene glycol 1: 1.4 (mol). The temperature was maintained from 140-

1600C. The KU-2 catalyst is used in the amount of 1% of the mass. Water accumulates in the Dean-Stark trap. An experiment at a temperature of 1660C is described below. The material balance of the process is summarized in Table 5.

Table 5

Material balance of the esterification process of the 140-2500C fraction of the DIE waste with ethylene glycol at 1660C.

Taken			Received		
Reagents	Quantities		Реагенты	Quantities	
	g	% (mass)		g	% (mass)
Acid in the fraction 140-250 ^o C	65,0	72,2	Reagents	12,8	14,2
Ethylene glycol	25,0	27,8	Unreacted products	70	77,8
			esterificate	6,0	6,7
			H ₂ O	1,2	1,3
Total:	90,0	100,0	Total:	90,0	100,0

The esterificate yield is 93.5% of the theoretically possible.

Table 6

Physicochemical properties of ethers of fraction 140-250oC of waste diisopropyl ether and ethylene glycol, 0C, 0C

Boiling point temperature limits, °C	Refractive index, n_D^{20}	Density, g/cm ³	Pour point, °C	Flash point in an open crucible, °C	Kinematic viscosity cst.mm ³ /s at temperatures	
					20 ^o C	50 ^o C
110/2 – 120/2	1,4620	851,3	-82 H.3	72	-	4,16
185/2 – 200/2	1,4902	881,6	-75	138	21,4	9,8

CONCLUSIONS

1. As a result of the esterification reaction of the 140-2500C fraction of diisopropyl ether waste, which was obtained as a result of sulfuric acid production of isopropyl alcohol with ethylene glycol, an esterificate was obtained that meets all the requirements for transformer oils.

2. It was revealed that the reaction of formation of ethylene glycol ethers with unsaturated aliphatic acids proceeds in 2 stages. The reaction products contain both monoesters and diesters

3. The distinctive property of the synthesized product - low pour point has been established. This allows us to recommend it for use in the Far North.

REFERENCES

1. F. M. Shakhverdieva, N. A. Salimova, M. A. Guseinova "Expanding the resources of the synthesis of a dielectric fluid" // Oil refining and petrochemistry No. 5-2014, p. 37

2. Salimova N.A., Shakhverdieva F.M., Guseinova M.A. - Synthesis of a dielectric fluid based on the waste of sulfuric acid production of isopropyl alcohol // - Oil refining and petrochemistry № 11-2012, p 42

3. Salimova N.A., Shakhverdiyeva F.M., Amirov S.G., "Waste recycling" Baku-2011, art.99.

4. Synthesis of anionic detergents based on wastes of sulfuric acid hydration of propylene. Processes of petrochemistry and oil refining, 13.1 (49), Baku, 2012, pp. 20-24

5. Expansion of resources for the synthesis of dielectric fluid. Magazine No. 5. "Oil refining and petrochemistry". Moscow, 2014, p. 37-40. F. M. Shakhverdiyeva N. A. Salimova,

6. Purification and use of the bottom residue obtained in the process of isopropyl alcohol absolutization. Magazine No. 9. "Azerbaijan oil industry". Baku, 2014, p. 43-47 N. A. Salimova, F. M. Shakhverdiyeva E. D. Sadigov

Мельник Вікторія Миколаївна
 Доктор технічних наук, професор кафедри біотехніки та інженерії
 Національний технічний університет України
 "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського"

Гнатейко Нонна Валентинівна
 Кандидат технічних наук, доцент кафедри
 динаміки і міцності машин та опору матеріалів
 Національний технічний університет України
 "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського"

ВПЛИВ АКУСТИЧНОЇ ХВИЛІ ТИСКУ НА ПЕРЕМІЩЕННЯ ПІДВОДНОГО АПАРАТУ

Mel'nick V.M.

doctor of technical sciences, professor, Head of the Department of bioengineering and biotechnics,
 National Technical University of Ukraine
 "IGOR SIKORSKY KYIV POLYTECHNIC INSTITUTE"

Gnateiko N.V.

Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Department of the
 dynamics and strength of machines and the resistance of materials
 National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

INFLUENCE OF ACOUSTIC PRESSURE WAVE ON THE MOVEMENT OF THE UNDERWATER

DOI: [10.31618/ESSA.2782-1994.2021.2.75.162](https://doi.org/10.31618/ESSA.2782-1994.2021.2.75.162)

Анотація. Аналізується примусове переміщення підводного апарату під дією акустичної хвилі тиску при прямолінійному і рівномірному переміщенні апарату. Проведений аналіз динаміки поступального переміщення корпусу апарату під дією акустичної хвилі тиску в ідеальному середовищі, що дає можливість оцінити фізичні властивості середовища та пружні властивості зовнішнього корпусу апарату на величину граничного переміщення підводного апарату. Доведено, якщо повний імпульс тиску обмежений, тоді частки води одержать визначені переміщення і можна очікувати, що за цих умов визначеним буде і переміщення підводного апарату. Результати аналізу дають можливість провести порівняльний аналіз поступального переміщення підводного апарату під дією акустичної хвилі тиску з урахуванням особливостей середовища переміщення, точніше з урахуванням в'язкості реального середовища.

Summary. The forced movement of the submarine under the action of an acoustic pressure wave at rectilinear and uniform movement of the device is analyzed. The analysis of the dynamics of translational movement of the hull under the action of an acoustic pressure wave in an ideal environment, which makes it possible to assess the physical properties of the environment and the elastic properties of the outer hull on the value of the maximum movement of the submarine. It is proved that if the total pressure pulse is limited, then the water particles will receive certain displacements and it can be expected that under these conditions the displacement of the submarine will be determined. The results of the analysis make it possible to conduct a comparative analysis of the translational movement of the submarine under the action of an acoustic pressure wave, taking into account the characteristics of the moving medium, more precisely, taking into account the viscosity of the real medium.

Ключові слова: підводний апарат, акустична хвиля тиску, рідина, акустичне наближення, імпульс тиску.

Keywords: submarine, acoustic pressure wave, liquid, acoustic approximation, pressure pulse

Вступ

Як відомо, в сучасних умовах підводним апаратам належить провідна роль в озброєній боротьбі на морі. Поєднуючи в собі такі фактори як прихованість, захищеність, рухливість та здатність до самооборони, підводні апарати спроможні винищувати наземні об'єкти, ракетні підводні апарати, угруповання надводних кораблів, порушувати комунікації. З появою підводних човнів-ракетноносців, в першу чергу атомних, військово-морський флот постає спроможним чинити стратегічний вплив на хід та наслідок сучасної війни. Саме з огляду на цей аспект, проблема боротьби з підводними апаратами –

носіями балістичних ракет – уявляється проблемою надзвичайної ваги.

Аналіз літературних даних

Проаналізуємо рух підводного апарату, розглядаючи його у першому наближенні як коловий жорсткий, або пружно-деформований, циліндр, занурений в ідеальну стисливу рідину, під дією плоскої акустичної хвилі. Тиск за фронтом змінюється у часі ступінчасто або експоненціально. Такий режим може мати місце, наприклад, при підводному бомбардуванні. З цією метою застосуємо операційний метод за умови виконання наближених співвідношень для потенціалів відбитих та випромінених хвиль, що придатно для початкового і кінцевого інтервалів часу.

Точний вираз граничного переміщення тіла, що має дві площини симетрії, вперше отриманий В.В. Новожиловим [1]. Надалі, цей вираз був узагальнений на пружно-деформуємі тіла Л.І. Слепяном [2]. Задача про рух нескінченного колового циліндру у наближеній постановці вивчалася у статті [3], а у випадку еліптичного

циліндру – в роботі [4]. Докладний опис руху тіл іншої конфігурації наводиться в монографії [5].

Плоский рух абсолютно жорсткого колового циліндру радіуса R , який занурений в ідеальну (за відсутності в'язкості) стисливу рідину, під дією акустичної хвилі тиску описується диференціальним рівнянням [1]

$$\frac{M \partial^2 U(t)}{\partial t^2} = \rho \oint \frac{\partial \Phi}{\partial t} \cos(n, \hat{y}) dS + \rho \oint \frac{\partial \phi_1}{\partial t} \cos(n, \hat{y}) dS + \rho \oint \frac{\partial \phi_2}{\partial t} \cos(n, \hat{y}) dS, \quad (1.1)$$

де $U(t)$ – переміщення апарату в напрямку осі y ; Φ – потенціал падаючої хвилі, що розповсюджується із швидкістю c ; ϕ_1 – потенціал хвилі, відбитих від жорсткого нерухомого циліндру; ϕ_2 – потенціал випромінених хвилі, зумовлених рухом циліндру; M – погонна маса підводного апарату; S – контур його площини шпангоуту; n – напрям зовнішньої нормалі до S ; ρ – щільність рідини; t – час.

З напрямом розповсюдження хвилі сполучимо ось y , початок відліку якої співпадає з первісно нерухомим апаратом.

Можливість використання наближених співвідношень для гідродинамічних тисків при розв'язанні задач вимушеного руху твердих тіл, зокрема циліндру, за умови ступінчастої зміни акустичного навантаження висвітлена в роботах [6, 7].

Об'єктом досліджень слугує взаємодія акустичного навантаження у вигляді удару із підводним апаратом.

Мета та задачі досліджень

Метою є дослідження впливу примусового переміщення підводного апарату під впливом акустичної хвилі тиску. Режим "Стоп-машина".

Задачею досліджень слугує з'ясування характеру поступального переміщення корпусу апарату під впливом акустичного хвилі тиску, точніше його граничне значення, як найважливіше на вирішення бойових завдань.

Примусове переміщення підводного апарату під дією акустичної хвилі тиску

Розглянемо рух апарату у нескінченному за всіма напрямками об'ємі рідини, яка перебуває у спокої.

Аналітичні міркування будемо відтворювати для ідеальної, тобто не в'язкої, рідини. Справедливості заради, слід наперед зазначити, що багато результатів за такого припущення суттєво

розбіжні з дійсністю. В першу чергу це стосується розрахунку сил опору, якого зазнають рухомі тіла. Справа в тому, що сили внутрішнього тертя чи в'язкості в реальній рідині проявляються найбільш суттєво у тонкому прошарку, що безпосередньо прилягає до поверхні підводного апарату. Наявність навіть дуже незначної в'язкості, може докорінно змінити поле швидкостей і, отже, змінити пов'язане з ним поле гідродинамічних тисків навколо об'єкту.

Окрему роль відіграє прямолінійний і рівномірний рух апарату в рідині. Створюваний ним стан переміщення рідини буде, очевидно, усталеним відносно осей, які пов'язані з тілом. Для обчислення поля гідродинамічного тиску на підґрунті галілеєвого принципу відносності класичної механіки, обиремо за основні, "нерухомі" осі, задані вище. Інакше кажучи, задача поступального прямолінійного і рівномірного руху в рідині, яка знаходиться у стані абсолютного спокою на нескінченності, зводиться до задачі усталеного обтікання нерухомого тіла нескінченим потоком рідини, безгранично віддалені частки якої мають усюди однакову за величиною і напрямом швидкість.

Розглянемо, як найбільш простий, випадок плоского потоку, в якому розміщений апарат у формі нескінченного за протяжністю циліндра з утворюючими, що перпендикулярні площині течії. Обмежимо коло аналізуємих задач вивченням безвихорового потоку нестисливої рідини.

Граничні умови. Задачі Дирихле і Неймана. Звернімо увагу на найпростіші варіанти руху. За умови плоскої течії в нескінченній рідині, що знаходиться у спокої на нескінченності, породженої рухом циліндричного тіла, граничні умови для функції тока ψ , очевидно, мають вигляд:

– для безмежно віддалених точок потоку (швидкість в цих точках повинна дорівнювати нулю)

$$\frac{\partial \psi}{\partial x} = 0; \quad \frac{\partial \psi}{\partial y} = 0; \quad (1.2)$$

– в кожній точці контура апарату, що рухається, повинні співпадати нормальні складові U_n швидкості власне контура і швидкості V_n

прилеглих часток рідини (рис. 1.1).

Приймаючи до уваги, що

$$\begin{aligned} V_n &= V_x \cos(n, \hat{x}) + V_y \cos(n, \hat{y}) = V_x \sin \theta - V_y \cos \theta = \\ &= V_x \frac{dy}{ds} - V_y \frac{dx}{ds} = \frac{\partial \psi}{\partial y} \frac{dy}{ds} + \frac{\partial \psi}{\partial x} \frac{dx}{ds} = \frac{d\psi}{ds}, \end{aligned} \quad (1.3)$$

де θ – кут між елементом dS лінії току та оссю Ox . Отже,

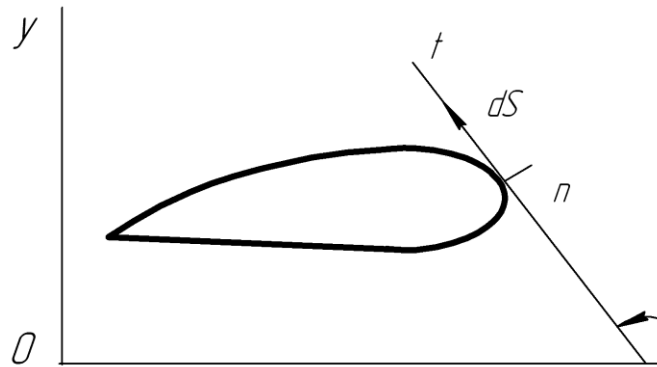


Рис. 1.1. Граничні умови для контура апарату

$$\frac{d\psi}{dS} = U_n = U_x \sin \theta - U_y \cos \theta . \quad (1.4)$$

Сам нерухомий контур повинен стикатися з лінією току. У цьому випадку, до вимог (1.2), (1.3) приєднується гранична умова для нерухомого контуру –

$$\frac{d\psi}{dS} = 0; \quad \psi = const . \quad (1.5)$$

Якщо апарат рухається, причому поступально із швидкістю U вздовж осі Ox , тоді умова (1.4) набуває вигляду –

$$\frac{d\psi}{dS} = U \sin \theta = U \frac{dy}{dS} .$$

Після інтегрування цього виразу вздовж контура, за умови, що $U = Const$, для всіх точок контура маємо:

$$\psi = Uy + C .$$

Безвихоровий рух нестисливої рідини.
Наведемо відомі співвідношення –

$$V_n = \frac{\partial \phi}{\partial n}; \quad U_n = \frac{\partial \phi}{\partial n}; \quad \frac{\partial \phi}{\partial n} = \frac{\partial \psi}{\partial S}; \quad \frac{\partial \phi}{\partial S} = -\frac{\partial \psi}{\partial n} .$$

Поступальний безциркуляційний потік безвідривність обтікання не чинить на коловий ідеальної рідини за прийнятого припущення про циліндр ніякого результуючого тиску.
Рівняння безвідривності

$$\frac{\partial V_x}{\partial x} + \frac{\partial V_y}{\partial y} + \frac{\partial V_z}{\partial z} = 0, \quad \left(V_x = \frac{\partial \phi}{\partial x}; \quad V_y = \frac{\partial \phi}{\partial y}; \quad V_z = \frac{\partial \phi}{\partial z} \right)$$

доводить, що функція ϕ повинна задовольняти рівнянню Лапласа

$$\Delta \phi = \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = 0$$

для усієї області течії, тобто зовні поверхні S . Вважаємо, що потенціал ϕ являє собою однозначну функцію. У кожній точці M поверхні S повинна виконуватися гранична умова

$$\frac{\partial \phi}{\partial n} = U_n,$$

де U_n не що інше, як проекція на нормаль “ n ” до поверхні S швидкості U точки M цієї ж поверхні. Нормаль прийнята зовнішньою.

Умова, що рідина перебуває у спокої на безмежно віддалених точках, зводиться до граничних умов

$$\lim_{r \rightarrow \infty} \frac{\partial \phi}{\partial x} = \lim_{r \rightarrow \infty} \frac{\partial \phi}{\partial y} = \lim_{r \rightarrow \infty} \frac{\partial \phi}{\partial z} = 0,$$

$$\text{де } r = (x^2 + y^2 + z^2)^{\frac{1}{2}}.$$

Можна вважати, що величини $\frac{\partial \phi}{\partial x}$, $\frac{\partial \phi}{\partial y}$, $\frac{\partial \phi}{\partial z}$ прямують до нуля, якщо $r \rightarrow \infty$, подібно величині r^{-3} , а функція ϕ – подібно величині r^{-2} .

Припустимо, що рух апарату почався із стану спокою. Тоді, відповідно до теореми Лагранжа, течія рідини буде потенціальною. Окрім того, приймемо, що потенціал швидкості ϕ являється

однозначною функцією (ця вимога зводиться до ствердження, що циркуляція швидкості вздовж довільного контуру в рідині дорівнює нулю). Відносно рухомих осей Ox , Oy течія за цих умов постає неусталеною навіть при рівномірному рухові циліндра.

Кінетична енергія безмірного прошарку рідини одичної висоти може бути обчислена за формулою

$$T = -\frac{1}{2} \rho \oint \phi d\psi = \frac{1}{2} \rho U^2 a^2 \int_0^{2\pi} \cos^2 \theta d\theta = \frac{1}{2} \pi \rho U^2 a^2 = \frac{1}{2} M_0 U^2,$$

де M_0 – маса витисненої рідини в об’ємі, що приходить на одиницю довжини циліндра. Повна

кінетична енергія системи “циліндр – рідина” буде дорівнювати:

$$T = \frac{1}{2} (M + M_0) U^2,$$

де M – маса циліндра.

Застосування закону живої сили для одиниці маси рідини призводить до рівності –

$$(M + M_0) U dU = F dS = F U dt,$$

або так: $M \frac{dU}{dt} = F - M_0 \frac{dU}{dt},$

де F – зовнішня сила, яка діє на циліндр в напрямку осі Ox .

Остання рівність доводить, що циліндр відчуває силу опору $M_0 \frac{dU}{dt}$ тільки за умови прискорення свого руху. При рівномірному прямолінійному переміщенні опір зникає. Рух циліндру під дією зовнішніх сил чиниться так, ніби

рідина відсутня, але циліндр отримав додаткову масу, яка дорівнює масі витисненої рідини.

Апарат вільний від закріплення

Припустимо, що в оточуючій підводній апарат рідині поширюється нестационарна хвиля тиску з потенціалом (рис. 1.2)

$$\Phi(\xi) = \Phi(y - ct). \tag{1.6}$$

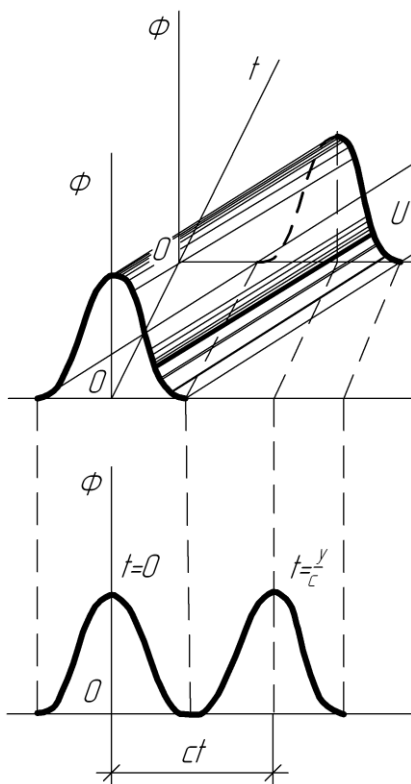


Рис. 1.2. Потенціал швидкості акустичної хвилі тиску

Як було зазначено вище, вважаємо наявність в рухомому об’єкті двох взаємно-перпендикулярних площин геометричної і масової симетрії, які початково перпендикулярні до фронту діючої хвилі.

Це обмеження дозволить надалі уникнути громіздких обчислень. Хоча, слід зазначити, задача може бути розв’язана і для випадку довільної геометрії корпусу [8-9].

Переміщеннями апарату внаслідок наявної надлишкової або негативної плавучості будемо нехтувати.

Стосовно функції потенціалу $\Phi(\xi)$ висловим наступну думку. Вона прямує до певної границі за умови $t \rightarrow (-\infty)$. Останнє зауваження слід тлумачити таким чином, що повний імпульс хвилі тиску

$$I = \int_0^\infty P_0 dt = -\rho \int_0^\infty \frac{\partial \Phi(y - ct)}{\partial t} dt$$

за весь час дії $t \in (0, \infty)$ вважається обмеженим.

Функція $\Phi(y - ct)$ має незмінний профіль, що переміщується в напрямку осі Oy із швидкістю “ c ” (рис. 1.2). У фазовій площині (y, t) функція

$\Phi(y - ct)$ зберігає сталі значення на лініях $y - ct = const$. Поверхня $U = \Phi(y - ct)$ – циліндрична, а її утворюючі паралельні до прямої $y = ct$. Напрямна поверхні – крива $\Phi(y - ct)$ при $t = 0$, тобто

$$\Phi(y, t)|_{t=0} = \Phi(y). \tag{1.7}$$

Доведемо, що за прийнятих припущень стосовно властивостей діючої акустичної хвилі тиску, переміщення підводного апарату (в режимі “стоп-машина”) буде наближатися до деякої границі при $t \rightarrow \infty$. Окрім того, обчислимо цю величину.

Задача розв’язується в акустичному наближенні [10].

Зміна кількості руху за час $t \in (0, \infty)$ дорівнює повному імпульсу сили за цей час. Сила \vec{F} , що діє на корпус підводного апарату, дорівнює частинний похідній у часі від потенціалу, тобто

$$\frac{\partial \Phi(y - ct)}{\partial t};$$

$$\langle \vec{F} = -grad\Phi = -\left(\frac{\partial\Phi}{\partial x}\vec{i} + \frac{\partial\Phi}{\partial y}\vec{j}\right) \rangle t.$$

Векторне поле називається потенціальним, якщо воно являється градієнтом деякого скалярного поля, тобто

$$\vec{F} = -grad\Phi.$$

Скалярне поле іменується потенціалом поля F . Знак “мінус” перед $grad\Phi$ обраний для зручності. Відповідно до нашої задачі, це означає, що в напрямку вектора \vec{F} елементарний імпульс сили

$$\frac{\partial\Phi}{\partial t} dt$$

спадний.

Отже, за припущення симетрії корпусу, апарат буде примусово переміщуватися в напрямку діючої хвилі тиску, іншими словами, в напрямку осі Oy .

Диференціальне рівняння руху підводного об'єкту, в межах обумовлених спрощень, можна записати у вигляді

$$M \frac{\partial^2 U(t)}{\partial t^2} = \rho \iint_S \frac{\partial\Phi(y-ct)}{\partial t} \cos(n, y) dS + \rho \iint_S \frac{\partial\phi(x,y,z,t)}{\partial t} \cos(n, y) dS, \quad (1.8)$$

де $U(t)$ – примусове переміщення підводного апарату внаслідок дії акустичної хвилі тиску; M – маса апарату; ρ – щільність середовища; n – напрям зовнішньої нормалі до поверхні S корпусу; S – контур поперечного перерізу у площині шпангоута;

$\cos(n, y)$ – косинус кута між зовнішньою нормаллю та оссю Oy ; інтегрування проводиться по всій поверхні S ; $\phi(x, y, z, t)$ – потенціал дифракційної хвилі, який підпорядкований тривимірному хвильовому рівнянню Лапласа

$$\Delta\phi - c^{-2} \frac{\partial^2 \phi(x,y,z,t)}{\partial t^2} = 0 \quad (1.9)$$

і початковим умовам

$$\phi(x, y, z, t)|_{t=0} = 0; \quad \frac{\partial\phi(x,y,z,t)}{\partial t}|_{t=0} = 0. \quad (1.10)$$

Якщо

$$r = [x^2 + y^2 + z^2]^{\frac{1}{2}} \rightarrow \infty,$$

тоді функція $\phi(x, y, z, t) \rightarrow 0$, а на поверхні корпусу апарата має місце умова

$$\frac{\partial\phi(x,y,z,t)}{\partial n} = -\frac{\partial\Phi(y,t)}{\partial n} + \frac{\partial U(t)}{\partial t} \cos(n, y). \quad (1.11)$$

В циліндричних координатах виконуються співвідношення –

$$\Delta\phi = \frac{\partial^2 \phi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial\phi}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \phi}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2};$$

$$x = r \cos \theta; \quad y = r \sin \theta.$$

Двічі зінтегрувавши рівняння (1.8) в межах від нуля до t , отримуємо

$$MU(t) = \rho \iint_S \Phi^* \cos(n, y) dS + \rho \iint_S \phi^* \cos(n, y) dS, \quad (1.12)$$

де

$$\Phi^* = \int_0^t \Phi(y, t) dt; \quad \phi^* = \int_0^t \phi(x, y, z, t) dt. \quad (1.13)$$

Переміщення часток оточуючої апарат рідини виражаються через ці дві функції формулами:

$$\vec{V} = grad\Phi^*; \quad \vec{W} = grad\phi^*, \quad (1.14)$$

де \vec{V} – переміщення, породжене падаючою хвилею за припущення відсутності апарату в воді; \vec{W} – додаткове переміщення, що обумовлене дифракцією.

Падаюча хвиля розповсюджується в напрямку Oy , тому –

$$\vec{V} = \frac{\partial \Phi^*}{\partial y} \vec{j} = \vec{j}V. \tag{1.15}$$

Функція ϕ^* підпорядкована рівнянню

$$\Delta \phi^* = c^{-2} \frac{\partial \phi^*}{\partial t^2} \tag{1.16}$$

та граничним умовам на поверхні корпусу апарату

$$\frac{\partial \phi^*}{\partial n} = -\frac{\partial \Phi^*}{\partial n} + U(t) \cos(n, \wedge y) = (U - V) \cos(n, \wedge y). \tag{1.17}$$

Вирази (1.16) та (1.17) одержані після інтегрування у часі рівнянь (1.9) та (1.11) з урахуванням умов (1.10).

З самого початку було обумовлено, що імпульс хвилі тиску обмежений, тому і, відповідно, переміщення V буде також скінченим за величиною прямоючи при $t \rightarrow \infty$ до граничного значення

$$V_\infty = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{\partial \Phi^*}{\partial y}. \tag{1.18}$$

Потенціал падаючої хвилі Φ і, природно, його інтеграл Φ^* не мають особливостей всередині

області, займаємої корпусом підводного апарату. Виходячи з цього, можна записати:

$$\rho \iint_S \Phi^* \cos(n, \wedge y) dS = \rho \iiint_V \frac{\partial \Phi^*}{\partial y} dV = \rho \iiint_V V dV. \tag{1.19}$$

Стосовно другого з інтегралів у виразі (1.12), то згідно (1.17), він може бути наведений у вигляді:

$$\rho \iint_S \phi^* \cos(n, \wedge y) dS = \rho \iint_S (U - V)^{-1} \phi^* \frac{\partial \phi^*}{\partial n} dS. \tag{1.20}$$

Отже, перетворення (1.19), (1.20) дозволять вираз (1.12) належним чином змінити:

$$MU(t) = \rho \iiint_V V dV + \rho \iint_S (U - V)^{-1} \phi^* \frac{\partial \phi^*}{\partial n} dS. \tag{1.21}$$

Щоб, врешті решт, обчислити переміщення підводного апарату під дією хвилі тиску треба знати функцію $\phi^*(x, y, z, t)$, а це, при узагальненій

постановці задачі, неможливо. Тому має сенс шукати не величину $U(t)$, а остаточне переміщення об'єкту, тобто

$$U_\infty = \lim_{t \rightarrow \infty} U(t). \tag{1.22}$$

Але цього граничного значення може і не бути. Так, якби хвиля тиску мала вигляд стрибка, то внаслідок її дії незакріплений апарат отримав би якусь сталу швидкість. Разом з тим, якщо повний імпульс тиску обмежений, тоді частки води одержать визначені переміщення і можна

очікувати, що за цих умов визначеним буде і переміщення підводного апарату.

Припустимо, що це саме так і проаналізуємо, до чого призведе така гадка.

Нехай при $t \rightarrow \infty$, $V \rightarrow V_\infty$, $U \rightarrow U_\infty$. Тоді з рівняння (1.21) походить, що

$$MU_\infty = M_0 V_\infty + \rho (U_\infty - V_\infty)^{-1} \lim_{t \rightarrow \infty} \iint_S \phi^* \frac{\partial \phi^*}{\partial n} dS, \tag{1.23}$$

де M_0 – маса витисненої апаратом води. Таким чином, слід знайти

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \iint_S \phi^* \frac{\partial \phi^*}{\partial n} dS = \iint_S \phi_\infty^* \frac{\partial \phi_\infty^*}{\partial n} dS, \tag{1.24}$$

де

$$\phi_{\infty}^* = \lim_{t \rightarrow \infty} \phi^* = f(x, y, z). \quad (1.25)$$

Як вже зазначалося, функція ϕ^* функцією гармонічною. Вона згасаюча при $r \rightarrow \infty$, а на поверхні корпусу підводного апарату підпорядкована рівнянню (1.16), права частина якого прямує до нуля при $t \rightarrow \infty$, бо пропорційна тиску в дифракційній хвилі. Тому ϕ_{∞}^* буде дотримується умови

$$\frac{\partial \phi^*}{\partial n} = A \cos(n, \hat{y}); \quad A = U_{\infty} - V_{\infty} = \text{const}. \quad (1.26)$$

Звідси походить, що ϕ_{∞}^* може бути ототожнена з потенціалом течії безмежної ідеальної рідини коли в ній рухається вивчаємий підводний об'єкт із сталою швидкістю A в напрямку осі Oy . Значимо, що в межах інтересів поставленої задачі, нас цікавить не сама ця функція, а лише інтеграл (1.24). Перетворимо його за формулою Дж. Гріна, за умови, що при

$$r = [x^2 + y^2 + z^2]^{\frac{1}{2}} \rightarrow \infty,$$

функція ϕ^* прямує до нуля як r^{-2} . Отже,

$$\iint_S \phi_{\infty}^* \frac{\partial \phi_{\infty}^*}{\partial n} dS = \frac{1}{2} \iint_S \frac{\partial (\phi_{\infty}^*)^2}{\partial n} dS = \iiint_V \left[\left(\frac{\partial \phi_{\infty}^*}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \phi_{\infty}^*}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial \phi_{\infty}^*}{\partial z} \right)^2 \right] dV. \quad (1.27)$$

І, таким чином, задача зведена до обчислення інтегралу

$$T = \frac{1}{2} \rho \iiint_V \left[\left(\frac{\partial \phi_{\infty}^*}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \phi_{\infty}^*}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial \phi_{\infty}^*}{\partial z} \right)^2 \right] dV. \quad (1.28)$$

Але це є кінетична енергія ідеальної нестисливої рідини в задачі з граничними умовами (1.26). Тому можна записати:

$$T = \frac{1}{2} m_0 M_0 A^2, \quad (1.29)$$

де m_0 – коефіцієнт приєднаної маси для циліндра, що рухається в напрямку осі Oy .

З урахуванням виразів (1.26)...(1.29), формула (1.22) набуває вигляду

$$M U_{\infty} = M_0 V_{\infty} - m_0 M_0 A = M_0 V_{\infty} - m_0 M_0 (U_{\infty} - V_{\infty}). \quad (1.30)$$

Розв'язавши це рівняння відносно U_{∞} , одержуємо значення примусового переміщення підводного апарату (рис. 1.3):

$$U_{\infty} = (1 + m_0) \frac{V_{\infty}}{m_0 + M_0^{-1} M}. \quad (1.31)$$

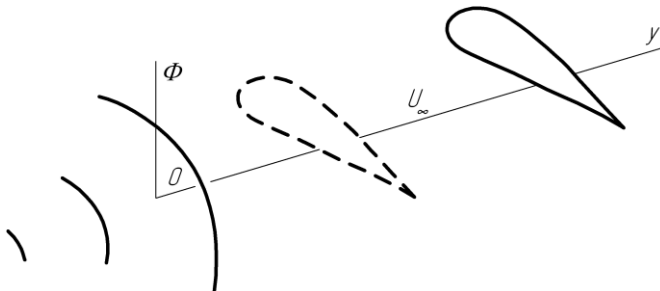


Рис. 1.3. Граничне переміщення підводного апарату під дією акустичної хвилі тиску

Таким чином, думка стосовно існування граничного значення переміщення (1.22) виявилася слушною, бо не приводить до протиріч з виразом (1.31) [11-12].

Висновки

Проаналізований випадок примусового переміщення підводного апарату можна розширити і розглядати об'єкт як абсолютно тверде тіло довільної геометричної форми. На відміну від розглянутого, буде мати місце не тільки поступальний рух, але і кутовий, відносно всіх трьох осей. Для шести невідомих, міркуючи аналогічно, можна побудувати лінійну алгебраїчну систему, коефіцієнти якої будуть залежати від 21 коефіцієнта приєднаних мас і статичних моментів мас.

Літературні джерела

1. Новожилов В. В. О перемещении абсолютно твердого тела под действием акустической волны давления // Прикл. матем. и мех. Т. XXIII. – Вып. 4, 1959. – С. 794 – 797. [Novozhilov, V.V. On the movement of an absolutely rigid body under the influence of an acoustic pressure wave. 1959, 4, 794–797. (In Russian)].
2. Слепян Л. Н. О перемещении деформируемого тела в акустической среде // Прикл. матем. и мех. Т. XXVII. – Вып. 5, 1963. – С. 918 – 923. [Slepyan, LN, On the Displacement of a Deformable Body in an Acoustic Medium, Prikl. mat. and fur. Т. XXVII. – V. 5, 1963. – С. 918 – 923(In Russian)].
3. Haywood J, H. Response of an elastic cylindrical shell to a pressure pulse. Quart. mech. and appl. math., vol. 11, part 2, 1958. – P. 181 – 187.
4. Вороненок Е. Я. О дифракции акустической волны давления на бесконечном круговом цилиндре // Механика, – М.: Изв. АН СССР №3, 1965. – С. 117 – 121. [Vorononok E. Ya. On the diffraction of an acoustic pressure wave on an infinite circular cylinder // Mechanics, - M.: Izv. USSR Academy of Sciences, №3, 1965. – С. 117 – 121 (In Russian)].
5. Замышляев Б. В., Яковлев Ю. С. Динамические нагрузки при подводном взрыве. –

Л.: Изд-во «Судостроение», 1967. – 197 с. [Zamyshlyayev B.V., Yakovlev Yu. S. Dynamic loads in an underwater explosion. - L.: Publishing house "Shipbuilding", 1967. – 197 p. (In Russian)].

6. Григолюк Э. И., Горшков А. Г. Перемещение жесткого цилиндра под действием акустической волны давления // Прикл. механика, 1968, 4, №10. – С. 1 – 5. [Grigolyuk, E.I. and Gorshkov, A.G., Displacement of a rigid cylinder under the action of an acoustic pressure wave, Prikl. Mechanics 1968, 4, №10. – С. 1 – 5 (In Russian)].

7. Григолюк Э. И., Горшков А. Г. Нестационарные колебания при ударе в акустической среде // Переходные процессы деформации пластин и оболочек. Таллин, ЦБТИ ЭССР, 1967. – С. 37 – 45 [Grigolyuk E.I., Gorshkov A.G. Non-stationary vibrations at impact in an acoustic medium. Transitional processes of deformation of plates and shells. Tallinn, TsBTI ESSR 1967. – p. 37 – 45 (In Russian)].

8. Karachun V.V., Mel'nick V.N., Korobiichuk I., Nowicki M., Szewczyk R., Kobzar S. (2016). The Additional Error of Inertial Sensors Induced by Hypersonic Flight Conditions. Sensors, 16 (3), 299; doi: 10.3390/9 16030299.

9. Korobiichuk I., Karachun V., Mel'nick V., Kachniarz M. (2017). Modeling of the hypersonic conditions influence on the gyroscopic inertial navigation sensor suspension. Metrol. Meas. Syst., Vol. 24 (2017), No. 2, pp. 357–368. doi: 10.1515/mms-2017-0024

10. Korobiichuk I., Karachun V., Mel'nick V., Asaftei O., Szewczyk R. (2018). The three-measurable problem change of coordinates functions of floater suspended in acoustic environment. 17th International Conference on Applied Mathematics APLIMAT 2018, pp. 621- 632.

11. Melnik V., Ladogubets N. Wave problems in acoustic media. Korneichuk: Kiev, 2016, 432 p. [in Russian]

12. Karachun V.V., Melnyk V.M. Tasks of accompanying and masking moving objects. Korniychuk: Kyiv, 2011, 264 p. [in Russian]

УДК 623.1/7

Мельник Вікторія Миколаївна

*Доктор технічних наук, професор кафедри біотехніки та інженерії
Національний технічний університет України
"Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського"*

Бойко Галина Володимирівна

*кандидат технічних наук, провідний фахівець відділу вченого секретаря
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»*

Бойко Олена Федорівна

*Інженер I категорії,
Український науково-дослідний інститут спеціальної техніки
та судових експертиз служби безпеки України*

Mel'nick V.M.

doctor of technical sciences, professor,
Head of the Department of bioengineering and biotechnics,
National Technical University of Ukraine
"IGOR SIKORSKY KYIV POLYTECHNIC INSTITUTE"

Boiko G.V.

candidate of technical sciences,
leading specialist of the department of the scientific secretary
National Technical University of Ukraine
«Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»

Boiko O.F.

Category I Engineer, Ukrainian Research Institute of Special Equipment and Forensic Science of the
Security Service of Ukraine

MODERN DREAMS. PLANNING FIREPLACES

Анотація. Здійснюється аналіз сучасних темпів розвитку гіперзвукових технологій для засобів виведення космічних апаратів на навколосезні орбіти, а також для безпілотних систем озброєння, що уособлюють як ударні властивості, так і розвідувальні функції. З метою більш глибокого усвідомлення стратегічної важливості технологій на базі прямооточних повітряно-реактивних двигунів, фрагментарно висвітлений вражаючий уяву шлях досягнень авіаційно-космічної техніки з огляду на деякі визначні ознаки історії її становлення. Представлена стаття аналізує актуальну проблему – підвищення певності, надійності і точності визначення і класифікації рухомої цілі автономними засобами літальних апаратів, що знаходяться на бойовому чергуванні. Результати досліджень охоплюють особливості стартових позицій і функціонального діяння на бойовому чергуванні літальних апаратів різного класу і засобів базування і здатні слугувати надійним науковим підґрунтям вдосконалення бойової техніки на гіперзвукових технологіях.

Summary. An analysis of the current pace of development of hypersonic technologies for the means of launching spacecraft into Earth orbit, as well as for unmanned weapons systems, which embody both impact properties and reconnaissance functions. In order to better understand the strategic importance of technologies based on direct-flow jet engines, fragmentary coverage of the impressive path of achievements of aerospace technology, given some of the highlights of the history of its formation. The presented article analyzes the current problem - increasing the reliability, reliability and accuracy of the definition and classification of moving targets by autonomous means of aircraft on combat duty. The results of the research cover the features of the starting positions and functional action on the combat duty of aircraft of different classes and bases and are able to serve as a reliable scientific basis for improving military equipment on hypersonic technologies.

Ключові слова: гіперзвукові технології, безпілотні системи озброєння, балістичні ракети, безпілотні ЛА, крилата ракета

Keywords: hypersonic technologies, unmanned weapons systems, ballistic missiles, unmanned aerial vehicles, cruise missiles

Вступ

Аналітики і спеціалісти стверджують, що держава, яка в змозі першою в світі забезпечити серійне виробництво високоточних гіперзвукових ракет, створить тим самим для себе вирішальну перевагу в світі. Перш за все, в стратегічному масштабі. Пояснення цьому факту полягає в тому, що ракети, які рухаються із швидкістю 7 М практично невразливі для сучасних засобів ППО. Самі ж, в той же час, здатні знешкодити захищені за останнім словом техніки не тільки наземні, але і підводні об'єкти. За своїм потенціалом, гіперзвукову зброю можна порівняти тільки з тактичними ядерними боеприпасами.

Сполучені Штати Америки розробляють гіперзвукові літальні апарати у вигляді крилатої ракети, тобто із власним двигуном, як правило, це гіперзвуковий прямооточний повітряно реактивний двигун, або у вигляді планіруючого снаряду, гіперзвукову швидкість якому надають маршеві ступені звичайних балістичних ракет.

Очевидно, що в недалекому майбутньому надійні гіперзвукові технології на основі ГППРД з часом посядуть своє місце не тільки в оборонній промисловості США, але і в інших країнах світу. Пентагон твердо дотримується позиції щодо перспективності розробки гіперзвукових систем зброї, здатності гіперзвукових технологій в забезпеченні воєнного домінування США при вирішенні загальнонаціональних задач у сфері безпеки.

Гіперзвуковий політ на швидкості 20 М дозволяє доставити корисний вантаж за одну годину в будь-яку точку планети [1].

Остаточною метою програми ІН слугує доведення до придатного у серійному виробництві рівня технологій гіперзвукового польоту. Внаслідок цього, американські військові отримають зброю глобального удару з неймовірною дальністю стрільби – у 37 тисяч кілометрів. Це надасть можливість США наносити удари зі своєї території по об'єктам, які знаходяться

в будь-якій точці *Землі*. При цьому слід зауважити, що ніякі засоби сучасних систем ППО не здатні уразити ракету, яка летить із швидкістю *20 М*. За винятком лазерів на вільних електронах – FEL.

Окрім *США*, масштабну їх розробку на цей час ніхто не веде.

Аналіз літературних даних

Коли, 21 липня 2011 року, була офіційно закрита програма *Space Shuttle*, разом з нею закінчилась не тільки ера *пілотуємих* орбітальних човників, але і, в певному сенсі, ціла епоха крилатої романтики, відома безліччю спроб обернути літак в дещо більше, ніж власне літак.

Перші спроби установки на крилату машину ракетного двигуна відносяться на кінець 20-х років попереднього століття. Ракетопланом був також і *X-1* (1947 рік) – перший в історії пілотуємих літальний апарат, який подолав швидкість звука. Його фюзеляж мав форму збільшеної кулеметної кулі калібру *12,7 мм*, а ракетний двигун спалював в своїй камері звичайний спирт за допомогою рідкого кисню [2, 3].

Пряматір'ю усіх крилатих ракет можна вважати ракету *V-1* з пульсуючим повітряно-реактивним двигуном. Ойген Зінгер мріяв про наддалекий антиподний ракетоплан-бомбардувальник. Вольф Тромсдорф – віддавав перевагу стратегічній крилатій ракеті з прямооточним двигуном. Після війни, по обидві сторони “залізної завіси”, були скопійовані ракети *V-1* і *V-2* *Германської* розробки. Американцям завжди був більш любим авіаційний підхід, що у підсумку і стало однією з головних причин початкового відставання *Америку* у сфері балістичних технологій. І це незважаючи на присутність самого Вернера фон Брауна [4].

Саме з цієї причини, і саме в *США*, була побудована фактично перша, і єдина з прийнятих коли-небудь на озброєння, крилата ракета *SM-62 Snark* з міжконтинентальним радіусом дії у *10000 км*. Будували її в стінах корпорації **NORTHROP**: фактично, вона була безпілотним літаком. Дещо раніше був похований другий проект, *SM-64 Navaho* – надзвукова крилата ракета міжконтинентального радіуса дії у *6500 км* [5].

Безпілотні апарати

Для захисту територіальних рубежів держави і прилягаючої акваторії на сьогоднішній день слугують балістичні, міжконтинентальні та космічні ракети різного класу і засобів базування, атомний підводний флот, а також ракетні війська стратегічного призначення. Сучасні ракети-носії (РН), як відомо, здатні доставити засоби ураження в будь-яку точку земної кулі не тільки з великою точністю, але і за мінімально припустимий час.

Балістичні ракети. Балістичними ракетами (БР) під час польоту управляють інерціальні або радіо-інерціальні системи. Найбільш надійними слід вважати перші, оскільки тільки вони володіють вирішальною перевагою – *автономністю*. Ця якість дозволяє реалізувати одночасний запуск великої кількості ракет, забезпечує достатню

ступінь незалежності стартових позицій і, крім того, підтримує високу боєздатність і надійність апаратів, які знаходяться на бойовому чергуванні – тактична палубна авіація (ТПА), стратегічна бомбардувальна авіація (СБА), корабельні зенітні ракетні комплекси (наприклад, класу “*Форт*” з 64 ракетами С-300), крейсерів з газотурбінним двигуном ракетних установок класу “*Базальт*” з крилатими ракетами *П-500* (надточна стрільба в радіусі *500 км*), а також безпілотних літальних апаратів (автономних роботів), важкого, середнього і легкого класів, роботів-саперів (*Mini-Andros*), нарешті, дистанційно керованих апаратів. Для задач *військової розвідки*, розмінування акваторії, ураження живої сили в зоні воєнних конфліктів і таке інше, все більше застосування знаходять роботи.

Багатоцільові мобільні платформи. Однією з основних задач, що вирішує система управління *багатоцільовою мобільною платформою*, є вимагаєма точність *позиціонування* автономного апарату. Структура режиму позиціонування завбачає визначення трьох лінійних координат керованого об'єкту відносно *географічної області* його застосування і трьох кутових координат, за які відповідає система стабілізації з гіроскопів (*gyro*), або акселерометрів.

Безпілотні літаючі апарати. Особливе місце серед авіаційних автономних технічних засобів посідають багатороторні плоскі багатоцільові повітряні платформи (*імперери*) – безпілотні літальні апарати (БПЛА), які призначені для розташування на них спеціальної спостережної апаратури – радарів, лідарів, фотоапаратів, відеокамер тощо, або ж доставки негабаритних вантажів на велику відстань.

Не можна залишити без уваги також *новий тип озброєння* на основі БПЛА – це *безпілотники-камікадзе*. Компанія **MBDA** ознайомила зі зброєю, яка створена відповідно до концепції розвитку перспективних безпілотних систем озброєння, які поєднують у собі як ударні, так і розвідницькі функції. Ці зразки надійдуть в серійне виробництво на протязі найближчих 20 років. Як стверджують аналітики, *безпілотники-камікадзе* в певному сенсі сформуєть обличчя війн майбутнього [5].

На сьогодні, розроблені боеприпаси для БПЛА, які діють із середніх висот – *MALE*. Такі апарати, з часом, постануть основою вогневої підтримки сухопутних військ і будуть в змозі забезпечити блискавичне нанесення ударів, частково посунувши на задній план артилерію і важкі реактивні *пілотуєми* винищувачі. Перевагою такого озброєння слід вважати відсутність складного керування і необхідності поточного контролю. Військовослужбовцю досить вказати БПЛА *ціль* і *безпілотник-камікадзе* знищить її за допомогою багатоцільової БЧ (Бойової частини).

Так, зброя *Vigilus* містить пульт керування системою, боекомплект і пускову установку *Armatus*, яка здатна поєднати різні комбінації малих, середніх і великих боеприпасів. Пускова

установка оснащена бездротяною системою трансляції інформації, що суттєво розширює можливості використання системи *Vigilus*. Система *Vigilus* являє собою нове покоління зброї, яка забезпечує виявлення та ідентифікацію цілі за допомогою тільки однієї платформи і в найкоротший термін [6]. Наприклад, малопримітний боеприпас *Caelus* (рис. 1). Цей

безпілотний розвідник, масою до 100 кг і довжиною 1,8 м, з розмахом крил до 2 м, забезпечений електродвигуном і може на протязі 2 годин таємно баражирувати (від франц. *barrage*) над ціллю. Наявність багаторежимного детонатора дозволяє уражати різні цілі, в тому числі бронетанкову техніку і живу силу супротивника.



Рис. 1. Боеприпас *Caelus*

Мініатюрний планіруючий боеприпас *GLADIUS* має масу всього у 7 кг, а довжину 0,8 м. Його можна оснастити електронно-оптичною апаратурою, або БЧ, масою до 1 кг.

Після пострілу з пускової установки, *GLADIUS* розгортає крила і здатен без допомоги двигуна планувати на відстань до 30 км. Пускова

установка *Armatus* може нести до чотирьох боеприпасів *Gladius* та ще один *Caelus* (рис. 1), (рис. 3). Для керування пусковою установкою і боеприпасами, військовослужбовці використовують стандартний пульт керування, який зв'язаний з перешкодостійкою навігаційною системою *GNSS* (рис. 2).



Рис. 2. Пульт керування системою *Vigilus*

Провідні російські розробники авіаційної техніки почали підготовку багатоцільового БПЛА, який придатен не тільки для зовнішньої розвідки і спостереження, але і в змозі наносити авіаудари. В

2007 році на авіасалоні "МАКС-2007" демонструвався перший російський безпілотник *Скат* РСК "МиГ". *Скат*, як і



Рис. 3. Мініатюрний планіруючий боєприпас Gladius

X-47B, являє собою яскравий приклад важкого ударного літака майбутнього (рис. 4). В середині його фюзеляжу містяться два відсіки для важких керованих ракет і високоточних бомб масою 250-500 кг. Такі БПЛА візьмуть на себе важку і небезпечну роботу по знищенню особливо важливих цілей в глибині оборони супротивника, а

також на передньому краї – систем ППО, промислових об'єктів, пускових установок балістичних ракет і таке інше. Довготривалість польоту, потужна зброя ураження і відсутність пілота забезпечують атаку не тільки з великої відстані, але і без ризику для атакуючого.



Рис. 4. Реактивний БПЛА Скат

І головне – безпілотники знаходяться у повітрі набагато довше, ніж будь-який пілотований літак (адже оператори можуть працювати змінюючи один одного). Це означає, що з точки зору тактики бою, над супротивником безперервно знаходиться і слідкує за ним “недрімотне око” безпілотної машини. Таким чином, за один тільки виліт MQ-9 Reaper в змозі уразити більше цілей, ніж, наприклад, A-10C. Особливо в умовах асиметричної війни, коли супротивника слід вистежувати на протязі багатьох годин. Ця машина

добре зарекомендувала себе не тільки під час бойових дій в Іраку і Афганістані, але і в полюванні за терористами по усьому світу.

Безпілотник за назвою Дозор-600 був уперше представлений на авіасалоні “МАКС-2009”. Він дуже схожий на американський апарат MQ-9 Predator – 720 кг та 512 кг. “Сокол” має схожий проект – БПЛА Данхем (маса 500 кг, корисний вантаж 100 кг, тривалість польоту – 15 годин) (рис. 5).



Рис. 5. Безпілотники масою менш 1000 кг, які схожі на Дозор-600

MQ-9 Predator вибором звання наднадійного БПЛА, відмінно проявив себе в Іракській і Афганській війнах. Разом з тим, слід констатувати, що на теперішній час він, все ж таки, морально постарішав і його можливості уявляються як недостатні для сучасного бою. Перш за все, це стосується боекомплекта, який містить дві ракети *AGM-114 Hellfire*. Цього рішучим чином недостатньо при тривалості польоту у *40 годин*. В ході бойових дій, *Predators* неприпустимо часто втрачали важливі *цілі* зважаючи на незначний боекомплект, тому оператори або намагалися “притримати” ракети для більш важливої *цілі*, або витрачали свій боеприпас ще задовго до закінчення часу патрулювання. Новий російський БПЛА,

скоріш за все, буде схожим на більш великий американський БПЛА *MQ-9 Reaper* (рис. 6). Ця машина має відносно простий і дешевий турбогвинтовий двигун і може без дозаправки знаходитись в повітрі всі *24 години*. Здатна нести протитанкові ракети *Hellfire*, *250-кілограмові* бомби *GBU-12*, *GBU-38* і ракети класу повітря-повітря *AIM-9*. Використання таких літаків, завдяки їх дешевизни, повністю виправдане. Незважаючи на відносно невисоку швидкість, *Reaper* здатен виконувати запит на вогневу підтримку все ж набагато швидше реактивного винищувача. Пояснення цьому, на перший погляд дуже протиречивий, тезі полягає в тому, що *Reaper* висить над полем бою цілу добу.



Рис. 6. Американський MQ-9 Reaper I

Немає сумніву в тому, що армії ударний БПЛА, безумовно, потрібен. І, перш за все, для реалізації заходів контртерористичної ідеології. Нарешті, в конфліктах невисокої інтенсивності, де безпілотники стають головним засобом боротьби з мінуванням доріг, засідками і таке інше. Майбутнє вимальовується у створенні цілковито автоматизованих військових систем, як набагато швидкодіючих і більш надійних, ніж живий солдат.

Прийнято вважати, що під час “дійсної”, а не партизанської війни, безпілотники посиплюються на землю після натиснення на “чарівну” кнопку станції радіоелектронної боротьби РЕБ. Насправді ж, бойові БПЛА лише частково страждають від перешкод сигналам *GPS*. Зв'язок з БПЛА здійснюється через супутниковий канал, а його заглушити складно. Нарешті, у тому випадку, коли сигнал *GPS* згайаний, безпілотник буде продовжувати виконання своєї місії, або

повернеться на базу, але тільки під безпосереднім управлінням оператора.

Таким чином, великі і середні БПЛА все гостріше і наполеглише вимагають сучасних технологій супутникового зв'язку (рис. 7).

Для цього, безпілотники підключаються до систем автоматизованого планування і підтримки місії ВПС (AFMSS) шляхом підключення до тактичної лінії зв'язку, наприклад, *L-3*, а на майбутнє – до єдиної автоматизованої мережі *Heterogeneous Air borne Reconnaissance Team* (HART). Всі ці технології зроблять БПЛА досить стійким проти електронних засобів боротьби.

До того ж, паралельно здійснюється розробка сучасних інерціальних навігаційних систем. В першу чергу, на мікрогіроскопах, які в змозі частково, або цілком, замінити супутникові датчики *GPS Ku-діапазону*, які підвладні штучним перешкодам [7].



Рис. 7. Великі і середні БПЛА

Побудові автономних навігаційних систем, які б не залежали від сигналів супутників, починає приділятися все більша увага.

Пентагон працює над низкою проєктів по створенню мікросупутників. Наприклад, в проєкті *See Me* передбачається оперативне виведення на орбіту цілого рою дешевих наносупутників, які в змозі забезпечити зв'язок з БПЛА і наземними військами. Для цього, до речі, можна залучити і безпілотний *шаттл X-57B*.

Турбогвинтові БПЛА, як відомо, недостатньо захищені від засобів ППО та винищувачів – це загальновизнаний факт. Частково цю проблему, зокрема, захист від зенітних ракет, вирішують системи РЕБ і *пастки* – ракети-приманки класу *MALD* та буксируємі апарати класу *ALE-50*. Останні досить добре себе виявили під час операції НАТО на *Балканах*. Пілотуємі літаки американських ВПС спільно з *ALE-50*, за словами американських військових, з успіхом відвертали на себе десятки зенітних ракет.

Стосовно захисту від винищувачів, так перевага *пілотуємих* реактивних літаків над незграбними гвинтовими БПЛА окреслює проблему не так однозначно, як хотілось би. Не всім відомо, але БПЛА вже приймали участь у повітряних боях. Мова йде про *MQ-1 Predator*, який американці використовували ще в 2002 році, тобто ще до другої Іракської війни, для нагляду за територією *Іраку*. Іракські льотчики деколи уражали безпілотники, саме тоді, коли патрульні літаки залишали шпаринку в охороняємій зоні. Так, іракський льотчик на *MuГ-25* уразив *MQ-1 Predator*. Наступного разу, в такій же ситуації, у відповідь на атаку *MuГ-25* безпілотник запустив свою ракету *Stinger* класу “*Повітря-Повітря*”. І тільки завдяки більш потужним двигунам, *MuГ-25* вдалося уникнути неприємностей, але *Predator* все ж було уражено.

На теперішній час, БПЛА *MQ-9 Reaper* штатно озброєні ракетами класу “*AIR to AIR*” *ATM-9*, які призначені не тільки для оборони, але також для знищення гелікоптерів. За необхідності, важкі БПЛА, наприклад, *X-47B*, можуть бути озброєні потужними ракетами. Зокрема, *AIM-120*.

Перші прототипи російських ударних безпілотників надійдуть на озброєння армії вже у 2020 році.

Небесні штигуни. Командування військово-повітряними силами *США* опрацювало Концепцію розвитку безпілотних літальних апаратів на наступні 25 років [8]. Вона, як зазначається, в американських засобах масової інформації, окреслює шляхи розвитку і інтеграції технології формування цього сектору авіації. Докладна назва Програми – *The U.S. Air Force Remotely Piloted Aircraft and Unmanned Aerial Vehicle Strategic Vision* (“Перспективи розвитку дистанційно керованих і безпілотних літальних апаратів з точки зору ВПС *США*”). Ця Програма окреслює головні напрямки науково-дослідних і дослідницько-конструкторських робіт в даній сфері.

Народження цього документа, як прийнято вважати в Пентагоні, вже давно назривало. Дійсно, тільки в небі над *Іраком*, за даними газети “*The New York Times*”, діють близько 700 БПЛА різних конструкцій. Як висловився журналіст цієї газети, небо над *Іраком* буквально переповнене літаючими роботами. Найбільш поширеними безпілотниками, як сповіщає газета, є “*Global Hawk*”, “*Predator*”, “*Hunter*”, “*Pioneer*”, “*Shadow*”, “*Dragon Eye*”, “*Raven*”. Всі вони, без винятку, використовуються для збирання розвіданих. Найбільший політний час набрав “*Predator*”(рис. 2.8). Цей БПЛА має змогу знаходитися в повітрі на протязі 24 *годин*. Висота польоту становить 3-4,5 *км*, крейсерська швидкість досягає 120 *км/год*. За необхідності, його можна укомплектувати ракетами “*Hellfire*”, що створить умови для знищення будов, укріплень, автомобілів та живої сили по наказу оператора.

Характерно, що Пентагон прийняв рішення збільшити у п'ять разів флот БПЛА “*Predator*” виробництва компанії **GENERAL ATOMICS AERONAUTICAL SYSTEMS** і довести наявний склад до 12 ескадрилій. До речі, на сьогодні у ВПС *США* нараховується тільки три таких підрозділи.

Кожний військовий підрозділ цих апаратів містить наземні комплекси управління, супутникові системи та інше коштовне обладнання, без якого БПЛА не в змозі з успіхом вирішувати тактичні задачі на марші.



Рис. 8. Безпілотний літальний апарат “*Predator*”, USA

Висота польоту апаратів класу “*Global Hawk*” досягає 18 км. Це важкий розвідник, укомплектований сучасним обладнанням, зокрема, радаром, електронно-оптичною та інфрачервоною камерами, має ширококутовий супутниковий канал зв'язку, а також канал зв'язку в зоні прямої видимості. Хоча в Іраку використовується всього один БПЛА такого класу, “*The New York Times*” упевнена, що цього досить, бо апарат орієнтований на стратегічну розвідку.

Інші безпілотники, які знаходяться на службі морських піхотинців і армії, мають більш скромні характеристики. Це невеликі машини, які літають на висоті від декількох сотень метрів до двох кілометрів, а стартують з аеродромів чи з площадок мобільного базування. Самий маленький з існуючих “іракських” безпілотників має в довжину не більше одного метра. І все ж, американці переконані, що він надто помітний над полем бою. Тому вже декілька компаній приступили до побудови надмалих БПЛА. Один з них, “*Wasp*”, почали випробовувати у відкритому морі неподалік від акваторії каліфорнійського узбережжя. Тридцятидвох-сантиметровий апарат важить усього 0,2 кг, його можна запускати з руки людини. Його оснащення забезпечується двома мініатюрними відеокамерами, які збирають інформацію і транслюють її оператору в реальному часі. Літаючий робот “*Wasp*” є продукцією компанії **AEROVIRONMENT**. Але це не перший мініатюрний літак-розвідник, який створено в США. Агентство передових досліджень Пентагона (DARPA) розпочало реалізацію Програми створення подібних апаратів ще в середині 90-х років минулого століття. В рамках цієї Програми фірма **AEROVIRONMENT** побудувала 15-сантиметровий літак “*Black Widow*”.

Компанія **AEROVIRONMENT** повідомила про успішні випробування важкого броньованого

ударного безпілотника для боїв на території населених пунктів. Його озброєння складає ПТКР класу “*AGM-114K Hellfire*”, “*Hidra-70*”, а також кулемет М 134 калібру 7,62 мм.

Одним з нових напрямків подальшого розвитку БПЛА править створення літаків-винищувачів. На сьогодні, у 32 державах світу розроблюють більше 250 безпілотних літаків, причому найбільш активним тут є *Kumail*. Приймаючи до уваги небезпеку такої армади літаючих роботів, Агентство передових досліджень Пентагону почало створення зброї протидії таким апаратам. Робоча назва проекту – “**Peregrine UAV Killer**”. Основу системи оборони проти БПЛА становить дешевий, невеликого розміру, літальний апарат. Його достоїнство полягає в здатності ліквідувати будь-який безпілотний апарат супротивника.

Агентство також курирує роботи з реалізації безпілотного гелікоптера в рамках масштабного проекту “**Unmanned Combat Armed Rotocraft**”. Із своїми концепціями ознайомили спеціалістів американські авіакорпорації **LOCKHEED MARTIN, NORTHRUP GRUMMAN**. В рамках Програми створення робокоптера “*Vigilante*” зовсім недавно здійснені пробні пуски ракет.

Ще одним проектом безпілотного гелікоптера є найновіша розробка корпорації **BOEING** на основі модернізації існуючого *AH-6J “Little Bird”* до безпілотного варіанта. Аналогічний проект по перетворенню пілотної машини в робокоптер “*UH-1 Huey*” близький до стадії пробних ракетних пусків. Він, як і сподівалося, оснащений управляємими ракетами “*Advanced Precision Kill Weapon System*”.

Нарешті, на стадії завершення цілком екзотичний літальний апарат. Компанія **TRITON SYSTEMS** розробила концепцію безпілотних літальних апаратів форми і розмірів звичайної

літаючої тарілки. Слід відзначити, що перша бойова “тарілка” була винайдена ще у 1948 році конструктором Уолтером Моррісоном. Сучасна бойова “тарілка” поки що іменується **Модулярним дискокрилим озброєнням для дії у міських умовах**. Передбачається, що завдяки своїй формі, цей БПЛА буде в змозі проникати у підвальні приміщення, а також у щілини, де ховається супротивник, і атакувати його за допомогою мікробомб. Аеродромом цих “тарілок” може слугувати пристрій для запуску, наприклад, мішеней при спортивній стрільбі.

Відзначивши безумовні достоїнства безпілотників, слід звернути увагу на одну їх

суттєву ваду – літаючі апарати в руках терористів можуть обернутися на “роботів-камікадзе”.

Разом з тим, заходи по запобіганню цієї небезпеки в змозі забезпечити вимагаєму санкціонованість [9].

Бойові роботи. Літаючий підводно-наземний робот-скакун. Функціональна оснащёність багатоцільового бойового робота майбутнього передбачає його рух у повітрі, під водою, по морському дну, по суші, плюс подолання різних перешкод. Він в змозі ефективно виконувати бойову задачу в різних природних і кліматичних умовах.



Рис. 9. Плигаючий робот Sand Flea
розробки компанії **BOSTON
DYNAMICS**

На думку спеціалістів **SANDIA NATIONAL LABORATORIES**, багатоцільові роботи, здатні літати, плавати, рухатися по землі і навіть плигати, будуть в повній мірі необхідними в армії і порятункових службах. В **SANDIA NATIONAL LABORATORIES** вже розроблена безліч подібних систем, наприклад, плигаючого робота. (рис. 9).

Малопомітний БПЛА здатен подолати великі відстані повітрям, потай підбиратися до берегової лінії супротивника під водою, наблизитися до наземних об'єктів на колесах і, до того ж, плигати через огорожі та у вікна будівель.

Нова безпілотна система, яка виконується в рамках концепції **Multi-Modal Vehicle Concept**,

буде володіти широкими можливостями з точки зору її мобільності. Типова місія такого робота, наприклад, з метою зовнішньої розвідки на узбережжі, буде виглядати наступним чином. З борту корабля, літака, БПЛА чи з аеродрому, запускається безпілотний літальний апарат (рис. 10). На підльоті до означеної в польотному завданні частині акваторії, де БПЛА може бути вже виявленим, робот пірнає під воду (рис. 11). Крила разом з рушієм, виконавши свою задачу, відділяються, вивільняючи герметичний обтікаємий корпус з “ластами” для безшумного руху під водою.

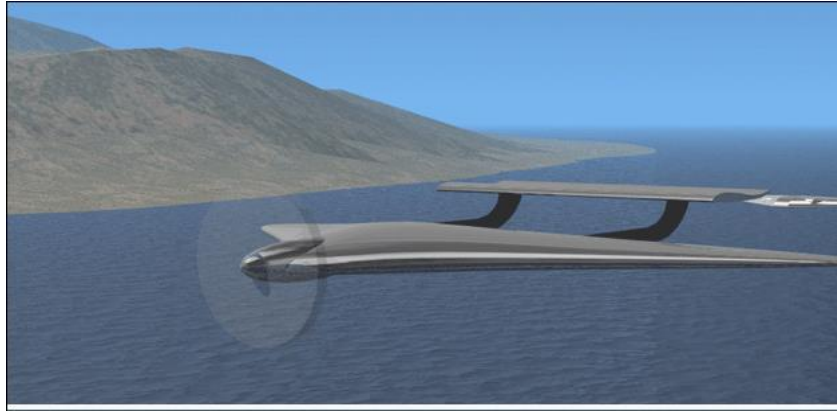


Рис. 10. Літак-носій з бойовим роботом на борту

Робот підпливає до берегової лінії упитул, за необхідності збираючи інформацію про рельєф морського дна, мінних загороджень і т.п. На глибині кількох десятків сантиметрів робот скидає “ласти” і вивільняє колеса для руху по будь-якому профілю поверхні, в тому числі і по піску і суходолу (рис. 12). Робот оснащений також спеціальним пристроєм, яке дозволяє подолати у прижку перешкоду висотою до *10 метрів*, перескакувати через паркани, автомобілі та інші перешкоди. Вся місія може виконуватися

автономно в програмному режимі, або в напівавтоматичному чи ручному режимі, під безпосереднім управлінням оператора. Перевага концепції **Multi-Modal Vehicle** окреслена відсутністю необхідності координації підрозділів безпілотних літальних, підводних і сухопутних роботів різних виробників з несхожими системами зв'язку і засобами доставки. Очевидно, що подібна координація потребує значних засобів, старанного планування та ювелірної точності виконання.

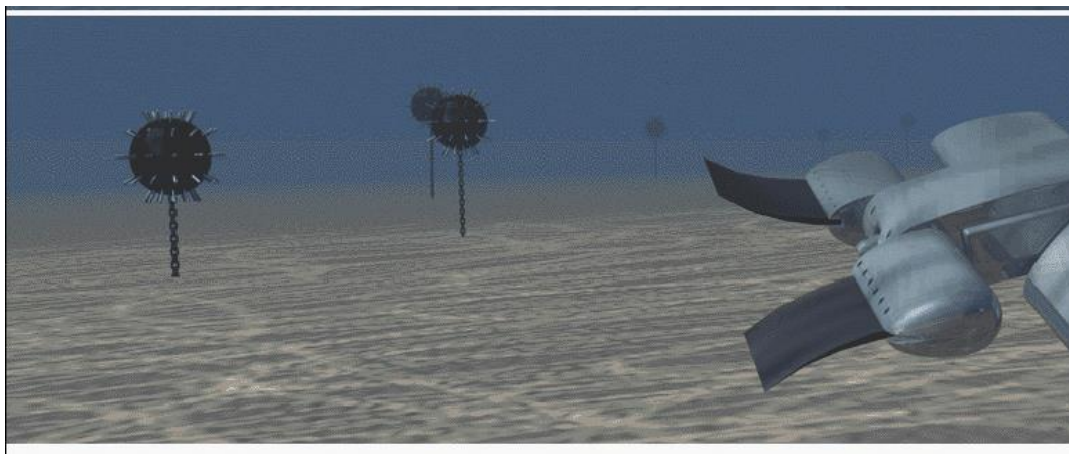


Рис. 11. Пересування робота під водою

І, все ж таки, залишається неприпустимо високою вірогідність порушення стикування і виникнення позаштатних ситуацій.

Універсальний робот здатен виконати місію від початку до кінця, спираючись на можливості адаптації до зміни зовнішніх умов. Подібний робот ідеально підходить для виконання розвідувальної та диверсійної акцій в умовах суворої таємниці.

Одноразове використання робота є головним недоліком наведеної концепції. Робот буде відкидати непотрібні компоненти своєї конструкції під час виконання бойової задачі у такий спосіб, який виключає не тільки їх виявлення, але і поновлення.

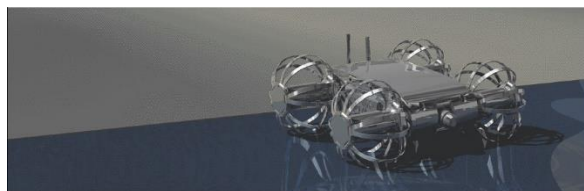


Рис. 12. Рух робота по ґрунту і по суходолу

В SANDIA NATIONAL LABORATORIES виконане обмежене тестування концептуального обладнання нового робота. Однак, вже на цей час, спеціалісти стверджують, що концепція зріла і може бути реалізована із залученням сучасних технологій [10].

Висновки

Представлена стаття обіймає широке коло питань навігації керованих і безпілотних літальних апаратів які рухаються з надзвуковими швидкостями. Приділяється увага аналізу сучасного стану глобальних і регіональних навігаційних систем, їх переваг і вад для експлуатації апаратів різних класів і засобів базування. ґрунтовно освітлені набираючі сил гіперзвукові технології на основі гіперзвукових прямих повітряно-реактивних двигунів, досягнення окремих держав у встановленні цієї перспективної галузі.

Безсумнівні достоїнства надзвукового руху знаходяться в діалектичній єдності із породженими ним проблемами навігації і керування рухом. Це і вібрація, і висока температура, і ударна хвиля та інші чинники. Автори зосереджують увагу на пружній взаємодії проникаючого акустичного випромінювання з бортовою апаратурою, зокрема, з інерціальними приладами в поплашковому виконанні.

Літературні джерела

1. Новый тип оружия: беспилотник-камикадзе [Электронный ресурс] // [https://vpk.name/news - Режим доступа: \www/URL: https://vpk.name/news/72311_novyii_tip_oruzhiya_be_spilotnikkamikadze.html](https://vpk.name/news-Режим_доступа:\www/URL:https://vpk.name/news/72311_novyii_tip_oruzhiya_be_spilotnikkamikadze.html). [A new type of weapon: a kamikaze drone [Electronic resource] (in Russian)] Режим доступа: \www/URL: https://vpk.name/news/72311_novyii_tip_oruzhiya_be_spilotnikkamikadze.html.
2. Левкевич М. Ударный беспилотник: чем Россия ответит врагам? [Электронный ресурс] // [https://zoom.cnews.ru/rnd/article/item - Режим доступа: \www/URL: https://zoom.cnews.ru/rnd/article/item/udarnyy_bespilotnik_chem_rossiya_otvetit_vragam](https://zoom.cnews.ru/rnd/article/item_Режим_доступа:\www/URL:https://zoom.cnews.ru/rnd/article/item/udarnyy_bespilotnik_chem_rossiya_otvetit_vragam). [Levkevich M. Strike drone: how will Russia respond to its enemies? [Electronic resource] [(in Russian)] // [https://zoom.cnews.ru/rnd/article/item - Режим](https://zoom.cnews.ru/rnd/article/item_Режим_)

доступа: \www/URL: https://zoom.cnews.ru/rnd/article/item/udarnyy_

3. Karachun V.V., Mel'nick V.N., Korobiichuk I., Nowicki M., Szewczyk R., Kobzar S. (2016). The Additional Error of Inertial Sensors Induced by Hypersonic Flight Conditions. *Sensors*, 16 (3), 299; doi: 10.3390/9 16030299.

4. Korobiichuk I., Karachun V., Mel'nick V., Kachniarz M. Modeling of the hypersonic conditions influence on the gyroscopic inertial navigation sensor suspension. *Metrol. Meas. Syst.*, Vol. 24 (2017), No. 2, pp. 357–368 (2017) DOI: 10.1515/mms-2017-0024

5. Korobiichuk I., Karachun V., Mel'nick V., Kachniarz M. Modeling of the hypersonic conditions influence on the gyroscopic inertial navigation sensor suspension. *Metrol. Meas. Syst.*, Vol. 24 (2017), No. 2, pp. 357–368 (2017) DOI: 10.1515/mms-2017-0024

6. Korobiichuk I., Karachun V., Mel'nick V., Asaftei O., Szewczyk R. The three-measurable problem change of coordinates functions of floater suspended in acoustic environment. 17th International Conference on Applied Mathematics APLIMAT 2018, pp. 621- 632.

7. Melnik V., Ladogubets N. Wave problems in acoustic media. Korneichuk: Kiev, 2016, 432 p. [in Russian]

8. Тимошенко, В. И. Использование гиперзвуковых технологий при создании перспективных транспортных систем [текст] / В. И. Тимошенко, В. П. Гусынин // Космична наука і технологія. – 1999. – Т. 5, № 1. – С. 78 – 89. Timoshenko, V. I. The use of hypersonic technologies in the creation of promising transport systems [text] / [V. I. Timoshenko, V. P. Gusynin // *Cosmic science and technology*. - 1999. - T. 5, No. 1. - S. 78 - 89. (in Russian)]

9. Karachun V.V., Melnyk V.M. Tasks of accompanying and masking moving objects. Korniychuk: Kyiv, 2011, 264 p. [in Russian]

10. Летающий подводный наземный робот-прыгун [Электронный ресурс] // [https://zoom.cnews.ru/rnd/news/top - Режим доступа: \www/URL: https://zoom.cnews.ru/rnd/news/top/letayushhiy_podvodnyy_nazemnyy_robotпрыгун/print](https://zoom.cnews.ru/rnd/news/top_Режим_доступа:\www/URL:https://zoom.cnews.ru/rnd/news/top/letayushhiy_podvodnyy_nazemnyy_robotпрыгун/print). [Flying underwater ground robot-jumper Режим доступа: \www/URL: https://zoom.cnews.ru/rnd/news/top/letayushhiy_podvodnyy_nazemnyy_robotпрыгун/print (in Russian)].

ANALYSIS OF LOW-TEMPERATURE EXPANSION PROCESSES OF NON-IDEAL GASES

Хабибова Наталья Замиловна

к.т.н., доцент кафедры процессов и аппаратов химической технологии
Российского химико-технологического университета
имени Д.И. Менделеева, г. Москва, Россия

АНАЛИЗ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ПРОЦЕССОВ РАСШИРЕНИЯ НЕИДЕАЛЬНЫХ ГАЗОВ

DOI: 10.31618/ESSA.2782-1994.2021.2.75.161

Abstract. An energy analysis of the processes of obtaining and using artificial cold in chemical technology is presented. The most well-known methods of obtaining and applying the cooling effect are considered: adiabatic expansion of vapor and gaseous bodies in expanders, throttling. Special attention is paid to the effect of object deviation from the ideal gas model.

Аннотация. Представлен энергетический анализ процессов получения и использования искусственного холода в химической технологии. Рассмотрены наиболее известные способы получения и применения эффекта охлаждения: адиабатное расширение паро- и газообразных тел в детандерах, дросселирование. Особое внимание уделено влиянию отклонения объекта от модели идеального газа.

Keywords: non-ideal gas model, integral cooling effect, inversion temperature.

Ключевые слова: модель неидеального газа, интегральный эффект охлаждения, температура инверсии.

Необходимость применения искусственного холода возникает во всех случаях, когда ставится задача отвода тепла от технологического объекта при температурах ниже окружающей среды $T_{ср}$. Многообразие химических производств, в которых осуществляется практически все известные физические и химические процессы с использованием веществ с самыми разнообразными свойствами, порождает многообразие конкретных технологических задач, решаемых с помощью холода. Однако можно выделить некоторые типичные направления применения холода в химической технологии:

1. Необходимость охлаждения в экзотермических реакциях химического взаимодействия, причем речь идет не только о предварительном охлаждении исходных веществ до заданной температуры и обеспечении отвода теплоты процесса, но и о непосредственном регулировании скорости и направления реакции.

2. Сжижение низкотемпературных газов и газовых смесей и, связанные с этими процессами низкотемпературная ректификация и фракционная конденсация.

3. В процессах политермической кристаллизации изменением температуры можно управлять скоростью процесса, регулировать размер и форму кристаллов. Фракционированная кристаллизация при пониженных температурах используется при производстве ароматических соединений при разделении пара- и мета-ксилолов (200 K), при производстве минеральных удобрений при вымораживании нитрата кальция (263 K), в процессах депарафинизации при получении нефтяных масел (240 K).

4. Крупные потребители холода в химической промышленности – процессы сушки, в том числе сублимационной, системы промышленного кондиционирования.

Современные химические производства – крупнейшие потребители холода. В то же время на химических предприятиях имеется огромное количество вторичных энергоресурсов (ВЭР) в виде дымовых и отработанных газов, факельных сбросов газа, отработанного пара низких параметров. Употребление этих видов энергии для получения холода в абсорбционных холодильных машинах (АХМ) позволяет резко снизить потребление электроэнергии, что составляет важный способ создания экономичных (энергосберегающих) химико-технологических систем.

В настоящее время ХМ классифицируются:

- по температурному диапазону работы;
- по виду используемой энергии;
- по агрегатному состоянию рабочего тела;
- по методам получения охлаждающего эффекта.

Различают области:

Умеренный холод $150\text{ K} < T_x < T_{ос}$:

$T_{сублимации\text{CO}_2} = 195\text{ K}$; $T_{нв}\text{NH}_3 = 240\text{ K}$;
 $T_{нв}\text{SO}_2 = 263\text{ K}$;

Глубокий холод $70\text{ K} < T_x < 150\text{ K}$:

$T_{нв}\text{O}_2 = 90\text{ K}$; $T_{нв}\text{Ar} = 87\text{ K}$; $T_{нв}\text{N}_2 = 72\text{ K}$;

Криогенный холод $3\text{--}5\text{ K} < T_x < 70\text{ K}$:

$T_{нв}\text{H}_2 = 20\text{ K}$; $T_{нв}\text{He} = 27\text{ K}$.

В холодильной технике для получения низких температур используют фазовые превращения, адиабатное расширение газов и паров с отдачей внешней работы, дросселирование, вихревой

эффект, термоэлектрический и термомагнитный эффект, десорбцию.

Представим наиболее применяемые способы получения эффекта охлаждения газов и паров химической промышленности.

Анализ адиабатного расширения газов и паров в детандерах

Процессы расширения газов и паров широко практикуются в оборудовании химических производств, например в турбинах (паровых, газовых, гидравлических), детандерах (поршневых, турбодетандерах), соплах, дроссельных устройствах. Адиабатное расширение газов и паров с отдачей внешней работы в детандерах является самым эффективным способом внутреннего

охлаждения. Детандеры – это расширительные низкотемпературные машины, служащие для производства холода путем расширения рабочего тела с понижением температуры и отдачей внешней работы (энергии). Термин «детандер» происходит от французского слова «de'tendre», что означает уменьшение давления.

На практике существует в основном два класса детандеров:

1. Расширительные машины объемного действия, типа поршневых, винтовых и ротационных детандеров.

2. Расширительные машины динамического типа (кинетического действия), турбодетандеры (рис. 1).

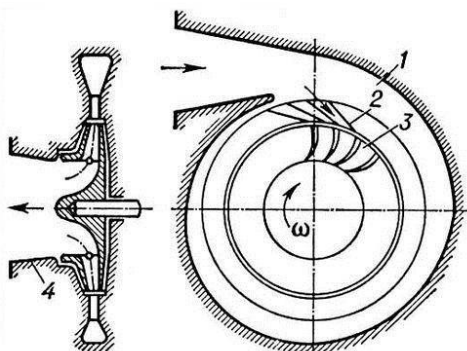


Рис. 1. Схема центробежного реактивного турбодетандера:
1 – спиральный подвод газа; 2 – направляющий сопловой аппарат; 3 – ротор;
4 – отводной диффузор

В детандерах **объемного действия** расширение газа происходит за счет непосредственного изменения объема рабочего тела путем движения поршня, или какого-либо другого устройства. В **детандерах кинетического действия** (турбодетандерах) расширение газа происходит за счет силового взаимодействия расширяющегося газа с лопатками рабочего колеса при движении потока газа в специально спрофилированном канале, в котором устанавливается вращающаяся решетка лопаточного аппарата (рабочее колесо). С помощью вращающихся лопаток рабочего колеса внутренняя и кинетическая энергия потока газа преобразуется в механическую энергию вращающейся решетки лопаточного аппарата. Эта механическая энергия преобразуется в электрическую или тепловую энергию, а затем передается на вращение рабочего колеса нагнетателя или компрессора.

Основные энергетические характеристики детандеров

Детандеры характеризуются адиабатным (внутренним) коэффициентом полезного действия

(КПД), который представляет собой отношение мощности реального, т.е. неравновесного процесса в номинальном режиме работы (без учета механических потерь), к эталонной мощности идеального процесса расширения:

$$\eta_s = \frac{W_{12}^{\text{tex}}}{W_{12S}^P} = \frac{\dot{m}W_{12}^{\text{tex}}}{\dot{m}W_{12S}^P},$$

где η_s – адиабатный (внутренний) КПД детандера; W_{12}^{tex} – мощность детандера в реальном процессе расширения, кВт; \dot{m} – массовый расход рабочего тела, кг/с; W_{12}^{tex} – внешняя работа детандера в неравновесном процессе расширения, кДж/кг; W_{12S}^P – внешняя, располагаемая работа детандера в идеальном, равновесном процессе расширения, кДж/кг; W_{12S}^P – мощность детандера в идеальном процессе расширения, кВт. Детандерные холодильные циклы характеризуются следующими энергетическими характеристиками: холодопроизводительностью, мощностью, потребляемой ХМ, и холодильным коэффициентом (рис. 2).

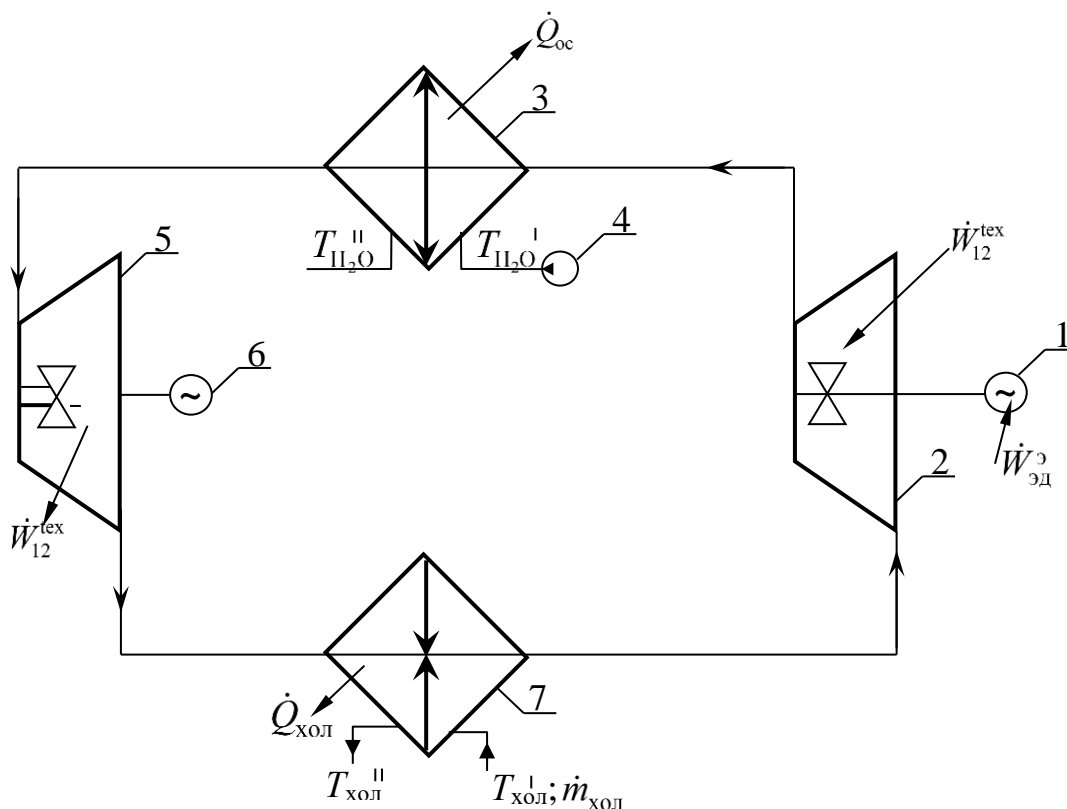


Рис. 2. Принципиальная схема детандерного холодильного цикла:

1 – электродвигатель; 2 – адиабатный компрессор; 3 – теплообменник для охлаждения сжатого газа; 4 – насос для подачи воды из обратной системы; 5 – турбодетандер; 6 – электродвигатель; 7 – теплообменник, где отводится тепло от объекта охлаждения

Принцип действия детандерного холодильного цикла основан на адиабатном расширении в турбодетандере 5 предварительно сжатого газа (например, азота) в адиабатном компрессоре 2 и затем охлажденного в изобарном теплообменнике 3. В качестве теплоносителя, отводящего теплоту от рабочего тела холодильного цикла (например, азота) в теплообменнике 3, используется подаваемая насосом 4 вода из обратной схемы водоснабжения. Происходит передача теплоты, отобранной от азота, во внешнюю, окружающую среду. В технологии предусматривается контроль температуры воды на входе в охлаждаемый теплообменник. Подготовленный азот поступает в турбодетандер 5, где происходит адиабатное расширение азота с отдачей внешней работы \dot{W}_{12}^{tex} . Расширение газа сопровождается снижением его температуры, внешняя работа отводится в форме электроэнергии в электродвигателе 6, сидящем на одном валу с детандером 5. Далее азот направляется в изобарный теплообменник 7, где используется в качестве теплоносителя, отводящего теплоту от объекта охлаждения $\dot{Q}_{хол}$. В качестве охлаждаемых веществ могут служить углеводороды (этан, пропан), воздух.

Рассмотрим реальный процесс адиабатного расширения азота в детандере. При изучении

процесса расширения в детандерах должны быть решены следующие задачи:

1. Определение интегрального эффекта охлаждения, т.е. степени охлаждения рабочего тела;
2. Определение технической мощности детандера в неравновесном процессе расширения;
3. Определение эксергетического КПД процесса.

Далее представлен конкретный пример расчета и анализа адиабатного расширения газа в турбодетандере (рис.3):

Пример. В адиабатном турбодетандере расширяется азот. Процесс расширения неравновесный, расход азота $\dot{m} = 1$ кг/с. Параметры азота на входе в детандер: $T_1 = 300$ К, $P_1 = 5$ бар, давление азота на выходе из детандера $P_2 = 1,5$ бар, функции состояния азота считать по усеченному вириальному уравнению Боголюбова – Майера [1,2] Определим:

1. Интегральный температурный эффект процесса расширения, ΔT_{12} , К.
2. Техническую мощность детандера, \dot{W}_{12}^{tex} , кВт.
3. Эксергетический КПД процесса расширения азота в детандере, η_{ex} .

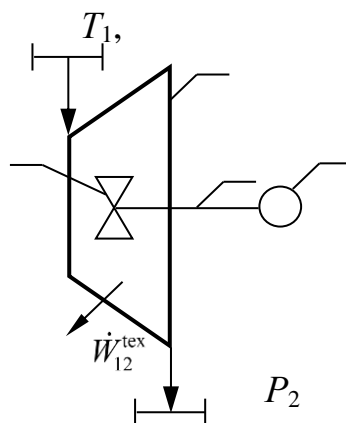


Рис. 3. Принципиальная схема ступени турбодетандера:
1 – корпус ступени детандера; 2 – вращающиеся элементы (лопасти) рабочего колеса;
3 – вал; 4 – электродвигатель

Теплофизические характеристики и справочные данные азота следующие [2]:

$M = 28,013$ кг/кмоль; $T_c = 126,2$ К; $P_c = 33,5$ атм;
 $\omega = 0,04$; вириальные коэффициенты b_{1j} азота:

$$b_{10} = 1,623 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$10^{-3} \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$10^{-3} \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$10^{-3} \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$10^{-3} \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$10^{-3} \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$10^{-4} \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Константы ряда теплоемкости $C_p = \sum_{i=0}^{n=3} d_i T^i$ имеют следующие значения:

$$d_0 = 1,113 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}};$$

$$d_1 = -4,846 \cdot 10^{-4} \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}^2};$$

$$d_2 = 9,573 \cdot 10^{-7} \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}^3};$$

$$d_3 = -4,173 \cdot 10^{-10} \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}^4}.$$

1-й этап: расчет интегрального эффекта охлаждения азота в идеальном равновесном процессе расширения, ΔT_{12S} , К.

Интегральный эффект охлаждения азота идеального процесса расширения определяется по уравнению:

$$\Delta T_{12S} = T_1 - T_{2S},$$

где T_1 – температура азота на входе в детандер, К; T_{2S} – температура азота в конце адиабатного равновесного процесса расширения, К.

Расчет температуры T_{2S} осуществляется на основании условия процесса $X = S = \text{const}$, по уравнению:

$$f(T_{2S}) = S_{2S} - S_1 = \int_{T_1}^{T_{2S}} \frac{C_{pид}}{T} dT - R_M \ln \frac{P_2}{P_1} + \Delta S_{2S}^A - \Delta S_1^A = 0$$

Нулевое приближение $T_{2S}^{(0)}$ задается из условия, что изотермическое отклонение энтропии от идеальное газового состояния азота $\Delta S_{2S}^A = 0$. Расчет плотности азота, изотермических

отклонений энтальпии и энтропии проводится по уравнению Боголюбова – Майера в усеченном виде.

Результаты расчетов представлены в табл. 1.

Таблица 1.

T_1 , К	$B_1 \cdot 10^4$, м ³ /кг	$\rho_{ид}$, кг/м ³	$Z^{(0)}$	Z	ρ_1 , кг/м ³	$\frac{\Delta S_1^A \cdot 10^3}{\text{кг} \cdot \text{К}}$	$\frac{\Delta h_1^A}{\text{кг}}$
300	-1,778	5,616	0,999	0,999	5,622	-3,493	-1,137

Определяется $T_{2S}^{(0)}$ по формуле, при условии $\Delta S_2^A = 0$.

$$T_{2S}^{(0)} = T \left[\frac{R_M \ln \frac{P_2}{P_1} + \Delta S_1^A}{C_p} \right] \exp \left[\frac{296,791 \ln \frac{1,5}{5} - 3,493}{3,5 \cdot 296,791} \right] K_{1 \text{ exp}}$$

Дальнейшие приближения T_{2S} находится из расчетного соотношения методом последовательного приближения. Выбирается значение T_{2S} , исходя из условия:

$$\varepsilon_{T_{2S}} = \left| \frac{T_{2S}^i - T_{2S}^{i-1}}{T_{2S}^i} \right| \leq 1 \cdot 10^{-2}$$

Результаты расчетов представлены в табл. 2.1.

Таблица 2.1

T_{2S} , К	ρ_{2S} ид, кг/м ³	$B \cdot 10^3$, м ³ /кг	$Z^{(0)}$	Z	ρ_{2S} , кг/м ³	$\int_{T_1}^{T_{2S}} \frac{C_{\text{прод}}}{T} dT$, $\frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$	$\frac{\Delta S_{2S}^A \cdot 10^3}{\text{кг} \cdot \text{К}}$	$\frac{f(T_{2S}^i) \cdot 10^3}{\text{кг} \cdot \text{К}}$
211,97	2,384	-1,024	0,997	0,997	2,391	-0,3631	-3,348	-5,635
212,65	2,377	-1,0925	0,997	0,997	2,384	-0,3597	-2,478	-1,355

Выбирается $T_{2S} = 212,65$ К с точностью

$$\varepsilon_T = \left| \frac{212,65 - 211,97}{212,65} \right| = 0,322 \cdot 10^{-2}$$

Интегральный температурный эффект охлаждения ΔT_{12S} идеального равновесного процесса расширения рассчитывается по формуле:

$$\Delta T_{12S} = T_1 - T_{2S} = 300 - 212,65 = 87,35 \text{ К}$$

2-й этап: определяется мощность детандера в условиях адиабатного равновесного процесса расширения азота.

Расчет мощности равновесного адиабатного процесса расширения азота в детандере проводится по соотношению:

$$\dot{W}_{12S}^P = \dot{m} W_{12S}^P = -\dot{m} \left[\int_{T_1}^{T_{2S}} C_{\text{прод}} dT + (\Delta h_{2S}^A - \Delta h_1^A) \right],$$

где $\dot{m} W_{12S}^P = \dot{W}_{12S}^P$ – мощность равновесного адиабатного (изоэнтروпийного) расширения азота в детандере, кВт;

$\int_{T_1}^{T_{2S}} C_{\text{прод}} dT = h_{2S \text{ ид}} - h_{1 \text{ ид}}$ – разность значений энтальпии азота по параметрам на входе и на выходе из детандера в состоянии идеального газа, $\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$;

$(\Delta h_{2S}^A - \Delta h_1^A)$ – разность изотермических отклонений энтальпии азота от идеальноевального состояния по параметрам газа на входе и на выходе из рабочей зоны (ступени) детандера, $\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$.

Результаты расчетов представлены в табл. 2.2.

Таблица 2.2

T_1 , К	T_{2S} , К	ρ_1 , кг/м ³	ρ_{2S} , кг/м ³	$\int_{T_1}^{T_{2S}} C_{\text{прод}} dT$, $\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	$\frac{\Delta h_1^A}{\text{кг}}$	$\frac{\Delta h_{2S}^A}{\text{кг}}$	$\frac{W_{12S}^P}{\text{кг}}$	$\frac{W_{12S}^P}{\text{кВт}}$
300	212,65	5,622	2,384	-91,287	-1,137	-0,666	90,816	90,816

3-й этап: расчет интегрального эффекта охлаждения азота в реальном, т.е. неравновесном процессе расширения в детандере, ΔT_{12} , К.

Определение интегрального эффекта охлаждения осуществляется по расчетному соотношению:

$$\Delta T_{12} = T_1 - T_2,$$

где T_1 – температура азота на входе в детандер, К; T_2 – температура азота на выходе из детандера при неравновесном процессе расширения, К; ΔT_{12} – интегральный эффект охлаждения, К.

Определение значения температуры T_2 проводится методом последовательного приближения на основании соотношения:

$$\eta_S = \frac{\dot{W}_{12}^{\text{tex}}}{\dot{W}_{12S}^P} = \frac{\dot{m} \left[\int_{T_1}^{T_2} C_{\text{прод}} dT + (\Delta h_2^A - \Delta h_1^A) \right]}{\dot{m} \left[\int_{T_1}^{T_{2S}} C_{\text{прод}} dT + (\Delta h_{2S}^A - \Delta h_1^A) \right]},$$

где η_S – адиабатный КПД детандера ($\eta_S = 0,83$); \dot{m} – массовый расход азота, кг/с; Δh_1^A , Δh_{2S}^A , Δh_2^A – изотермическое отклонение изменения значения энтальпии азота от идеальноевального состояния по параметрам на входе и на выходе из детандера, $\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$;

$$\int_{T_1}^{T_2} C_{\text{рид}} dT = d_0(T_{2S} - T_1) + d_1 \left(\frac{T_{2S}^2 - T_1^2}{2} \right) + d_2 \left(\frac{T_{2S}^3 - T_1^3}{3} \right) + d_3 \left(\frac{T_{2S}^4 - T_1^4}{4} \right)$$

Определение нулевого приближения значения температуры $T_2^{(0)}$ осуществляется по приведенному ниже соотношению, при условии, что $\Delta h_2^A = 0$.

$$T_2^{(0)} = T_1 - \frac{1}{C_{\text{рид}}} [\eta_S \cdot W_{12S}^P - \Delta h_1^A],$$

где $C_{\text{рид}} = 3,5 R_M$.

$$T_2^{(0)} = 300 - \frac{1}{3,5 \cdot 296,791 \cdot 10^{-3}} [0,83 \cdot 90,816 + 1,137] = 226,34 \text{ K}$$

Дальнейшие расчеты T_2^i проводятся с точностью:

$$\varepsilon_T = \left| \frac{T_2^i - T_2^{i-1}}{T_2^i} \right| \leq 1 \cdot 10^{-2}$$

по соотношению:

$$T_2^i = T_1 - \frac{1}{C_{\text{рид}}} [\eta_S \cdot W_{12S}^P - \Delta h_1^A + \Delta h_2^A],$$

где $\bar{C}_{\text{рид}} = \frac{\int_{T_1}^{T_2^{i-1}} C_{\text{рид}} dT}{T_2^{i-1} - T_1}$ – среднее значение теплоемкости в пределах температур от T_1 до T_2^{i-1} , $\frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{K}}$.

Результаты расчетов температуры T_2 на выходе из детандера представлены в табл. 2.3.

Таблица 2.3

T_1 , K	T_2^i , K	ρ_2 , $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$	$\bar{C}_p \left \frac{T_2^i}{T_1} \right $, $\frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{K}}$	$\frac{\Delta h_1^A}{\text{кДж}}$, кг	$\frac{\Delta h_2^A \cdot 10^3}{\text{кДж}}$, кг	$\frac{W_{12S}^P}{\text{кДж}}$, кг
300	226,34	2,237	1,0444	-1,137	-593,37	90,816
300	227,33	2,227	1,0444	-1,137	-588,98	90,816

Выбирается значение $T_2 = 227,33 \text{ K}$ с точностью:

$$\varepsilon_T = \left| \frac{227,33 - 226,34}{227,33} \right| = 0,435 \cdot 10^{-2}.$$

Интегральный эффект охлаждения составляет следующую величину согласно формуле :

$$W_{12}^{\text{tex}} = -\dot{m} \int_{T_1}^{T_2} dh = -\dot{m} \left[\int_{T_1}^{T_2} C_{\text{рид}} dT + (\Delta h_2^A - \Delta h_1^A) \right]$$

Результаты расчетов представлены в табл. 2.4.

Таблица 2.4

T_1 , K	T_2 , K	$\frac{\Delta h_1^A}{\text{кДж}}$, кг	$\frac{\Delta h_2^A \cdot 10^3}{\text{кДж}}$, кг	$\int_{T_1}^{T_2} C_{\text{рид}} dT$, $\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	$\frac{W_{12}^{\text{tex}}}{\text{кДж}}$, кг	W_{12}^{tex} , кВт
300	227,33	-1,137	-588,98	-75,899	75,351	75,351

$$W_{12}^{\text{tex}} = -1 \cdot [-75,899 - 588,98 \cdot 10^{-3} + 1,137] = 75,351 \text{ кВт}$$

4-й этап: расчет потерь кинетической энергии на трение в неравновесном процессе расширения, т.е. оценка вязкой диссипации процесса Ψ_{12}^{TP} , кВт.

Расчет потерь кинетической энергии на трение в неравновесном процессе проводится по

$$\Delta T_{12} = T_1 - T_2 = 300 - 227,33 = 72,67 \text{ K}.$$

Определяется фактическая мощность турбодетандера в реальном процессе расширения в номинальном режиме работы по следующему соотношению:

уравнению, полученному на основании интегрального уравнения баланса кинетической и потенциальной энергии неравновесного процесса:

$$\Psi_{12}^{\text{TP}} = -W_{12}^{\text{tex}} + \dot{m} \int_1^2 -\frac{dP}{\rho},$$

где: $\dot{W}_{12}^{tex} = 75,351$ кВт – техническая мощность, отводимая в реальном процессе расширения азота, т.е. с учетом сил трения;

$\dot{m} \int_1^2 \frac{dP}{\rho} = \dot{W}_{12пол}$ – мощность политропного равновесного процесса, рассчитываемая по формуле:

$$\dot{W}_{12пол} = \dot{m} \frac{\bar{n}}{\bar{n}-1} \frac{P_1}{\rho_1} \left[1 - \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{\bar{n}-1}{\bar{n}}} \right],$$

где $\bar{n} = \frac{\ln \frac{P_2}{P_1}}{\ln \frac{\rho_2}{\rho_1}}$ – среднее значение показателя

политропы по начальным и конечным параметрам, характеризующим состояние газа на входе и на выходе из ступени детандера.

$$\dot{W}_{12 пол} = \dot{m} \frac{\bar{n}}{\bar{n}-1} \frac{P_1}{\rho_1} \left[1 - \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{\bar{n}-1}{\bar{n}}} \right] = 1 \cdot \frac{1,3}{1,3-1} \cdot \frac{5 \cdot 10^5}{5,622} \left[1 - \left(\frac{1,5}{5} \right)^{\frac{1,3-1}{1,3}} \right] = 93,57 \text{ кВт}$$

Результаты расчетов представлены в табл. 2.5.

Таблица 2.5

T_1 , К	T_2 , К	P_1 , бар	P_2 , бар	ρ_1 , кг/м ³	ρ_2 , кг/м ³	$n = \frac{\ln \frac{P_2}{P_1}}{\ln \frac{\rho_2}{\rho_1}}$	$\dot{W}_{12 пол}$, кВт	\dot{W}_{12}^{tex} , кВт	$\dot{\Psi}_{12}^{TP}$, кВт
300	227,33	5	1,5	5,622	2,227	1,3	93,57	75,351	18,219

Вязкая диссипация неравновесного процесса расширения $\dot{\Psi}_{12}^{TP}$, составляет следующую величину:

$$\dot{\Psi}_{12}^{TP} = -\dot{W}_{12}^{tex} + \dot{W}_{12 пол} = -75,357 + 93,57 = 18,219 \text{ кВт}$$

Политропный равновесный процесс расширения азота, проведенный через начальное и конечное состояние, которые полностью

совпадают с реальным неравновесным процессом, может быть представлен в виде диаграмм (PV), (TS) (рис. 4).

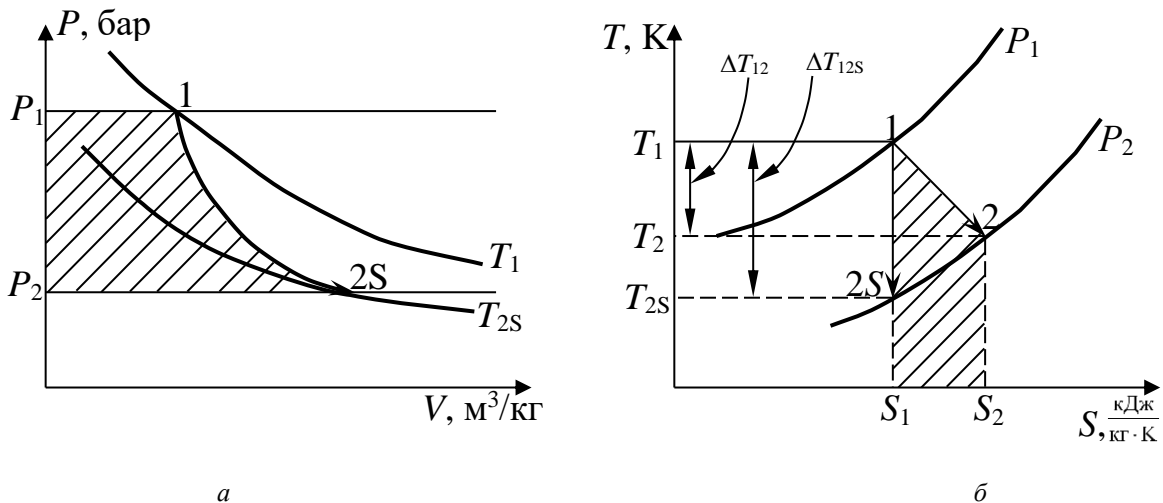


Рис. 4. Политропный равновесный процесс расширения азота в PV (а), TS (б) диаграммах

5-й этап: эксергетический анализ процесса расширения азота в детандере.

Расчет эксергетического КПД процесса расширения азота идет по расчетному соотношению, исключая транзитные потоки эксергии:

$$\eta_{ex} = \frac{Ex_{вых} - Ex_{транзит}}{Ex_{вх} - Ex_{транзит}},$$

где $Ex_{вых}$ – поток эксергии на выходе из ступени детандера;

$Ex_{вх}$ – поток эксергии на входе в ступень детандера;

$Ex_{транзит}$ – транзитные потоки эксергии, т.е. составляющие ту часть эксергии входящих потоков, которая проходит неизменно через весь аппарат.

Поток эксергии азота на входе в детандер определяется по соотношению:

$$\dot{E}x_{\text{вх}} = \dot{m}ex_1 = \dot{m} \left[\int_{T_0}^{T_1} C_{\text{рид}} dT + \Delta h_1^A - T_{\text{ос}} \left(\int_{T_0}^{T_1} \frac{C_{\text{рид}}}{T} dT - R_M \ln \frac{P_1}{P_0} + \Delta S_1^\partial \right) \right],$$

где: $T_{\text{ос}} = 298,15$ К – значение температуры в опорном состоянии;

$\int_{T_0}^{T_1} C_{\text{рид}} dT = \sum_{i=0}^{n=3} \frac{d_i(T_1^{i+1} - T_0^{i+1})}{i+1}$ – изменение энтальпии азота в идеально-газовом состоянии, $\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$;

$\int_{T_0}^{T_1} \frac{C_{\text{рид}}}{T} dT$ – изменение энтропии идеального газа в зависимости от изменения температуры, $\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$;

Δh_1^∂ – изотермическое отклонение энтальпии азота от идеально-газового состояния по параметрам на входе в детандер, $\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$;

ΔS_1^∂ – изотермическое отклонение энтропии азота от идеально-газового состояния по параметрам T_1, P_1 , $\frac{\text{кДж}}{\text{кг}\cdot\text{К}}$.

Результаты расчетов $\dot{E}x_{\text{вх}}$ представлены в табл. 2.6.

Таблица 2.6

T_1 , К	P_1 , бар	$\int_{T_0}^{T_1} C_{\text{рид}} dT, \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	$\int_{T_0}^{T_1} \frac{C_{\text{рид}}}{T} dT \cdot 10^3, \frac{\text{кДж}}{\text{кг}\cdot\text{К}}$	$\Delta h_1^\partial, \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	$\Delta S_1^\partial \cdot 10^3, \frac{\text{кДж}}{\text{кг}\cdot\text{К}}$	$ex_1, \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	$\dot{E}x_{\text{вх}}, \text{Вт}$
300	5	1,928	6,448	-1,137	-3,439	141,16	141,16

Поток эксергии на выходе представляет собой сумму потоков эксергии за счет движения азота $\dot{E}x_2$ и потока механической работы W_{12}^{tex} . Согласно уравнению баланса эксергии получается расчетное соотношение для эксергии азота на выходе из детандера:

$$\dot{E}x_{\text{вых}} = \dot{m}ex_2 + W_{12}^{\text{tex}} = \dot{m}ex_1 - in\dot{D}_{12},$$

где $\dot{m}ex_1 = 141,16$ кВт – поток эксергии азота на входе в детандер, кВт;

$$in\dot{D}_{12} = \dot{m} \cdot T_{\text{ос}} \cdot \left[\int_{T_1}^{T_2} \frac{C_{\text{рид}}}{T} dT - R_M \ln \frac{P_2}{P_1} + (\Delta S_2^A - \Delta S_1^A) \right]$$

Результаты расчетов эксергетического КПД η_{ex} процесса представлены в табл. 2.7.

Таблица 2.7

T_1 , К	T_2 , К	$\int_{T_1}^{T_2} \frac{C_{\text{рид}}}{T} dT \cdot 10^3, \frac{\text{кДж}}{\text{кг}\cdot\text{К}}$	$\Delta S_1^A \cdot 10^3, \frac{\text{кДж}}{\text{кг}\cdot\text{К}}$	$\Delta S_2^\partial \cdot 10^3, \frac{\text{кДж}}{\text{кг}\cdot\text{К}}$	$in\dot{D}_{12}$, кВт	$\dot{m}ex_1$	η_{ex}
300	227,33	-289,7	-3,493	-2,021	20,602	141,16	0,85

$$\eta_{\text{ex}} = 1 - \frac{in\dot{D}_{12}}{\dot{m}ex_1} = 1 - \frac{20,602}{141,16} = 0,85.$$

Для увеличения эксергетического КПД процесса расширения азота целесообразно повысить эффективность работы детандера, т.е. снизить потери эксергии за счет необратимости самого процесса. Это достигается совершенствованием газодинамики движения, а именно уменьшением потерь на трение в газовом тракте турбодетандера.

Анализ процесса дросселирования газов

Задачу внутреннего охлаждения можно решить, используя процесс дросселирования.

$in\dot{D}_{12}$ – потери эксергии вследствие необратимости процесса, кВт.

Расчетная формула эксергетического КПД η_{ex} с учетом транзитных потоков приобретает вид:

$$\eta_{\text{ex}} = \frac{\dot{E}x_{\text{вых}}}{\dot{E}x_{\text{вх}}} = \frac{\dot{m}ex_1 - in\dot{D}_{12}}{\dot{m}ex_1} = 1 - \frac{in\dot{D}_{12}}{\dot{m}ex_1},$$

Потери эксергии вследствие необратимости процесса рассчитываются по формуле Гюи – Стодоль:

Дросселированием называется необратимый адиабатный процесс снижения давления потока газа (пара), при прохождении через суженное отверстие (дроссель), причем рабочее тело не производит внешней работы. Для такого процесса полная энергия потока остается неизменной. Рассмотрим этот процесс при истечении потока газа на примере диафрагмы в качестве дроссельного устройства (рис. 5).

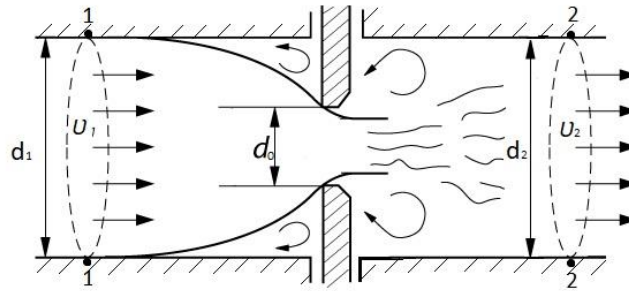


Рис. 5. Схема дросселирования рабочего потока вдоль профиля канала

На рисунке d_1, d_2 – сечение канала до и после диафрагмы; d_0 – диафрагмальное (дроссельное) сечение канала.

Поскольку дросселирование осуществляется без совершения внешней работы \dot{W} и без подвода (отвода) потока теплоты \dot{Q} при истечении газа

(пара) через местное гидравлическое сопротивление, то для сечений (1–1) и (2–2), достаточно удаленных от дросселя, где значения параметров допустимо считать установившимися, из уравнения баланса полной энергии:

$$\frac{\partial}{\partial \tau} \int_0^V (K_V + \Pi_V + U_V) dV = \sum_{i=1}^n \dot{m}_i \left(\bar{h} + \frac{\bar{v}^2}{2} + \bar{\phi}_g \right)_i - \dot{W}^{\text{tex}} + \dot{Q} + \dot{H}^{\text{диф}}$$

имеем следующее соотношение:

$$\dot{m} \left(h_1 + \frac{\bar{v}_1^2}{2} + \varphi_1 \right) = \dot{m} \left(h_2 + \frac{\bar{v}_2^2}{2} + \varphi_2 \right)$$

Проанализируем представленное соотношение. Поскольку массовый расход рабочего тела в каждом сечении сохраняется постоянным и площадь проходного сечения канала (1–1) до и после местного сужения (2–2) не меняется, скорости течения остаются практически неизменными $\bar{v}_1 \approx \bar{v}_2$. Полагая удельный гравитационный потенциал по сечению потока постоянным $\varphi_1 = \varphi_2$, поскольку область контрольного участка незначительна, получается следующее интегральное условие дросселирования:

$$h_1 = h_2$$

По существу, это неравновесный процесс плохо организованного истечения в непрофилированных каналах, когда кинетическая энергия расширившегося газа превращается не во внешнюю работу, как это происходит в детандерах, а трансформируется за счет турбулентных завихрений в энергию диссипации ψ , которая, в свою очередь, идет на восстановление энтальпии. Для анализа такой процесс истечения целесообразно заменить квазистатическим необратимым процессом, имеющим тот же интегральный результат постоянства энтальпии. При этом, однако, появляется возможность применять аналитический аппарат классической равновесной термодинамики.

Определим интегральный эффект дросселирования ΔT_{12h} , К азота при истечении потока через диафрагмальное сужение трубопровода. Процесс является необратимым,

адиабатным. Параметры азота в сечении (1–1), до дроссельного устройства: $P_1=5$ бар, $T_1=300$ К, параметры азота в сечении и (2–2), после дроссельного устройства: $P_2=3$ бар.

Функции состояния азота в сечении (1–1) следует определять по усеченному вириальному уравнению Боголюбова – Майера, в сечении (2–2) допустимо применять модель идеального газа.

На основании интегрального условия дросселирования, с учетом уравнения состояния газа, получается следующее выражение:

$$c_p(T_1 - T_{2h}) + \Delta h_1^\partial - \Delta h_2^\partial = 0$$

Интегральный эффект дросселирования определяется по соотношению:

$$\Delta T_{12h} = T_1 - T_{2h}$$

где T_1, K – температура азота в сечении (1–1), до входа в диафрагмальное сужение; T_{2h}, K – температура азота в сечении (2–2), после диафрагмального сужения, когда сечение трубопровода вновь становится полным. Интегральный эффект $\Delta T_{12h}, K$ может быть найден на основании термического уравнения состояния неидеального газа. Для идеального газа эффект дросселирования равен нулю. Расчет T_{2h} следует проводить, используя полученное аналитическое выражение процесса совместно с усеченным уравнением состояния Боголюбова – Майера в вириальном виде. Из вышеизложенного следует:

$$T_{2h} = T_1 + \frac{\Delta h_1^\partial - \Delta h_2^\partial}{c_p},$$

где Δh_1^θ , Δh_2^θ – изотермическое отклонение энтальпии азота от идеальноегазового состояния по параметрам в сечении (1–1) и (2–2), кДж/кг.

Изменение температуры газа в процессе дросселирования, обусловленное отклонением от идеальноегазового состояния, называется эффектом Джоуля – Томпсона. Для уменьшения нагрузки на численный аппарат и приобретения качественного опыта при анализе изложенной задачи, предлагается считать азот в сечении (2–2) по

уравнению идеального газа. Следовательно, значение температуры T_{2h} определяется по следующему соотношению:

$$T_{2h} = T_1 + \frac{\Delta h_1^\theta}{c_p}$$

Результаты расчета приведены в табл. 3.1

Таблица 3.1

T_1 , К	$B_1 \cdot 10^4$, м ³ /кг	$\rho_{1ид}$, кг/м ³	$Z^{(0)}$	Z	ρ_1 , кг/м ³	$C_p(T_1)$, $\frac{кДж}{кг \cdot К}$	$\frac{\Delta h_1^\theta}{кДж/кг}$
300	-1,778	5,616	0,999	0,999	5,622	1,0425	-1,137

Находится значение температуры газа T_{2h} :

$$T_{2h} = 300 + \frac{-1,137}{1,0425} = 298,9 \text{ К.}$$

Интенсивность изменения температуры, называемая дифференциальным эффектом Джоуля – Томпсона, характеризуется как $\alpha_h = (\partial T / \partial P)_h$. Значение этой характеристики определяется из энергетического баланса закрытой системы $dh = TdS - VdP$ совместно с уравнением Максвелла $(\partial S / \partial P)_T = -(\partial V / \partial T)_P$:

$$\alpha_h = \frac{T \left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_P - V}{c_p} = \alpha_s - \frac{V}{c_p},$$

где α_s – дифференциальный эффект охлаждения при идеальном обратимом расширении газа (пара).

Соотношения для определения величины дифференциального и интегрального эффектов

охлаждения газа в адиабатном равновесном процессе расширения газа от давления P_1 до конечного значения P_2 :

$$\alpha_s = \frac{k-1}{k} \cdot \frac{T_1}{P_1},$$

$$\Delta T_{12s} = T_1 \cdot \left[1 - \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]$$

Следует обратить внимание на зависимость значения показателя адиабаты k в соотношении от термического уравнения состояния газа. Расчет этой величины для неидеального газа, рассматриваемой в примере модели усеченного вириального уравнения Боголюбова – Майера, проводится по формуле:

$$k = \frac{1+2B\rho}{1+B\rho} \cdot \frac{c_p}{c_v},$$

где B – второй вириальный коэффициент.

Результаты расчетов приведены в табл. 3.2.

Таблица 3.2

T_1 , К	$B_1 \cdot 10^4$, м ³ /кг	ρ_1 , кг/м ³	$C_p(T_1)$, $\frac{кДж}{кг \cdot К}$	k	$\alpha_s \cdot 10^4$, $\frac{К}{Па}$	$\alpha_h \cdot 10^6$, $\frac{К}{Па}$
300	-1,778	5,622	1,0425	1,3966	1,717	1,078

Поскольку $\alpha_s > 0$ и $\frac{V}{c_p} > 0$, то $\alpha_s > \alpha_h$, что является следствием необратимости процесса. Очевидно, что для идеального газа $\alpha_h = 0$. Если газ неидеальный и величина $\alpha_s < \frac{V}{c_p}$, то эффект дросселирования будет отрицательным $\alpha_h < 0$, т. е. при расширении газ будет нагреваться. Если газ неидеальный и $\alpha_s > \frac{V}{c_p}$, то эффект дросселирования будет положительным $\alpha_h > 0$, т. е. расширение газа будет сопровождаться охлаждением. Состояние вещества, при котором дифференциальный эффект меняет знак, называется точкой инверсии. Совокупность таких точек образует линию инверсии, уравнение которой имеет следующий вид:

$$T(\partial V / \partial T)_P = V$$

Анализ этого соотношения показывает, что в координатах T – P линия инверсии имеет максимум и ограничивает область значения T и P , где $\alpha_h > 0$ и происходит охлаждение газа. Для любых значений давления $P < P_{\max} \approx 10 P_{кр}$ существуют две инверсионные температуры $T_{ин}^B$ – нижняя температура инверсии в жидкой области, $T_{ин}^B$ – верхняя температура инверсии в газообразной области. Если $T_{ин}^H < T < T_{ин}^B$, то при дросселировании будет происходить охлаждение газа. Очевидно, для использования вещества в качестве рабочего тела дроссельных холодильных устройств необходимо перед дросселированием

охлаждать поток газа ниже $T_{ин}^B$. Газы при низких давлениях и высоких температурах малоэффективны в качестве холодильных агентов. Например, для воздуха при температуре $T = 300$ К и давлении $P = 10$ бар их отношение $\alpha_h/\alpha_s \approx 0,2$. Однако, при снижении температуры и повышении давления удельный объем уменьшается и

отношение α_h/α_s растет. Например, при температуре $T = 100$ К и давлении $P = 100$ бар для воздуха их отношение $\frac{\alpha_h}{\alpha_s} \approx 0,98$. Изменения состояния дросселируемого потока азота показано на рис. 6.

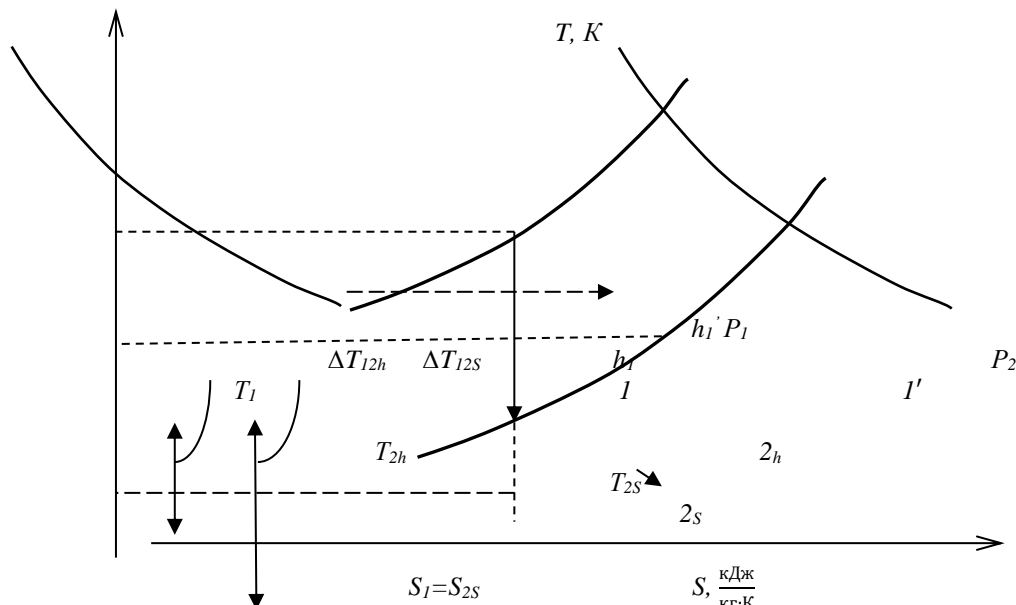


Рис. 6. Изотермический эффект дросселирования Джоуля – Томпсона

Выбор азота в качестве объекта для сравнительного анализа способов получения охлаждающего эффекта обусловлен тем, что этот газ является основным компонентом атмосферного воздуха и по своим свойствам в широком интервале

термических параметров соответствует модели идеального газа. Интегральный тепловой эффект, характеризующий холодопроизводительность дроссельного устройства Q_x , определяется по следующему соотношению:

$$Q_x = \int_{T_{2h}}^{T_1} C_p dT = \bar{C}_p(T_1 - T_{2h}) = h'_1 - h_2 = h'_1 - h_1 = -\Delta h_T,$$

где Δh_T – изотермический эффект охлаждения (дросселирования).

Дроссельные холодильные циклы применяются в криогенной технике для сжижения и разделения низкотемпературных газов. Использование дроссельных устройств позволяет контролировать параметры газов (паров), а также их смесей; определять и варьировать расход технологических объектов в исследуемом сечении аппаратуры. Получение искусственного холода – дорогой и энергоемкий процесс, поэтому весьма остро возникают вопросы экономического обоснования технологий с использованием низкотемпературного ресурса. При этом в промышленной практике существует целая цепь сопряженно работающих агрегатов, в которых циркулирует и контактирует комплекс

материальных и энергетических потоков, одновременно являющихся конечным продуктом определенного участка и выполняющих роль инициирующего вещества и вспомогательного продукта в других звеньях технологической цепи. Обоснованный выбор режима работы и управления производством гарантирует рациональный путь получения целевого продукта.

Список литературы:

1. Хабибова Н. З. Расчет и анализ термодинамических процессов расширения (сжатия) неидеального газа. М.: РХТУ им. Д. И. Менделеева, 2005. 48 с.
2. Рид Р., Праусниц Дж., Шервуд Т. Свойства газов и жидкостей. Л.: Химия, 1982. 534 с.

Korotinsky A.*PhD, assistant of the department of hardware and software automation
National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"***Shaposhnik A.***student of the department of hardware and software automation
National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"***Zhuchenko L.***PhD student of the of department of automation of heat and power engineering processes
National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"***SYNTHESIS OF CONTROL SYSTEM OF ENERGY CONSUMING TECHNOLOGICAL PROCESS
BASED ON D PARTITIONING****Коротинський А. П.***доктор філософії, асистент кафедри технічних та програмних засобів автоматизації
Національний технічний університет України**«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»***Шапошник А. А.***студент кафедри технічних та програмних засобів автоматизації
Національний технічний університет України**«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»***Жученко Л. К.***аспірантка кафедри автоматизації теплоенергетичних процесів,
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут***СИНТЕЗ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ЕНЕРГОЄМНИМ ТЕХНОЛОГІЧНИМ ПРОЦЕСОМ НА
ОСНОВІ D-РОЗБИТТЯ**

DOI: 10.31618/ESSA.2782-1994.2021.2.75.160

Abstract. The work is aimed at solving the applied problem of developing an automatic control system for the evaporator using the principle of D-partition. Since there is always uncertainty in real problems, the solution of the problem of synthesis of the control system is reduced to the synthesis of a robust regulator. As a result, the area of robust stability of the object was obtained and an array of PI controller settings was formed, which ensures the stability of the object in the entire range of uncertainty.

Анотація. Робота спрямована на вирішення прикладної задачі розробки автоматичної системи керування випарним апаратом за допомогою принципу D-розбиття. Оскільки в реальних задачах завжди присутня невизначеність то вирішення задачі синтезу системи керування зводиться до синтезу робастного регулятора. В результаті роботи було отримано область робастної стійкості об'єкта та сформовано масив налаштувань ПІ регулятора, що забезпечує стійкість об'єкта у всьому діапазоні невизначеності.

Key words: D-partition, robust regulator, evaporator, automatic control system.

Ключові слова: D-розбиття, робастний регулятор, випарний апарат, система автоматичного керування.

Вступ. Виробництво лускатної селітри є енергоємним технологічним процесом [6]. Під час її виробництва, одним із найважливіших етапів виробництва є випаровування, адже саме на цьому етапі продукція набуває свої якісні характеристики.

Випаровування є процесом консолідування, який відбувається за рахунок виділення розчинника, перетворюючи його на пару. На поверхні теплообміну з'являються парові пухирці, при умові наявності шорсткості. Одним з головних факторів, що впливають на їх утворення – є газ, які містять в собі рідина. Процес проходить за рахунок виділення великої кількості газових бульбашок, у які, в свою чергу, випаровується рідина. Однією з основних умов проходження процесу – є рівність тиску, як всередині так і оточенні пухирця. Проте, при умові того, що процес випаровування відбувається інтенсивно, температура рідини не підвищується, навіть незважаючи на підведення великої кількості тепла ззовні.

Загалом існує більш як 80 різних випарних апаратів, класифікація яких відбувається за наступними факторами, а саме, тип поверхні нагрівання, рух теплоносія нагрівальної камери, тип циркуляції.

При описі випарного апарату стає зрозумілим, що при його описі неминуче будуть присутні невизначеності. Одним із таких параметрів є втрата теплоти у навколишнє середовище. Даний параметр, безпосередньо впливає на перебіг технологічного процесу, а саме сповільнює його. Наступною невизначеністю є виник твердої фази розчину разом з паром, що впливає на його концентрацію всередині апарату. В сукупності з фактором того, що залежність між концентрацією і температурою пароутворення є нелінійною, вплив на технологічний процес вважається доволі суттєвим. Третьою складовою невизначеності, є не стабілізований об'єм у випарному апараті, а саме об'єм, що займає рідка фаза, оскільки процес є не

періодичним і безперервним. Четверта складова полягає у випаді накипу, що призводить до зміни коефіцієнту теплопередачі, між грійною рубашкою та розчином, який перебуває у середині апарату. Зменшення цього параметру впливає на температуру розчину та час перебігу процесу. Зі зменшення коефіцієнту теплопередачі, падає продуктивність, відповідно ефективність апарату зменшується.

Мета роботи. Враховуючи описані вище обставини, а саме присутність великої кількості складових невизначеності при описі випарного апарату, необхідно провести перехід у площину робастних систем керування.

Відтак існує потребу у розробці робастної автоматичної системи керування даним технологічним апаратом, що забезпечує ефективність його роботи та стійкість замкненої системи не тільки для номінального об'єкта, а для будь-якого об'єкта з області невизначеності.

Аналіз існуючих літературних джерел. На сьогоднішній день існує велика кількість систем керування випарним апаратом. Наприклад у роботі [1] наведено реалізацію замкненої системи керування випарним апаратом з ПІД регулятором. У роботі, були проведені розрахунки по використанню ПІД регулятора в цифрових системах.

Широкого поширення набули систем керування, які базуються на нечіткій логіці. У роботі [2] приведена нечітка система, що виявилася придатною для опису та автономної оптимізації процесу випаровування на основі рециркуляції

$$P(s) = \{P(s) = a_0 + a_1s + \dots + a_n s^n, \underline{a}_i \leq a_i \leq \bar{a}_i, \underline{a}_0 > 0, \underline{a}_n > 0\},$$

параметрами якого є самі коефіцієнти полінома, що змінюються в паралелепеді, розглянемо чотири поліноми (поліноми Харитоновна), складених з крайніх значень коефіцієнтів, що чергуються парами (два нижніх значення – два верхніх).

$$P_1(s) = \underline{a}_0 + \underline{a}_1s + \underline{a}_2s^2 + \underline{a}_3s^3 + \dots,$$

$$P_2(s) = \underline{a}_0 + \underline{a}_1s + \underline{a}_2s^2 + \underline{a}_3s^3 + \dots,$$

$$P_3(s) = \underline{a}_0 + \underline{a}_1s + \underline{a}_2s^2 + \underline{a}_3s^3 + \dots,$$

$$P_4(s) = \underline{a}_0 + \underline{a}_1s + \underline{a}_2s^2 + \underline{a}_3s^3 + \dots$$

Використовуючи теорему що регулятор стабілізує інтервальний об'єкт тоді і лише тоді, коли він стабілізує всі Харитоновські об'єкти, можна дійти висновку, що для робастної стабілізації необхідно провести D – розбиття для всіх Харитоновських об'єктів, тоді перетин всіх областей стійкості дасть область робастної стійкості.

Для характеристичного полінома системи з ПІ регулятором можливо вказати область на двомірній

цукрової рідини в обладнанні. У роботі визначено, що контроль випаровування може бути реалізований шляхом керування лише подачі рідини у випарник або рециркуляцією рідини у випарній секції.

Ще одним прикладом систем керування випарним апаратом, можуть слугувати система з прогнозуючою моделлю. У дослідженні [4] розглядаються питання, пов'язані із застосуванням прогнозуючого керування (МРС) до нелінійних та інтегруючих процесів, а саме на прикладі промислової чотириступінчастої випарної системи.

Також, зараз не рідкісним, є системи з нейромережевими методами керування. Авторами роботи [5] наведено адаптивне управління системою випаровування з примусовою циркуляцією з використанням нейронних мереж і кількох моделей. Результати моделювання показують, що запропонований метод може ефективно використовуватись для системи випаровування з примусовою циркуляцією та покращити ефективність випаровування. **Основна частина.** Відомо, що при переході від стійкого стану системи до нестійкого один з коренів повинен перетнути уявну вісь, при цьому порушується умова

$$0 \notin S(w) = \{P(jw): q \in Q\}, \forall 0 \leq w < \infty,$$

При дослідженні робастної стійкості ми намагаємося з'ясувати, чи лежить задана область Q цілком в області стійкості.

При інтервальному поліномі

площині $\{k_1, k_2\}$ в якій він буде володіти заданою кількістю коренів в лівій та правій на півплощині.

Метод D - розбиття площини параметрів, заключається у наступному. Нехай при якомусь значенні параметра k степінь полінома $P(s, k)$ дорівнює n і він має m n коренів в лівій півплощині та n-m коренів в правій. Зміна положення коренів при зміні параметра k може відбутись лише при:

1. Зміниться степінь многочлена $P(s, k)$
2. Реальний корінь $P(s, k)$ перейде з однієї півплощини в іншу, тобто стане рівним нулю.
3. Пара комплексних коренів перейде з однієї півплощини в іншу тобто $P(s, k)$ буде мати пару чисто уявних коренів.

Таким чином границі D - розбиття описуються параметричним рівнянням:

$$P(jw, k) = 0 \quad (1),$$

що відповідає випадкам 2,3, та

$$an(k) = 0 \quad (2),$$

де a_n – старший коефіцієнт $P(s, k)$ випадок 1.

Рівняння (1) при фіксованому w - це два лінійних рівняння (що відповідають реальній і уявній частинам $P(s, k)$) щодо двох змінних k_1, k_2 . У

загальній ситуації його рішення визначає одну точку $k(w)$ на площині параметрів, при зміні w від 0 до ∞ вона описує деяку криву. Крім того, в виродженому випадку (коли лінійні рівняння в 1) лінійно залежні) виникають так звані особливі прямі: одному значенню w відповідає пряма на площині параметрів. Нарешті, умова (2) також визначає пряму лінію. Отже, процедура D - розбиття наступна. Проводиться крива $k(w)$ (1), пряма, що відповідає умові (2), і особливі прямі; вони розбивають площину на області. Кожна з цих областей відповідає певному розташуванню нулів полінома $P(s,k)$, серед цих областей знаходиться і область стійкості.

$$P(s, k) = a_0 s + a_1 s^2 + a_2 s^3 + k_1 s(s - 1) + k_2 (s - 1),$$

а рівняння границі D - розбиття $P(jw)=0$ записуються наступним чином:

$$-k_1 w^2 - k_2 = a_1 w^2, \quad -k_1 + k_2 = -a_0 + a_2 w^2$$

Звідки

$$k_1 = \frac{a_0 - (a_1 + a_2)w^2}{1 + w^2}, \quad k_2 = \frac{w^2(-a_0 - a_1 + a_2 w^2)}{1 + w^2}$$

Для даного прикладу розбиття ведеться гіперболами, що отримані після виключення w^2

$$k_2 = \frac{(k_1 - a_0)(k_1 + a_1)}{a_1 + a_2 + k_1}$$

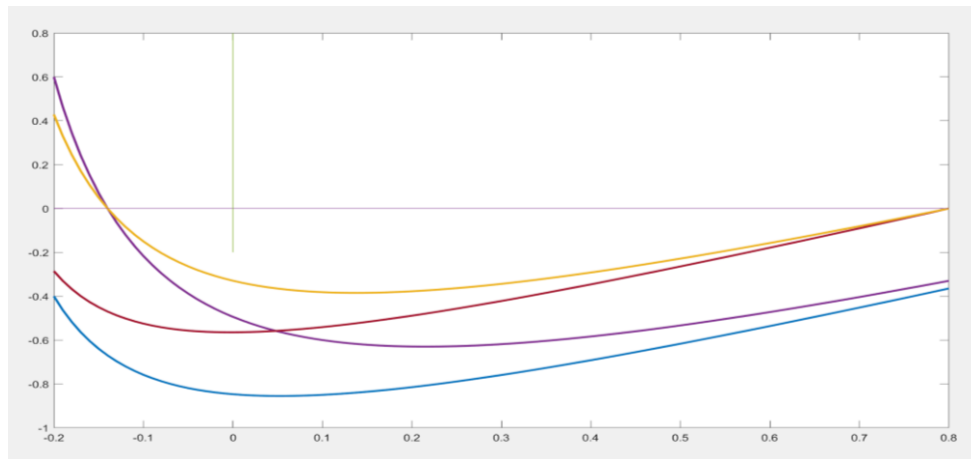


Рис. 1. Область робастної стійкості

Область, що обмежена всіма характерними лініями - область робастної стійкості. Виберемо точку в даній області $(-0.1, 0.4)$, та синтезуємо ПП регулятор з отриманими параметрами налаштування. Перевіримо стійкість замкненої

Математична модель випарного апарату з присутніми невизначеностями набуває наступного вигляду [3]:

$$G(s) = \frac{a-1}{a_0 + a_1 s + a_1 s^2},$$

$$0.8 \leq a_0 \leq 1.2; \quad -0.14 \leq a_1 \leq 0.24;$$

$$0.8 \leq a_2 \leq 1.2;$$

Шукаємо ПП регулятор

$$C(s) = k_1 + \frac{k_2}{s},$$

що гарантує робастну стійкість. Характеристичний поліном має вигляд:

Побудуємо чотири області стійкості для кожного з Харитоновських поліномів, їх перетин визначить область робастної стійкості (див. рис. 1.). Чотири рівняння гіперболи для кожного Харитоновського полінома має вигляд:

$$k_{X1} = \frac{(k_1 - a_0)(k_1 + a_1)}{a_1 + a_2 + k_1}; \quad k_{X2} = \frac{(k_1 - a_0)(k_1 + a_1)}{a_1 + a_2 + k_1};$$

$$k_{X3} = \frac{(k_1 - a_0)(k_1 + a_1)}{a_1 + a_2 + k_1}; \quad k_{X4} = \frac{(k_1 - a_0)(k_1 + a_1)}{a_1 + a_2 + k_1};$$

системи на основі об'єкта з параметричною невизначеністю.

Загальна структура регулятора наведено на рисунку 2., схема реалізована в середовищі Simulink. Результати роботи запропонованої системи керування представлено на рис. 3.

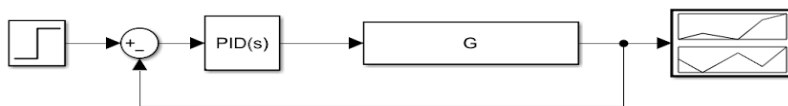


Рис. 2. Загальна структура замкненої системи

З результатів роботи видно, що запропонований ПІ регулятор забезпечує вихід на усталений рівень не тільки для випадку

номінального об'єкта, а для 5ти випадків об'єкта з області невизначеності.

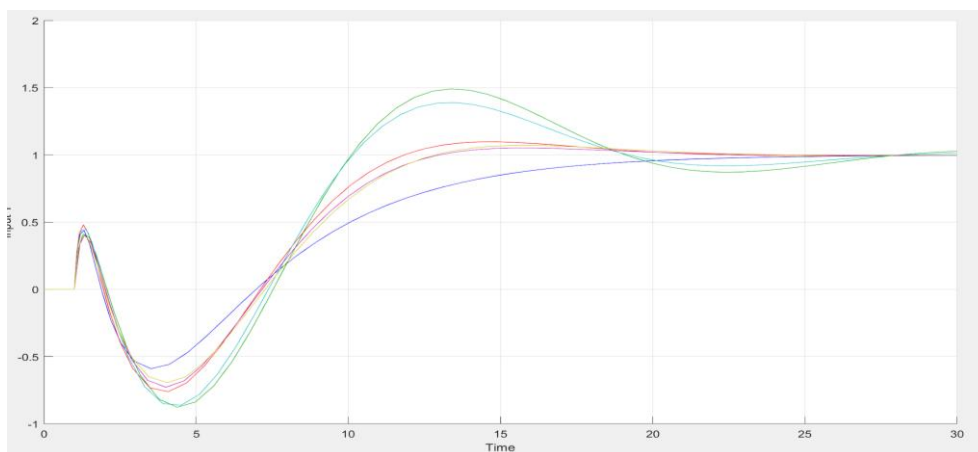


Рис. 3. Результати роботи системи керування на базі синтезованого ПІ регулятора

Висновки. Робота спрямована на вирішення прикладної задачі синтезу системи керування випарним апаратом в умовах невизначеності. У роботі наведено приклади невизначеності, що присутні у випарному апараті, а відтак прийнято рішення про представлення математичної моделі у вигляді параметрично невизначеної моделі. На основі проведеного аналізу, було прийнято рішення розробити систему регулювання концентрації упареного розчину за допомогою принципу D-розбиття. У результаті роботи отримано область робастної стійкості, використання параметрів якої гарантує стійкість системи керування даним технологічним об'єктом у всьому діапазоні невизначеності.

Список літератури

1. https://essuir.sumdu.edu.ua/bitstream-download/123456789/81300/1/Sira_mag_rob.pdf;jsessionid=4FA4C369F5CA0A6FB3BCFEFE28E2F967

2. Lahtinen, S. T. Identification of fuzzy controller for use with a falling-film evaporator [Text] // Food Control. – 2001. – Vol. 12. – № 3. – P. 179–180. – ISSN 0956-7135.

3. <https://studfile.net/preview/7581830/page:11/>

4. Rangaiah, G. P., Saha, P., Tade, M. O. Nonlinear model predictive control of an industrial four-stage evaporator system via simulation [Text] // Chemical Engineering Journal. – 2002. – Vol. 87. – № 3. – P. 285–299. – ISSN 1385-8947

5. Yonggang Wang, Tianyou Chai, Jun Fu, Jing Sun Adaptive decoupling control of the forced-circulation evaporation system using neural networks and multiple models [Text] // 2011 American Control Conference on O'Farrell Street, San Francisco, CA, USA June 29 – July 01, 2011. – P. 5061–5066. – ISSN 2378-5861.

6. Клевке В.А. Технология азотных удобрений. Клевке В. Л., Поляков Н. Н., Арсеньева Л.З., -М. : 1956. — 290 с.

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ

Aliyev G.G.

*Doctor of physical and mathematical sciences, Professor
Institute of Mathematics and Mechanics
Azerbaijan National Academy of Sciences*

Aliyev A.G.

*Doctor Phd of economical science, Assistant Professor
Azerbaijan State Oil and Industry University*

STRENGTH OF MULTILAYER POLYMER PIPE TAKING INTO ACCOUNT CHANGE IN PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF THE MATERIAL

Алиев Г.Г.

*д.ф.-м.н., профессор
Заведующий отделом
«Прикладная математика»
Института Математики и Механики
Национальной Академии Наук Азербайджана*

Алиев А.Г.

*к.э.н., доцент кафедры
«Экономика и менеджмент в отраслях ТЭК»
Азербайджанского Государственного
Университета Нефти и Промышленности*

ПРОЧНОСТЬ МНОГОСЛОЙНОЙ ПОЛИМЕРНОЙ ТРУБЫ С УЧЕТОМ ИЗМЕНЕНИЯ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛА

DOI: 10.31618/ESSA.2782-1994.2021.2.75.156

Summary. Strength of a multilayer polymer pipe under the action of the system of external loads is studied taking into account the change in physical and mechanical properties of the material. Mechanical effect, the dependence of joint deformability of several polymer materials on the character of change of their physical and chemical properties was established. Occurrence and dependence of physical and chemical properties of the material and also breaking stresses between the layers determining adhesive strength of layered polymer pipe was established.

Аннотация. Исследована прочность многослойной полимерной трубы под действием систем внешних нагрузок с учетом изменения физико-химических свойств материала. Установлен механический эффект - зависимость совместной деформируемости нескольких полимерных материалов от характера изменения их физико-химических свойств. Установлено возникновение и зависимость распорных сил в слоях трубы от изменения физико-химических свойств материала; а также, максимальные отрывающие напряжения между слоями, определяющие адгезионную прочность слоистой полимерной трубы.

Keywords: *Change in physical and mechanical properties of polymer materials arising from contact with aggressive liquid; changes in mechanical properties of polymers arising from contact with aggressive liquid.*

Ключевые слова. *Изменение физико-химических свойств полимерных материалов, возникающих при контакте с агрессивной жидкостью; изменение механических свойств полимеров при контакте с агрессивной жидкостью.*

Постановка проблемы

Исследуется задача прочности достаточно длинной слоистой трубы с учетом влияния изменения физико-химических свойств полимерных слоев, которые возникают при контакте с агрессивной жидкостью.

Анализ последних исследований и публикаций

В работах [1,2] разработана теория прочности слоистых и армированных конструкций выполненных из полимерных материалов, с учетом изменяемости их физико-химических свойств. Для достижения этой цели предложен экспериментально-теоретический метод по определению изменяемости физико-механических

свойств полимеров и композитных материалов с учетом влияния возникающих при контакте с агрессивной жидкостью. На этой основе предложен обобщенный закон Гука с учетом изменяемости физико-химических свойств полимерного материала; предложен критерий адгезионной прочности слоистых и многослойно-армированных труб с учетом физико-химической изменяемости слоев конструкции; предложен критерий устойчивости одномерных элементов конструкций с учетом эффекта набухания материалов. А также выявлены такие новые механические эффекты, как изменяемость массовой силы полимерного материала с учетом эффекта набухания материала; выпучиваемость стержней под действием только

эффекта набухания материала; экспериментально и теоретически установлен механический эффект - зависимость совместной деформируемости нескольких полимерных материалов от характера набухания слоев.

Выделение нерешенных ранее частей общей проблемы

В ряде прикладных проблем техники, в частности, использование слоистых труб из полимерных материалов в прокатке агрессивных жидких сред, в авиационной и ракетной технике при использовании полимерных материалов в работах их в контакте с различного рода агрессивными жидкими и твердыми топливными средами эксплуатационные характеристики производственных конструкций из них как правило резко ухудшаются. Это приводит к преждевременной их потери несущей способности. При этом отметим, на сегодняшний день в технике проектирования конструкций, работающих в контакте с агрессивными жидкими и газообразными средами отсутствуют надежные инженерные методы расчета на прочность конструкций с учетом влияния изменения физико-химических свойств материала. Это связано с тем, что учет влияния диффузионных процессов агрессивных сред в полимерах на прочностные характеристики конструкций вносит значительные трудности [5-9].

В этом контексте остается открытым вопрос - как зависят физико-механические свойства полимеров, композитных материалов, а также, элементов конструкций из них от физико-химической изменяемости материала.

На сегодняшний день имеются лишь отдельные экспериментальные исследования по данной тематике [3,4].

Формулирование целей статьи

Исследуется задача прочности достаточно длинной слоистой трубы с учетом влияния изменения физико-химических свойств полимерных слоев, которые возникают при контакте с агрессивной жидкостью. Каждый слой предполагается кусочно-однородным с механическими свойствами $E_n(\lambda_n)$, $\nu_n(\lambda_n)$, $G_n(\lambda_n)$ и физико-химическими изменениями λ_n , α_n , $\phi_n(\lambda_n)$, $\psi_n(\lambda_n)$, $\eta_n(\lambda_n)$.

Изложение основного материала

Построение физико-математической модели, определение численных значений

перемещений, деформаций, а также напряжений как по толщине слоев трубы, так и в точках контакта в зависимости от физико-химической изменяемости слоев конструкции.

Пусть труба состоит из $(N - 1)$ кусочно-однородных слоев и (N) граничных поверхностей. Пусть слоистая труба находится под действием осевой растягивающей силы P , внутреннего p_a и внешнего p_b давлений.

Целью задачи является определение величин напряжений и деформаций в слоях, а также, определение контактных напряжений между слоями, которые определяют адгезионную прочность, в зависимости как от внешних сил, так и от степени изменения физико-химических свойств слоев возникающего от контакта с агрессивной жидкостью, т.е. от λ_n , α_n , $\phi_n(\lambda_n)$, $\psi_n(\lambda_n)$, $\eta_n(\lambda_n)$, а также, возникающего эффекта распорных массовых сил в слоях слоистой трубы от контакта с агрессивной жидкостью. Здесь параметр $\lambda(t) = \frac{Q(t) - Q_0}{Q_0}$ есть функции набухания во времени полимерного материала находящегося в контакте с агрессивной жидкостью $t_1, t_2, t_3, \dots, t_n$ время; $Q(t) = \gamma(t) \cdot V(t) = \gamma(t) \cdot a(t) \cdot b(t) \cdot \ell(t)$ и $Q_0(t) = \gamma_0 \cdot V_0 = \gamma_0 \cdot a_0 \cdot b_0 \cdot \ell_0$ - текущий и начальные веса полимерных образцов в моменты $t > 0$ и $t = 0$. Задача решается в предположении полного сцепления между слоями [1,2].

Рассмотрим n -ый слой связующего ($r_n \leq r \leq r_{n+1}$) в криволинейной цилиндрической системе координат и соответствующие этим слоям компоненты напряжений σ_{zz} , σ_{yy} , σ_{rr} и деформаций ε_{zz} , ε_{yy} , ε_{rr} (рис.1).

Поскольку структура оболочки симметрична относительно оси и ее длина значительно больше размеров поперечного сечения, в основу расчета положена гипотеза обобщенной плоской деформации: плоские до деформации поперечные сечения всей трубы остаются плоскими и после деформации при всех значениях параметра набухания n -ого полимерного слоя λ_n , т.е. осевая деформация ε_z постоянна по сечению $z = const$; все деформации и напряжения при всех значениях параметра набухания λ_n не зависят от координаты z , если P, p_a, p_b постоянны по длине оболочки или являются медленно изменяющимися по z функциями. Тогда для любого упругого слоя можно использовать соотношения:

$$\varepsilon_{rr} = \frac{dw}{dr}, \varepsilon_{yy} = \frac{w}{r}, \varepsilon_{zz} = \varepsilon = const, \frac{\partial \varepsilon_{zz}}{\partial r} = 0, w = w(r) \quad (1)$$

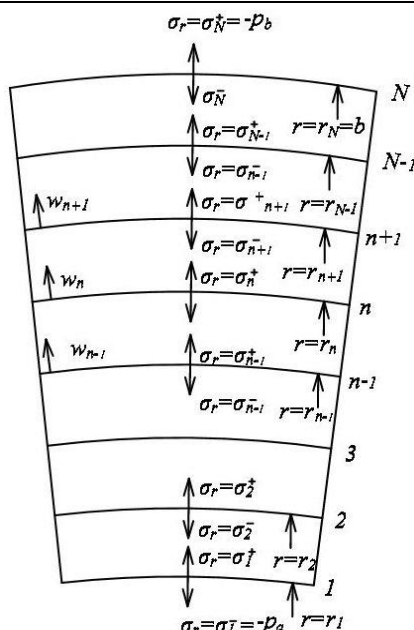


Рис.1. Многослойная труба из полимерного материала.

Обобщенный закон Гука с учетом фактора материала для точек каждого n -го слоя ($r_n \leq r \leq r_{n+1}$) будет в виде [1,2]:

$$\begin{cases} \sigma_{ij} = a_{on} \psi_n(\lambda_n) \cdot \theta \cdot \delta_{ij} + 2G_{on} \phi_n(\lambda_n) \varepsilon_{ij} - \eta_{on} \cdot \eta_n(\lambda_n) \cdot \alpha_n \cdot \tilde{\lambda}_n \cdot \delta_{ij} \\ \sigma(\varepsilon, \lambda_n) = 3a_{on} \psi_n(\lambda_n) [1 + \frac{2G_{on}}{3a_{on}} \cdot \frac{\phi_n(\lambda_n)}{\psi_n(\lambda_n)}] (\theta - 3\tilde{\alpha}_n \tilde{\lambda}_n) \end{cases} \quad (2)$$

Здесь σ_{ij} и ε_{ij} - тензоры напряжений и деформаций; $\theta = \varepsilon_{ii} = \varepsilon_{rr} + \varepsilon_{yy} + \varepsilon_{zz}$ - объемная деформация;

материала для точек каждого n -го слоя ($r_n \leq r \leq r_{n+1}$) будет в виде [1,2]:

$$a_{on} = \frac{E_{on} \nu_{on}}{(1+\nu_{on})(1-2\nu_{on})}, 2G_{on} = \frac{E_{on}}{1+\nu_{on}} \quad (3)$$

-коэффициенты Ляме для n -го слоя без учета набухания, т.е. при $\lambda_n = 0$; λ_n -есть параметр набухания n -ого слоя полимерного материала; α_n - коэффициент линейного набухания n -го слоя;

поправочные коэффициенты $\phi_n(\lambda_n)$, $\psi_n(\lambda_n)$, $\eta_n(\lambda_n)$, зависящие от параметра набухания n -го слоя трубы λ_n имеющие вид:

$$\begin{aligned} \phi_n(\lambda) &= \frac{b_n^{\tilde{\lambda}_n}}{1 + \frac{k_n}{1+\nu_{on}} \tilde{\lambda}_n}, \psi_n(\lambda) = \phi_n(\lambda) \frac{1 + \frac{k_n}{\nu_{on}} \tilde{\lambda}_n}{1 - \frac{2k_n}{1-2\nu_{on}} \tilde{\lambda}_n}, \\ \eta_n(\lambda) &= \frac{b_n^{\tilde{\lambda}_n} \lambda_{nmax}}{1 - \frac{2k_n}{1-2\nu_{on}} \tilde{\lambda}_n}, \eta_{on} = \frac{E_{on}}{1-2\nu_{on}} \end{aligned} \quad (4)$$

$$\tilde{\lambda}_n = \frac{\lambda_n}{\lambda_{nmax}}, k_n = \nu_{on} n_{max}, b_n = \frac{E_{nmin}}{E_{on}}, \tilde{\alpha}_n = \alpha_n \lambda_{max} \quad (5)$$

E_{on} и ν_{on} - модуль упругости и коэффициент Пуассона для n -го слоя без учета набухания, т.е. при $\lambda_n = 0$; здесь $\sigma(\varepsilon, \lambda_n) = \sigma_{ii} = \sigma_{rr} + \sigma_{yy} + \sigma_{zz}$ есть зависимость объемного напряжения от полной объемной деформации в n -ом слое ($r_n \leq r \leq r_{n+1}$).

Дифференциальное уравнение равновесия элементарного объема n -ого слоя в радиальном направлении будет ($r_n \leq r \leq r_{n+1}$):

$$\frac{d\sigma_{rr}}{dr} = \frac{\sigma_{yy} - \sigma_{rr}}{r} \quad (6)$$

Подставляя (2) в (6) и учитывая при этом (1) и выражение $\varepsilon_{yy} = \frac{\partial(r\varepsilon_{yy})}{\partial r}$, уравнение равновесия

элементарного n -ого слоя сведется к дифференциальному уравнению относительно прогиба $w(\lambda)$ вида:

$$\frac{dw}{dr} + \frac{w}{r} = c_n(\lambda) \quad (7)$$

общим интегралом которого будет:

$$w(\lambda) = Ar + \frac{B}{r} \quad (8)$$

Тогда деформации (1) с учетом (8) примут вид:

$$\varepsilon_{yy} = \frac{w}{r} = A + \frac{B}{r^2}, \quad \varepsilon_{rr} = \frac{\partial w}{\partial r} = A - \frac{B}{r^2}, \quad \varepsilon_{zz} = \varepsilon = const \quad (9)$$

Константы A и B определяются граничными условиями для n -го слоя слоистой трубы ($r_n \leq r \leq r_{n+1}$):

$$\begin{aligned} r = r_n, & \quad w = w_n \\ r = r_{n+1}, & \quad w = w_{n+1} \end{aligned} \quad (10)$$

где w_n и w_{n+1} - прогибы контурных точек n -го слоя. Введем обозначения:

$$\varepsilon_{yy} = \frac{w}{r} \Big|_{r=r_n} = \varepsilon_n, \quad \varepsilon_{yy} = \frac{w}{r} \Big|_{r=r_{n+1}} = \varepsilon_{n+1} \quad (11)$$

Удовлетворяя условиям (10) с учетом (8) и (9), константы A и B будут выражены через контурные значения прогибов w_n и w_{n+1} в виде:

$$A = \frac{(wr)_{n+1} - (wr)_n}{r_{n+1}^2 - r_n^2}, \quad B = \frac{(w/r)_{n+1} - (w/r)_n}{r_{n+1}^{-2} - r_n^{-2}} \quad (12)$$

Тогда деформации точек n -го слоя (9) ($r_n \leq r \leq r_{n+1}$) будут выражены через контурные значения деформаций ε_n и ε_{n+1} в виде:

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_{yy} \\ \varepsilon_{rr} \end{pmatrix} = \frac{\varepsilon_{n+1}r_{n+1}^2 - \varepsilon_n r_n^2}{r_{n+1}^2 - r_n^2} \pm \frac{1}{r^2} \cdot \frac{\varepsilon_{n+1} - \varepsilon_n}{r_{n+1}^{-2} - r_n^{-2}} \quad (13)$$

Подставляя (13) и (3) в (2) определим химических свойств материала n -го слоя трубы λ_n , напряжения в точках n -го слоя слоистой трубы по в виде: толщине $r_n \leq r \leq r_{n+1}$ с учетом изменения физико-

$$\begin{aligned} \frac{1}{2G_{on}\phi_n(\lambda_n)} \begin{pmatrix} \sigma_{yy} \\ \sigma_{rr} \end{pmatrix} &= \frac{\nu_{on}}{1 - 2\nu_{on}} \frac{\psi_n(\lambda_n)}{\phi_n(\lambda_n)} \varepsilon_z + \left[1 + \frac{2\nu_{on}}{1 - 2\nu_{on}} \cdot \frac{\psi_n(\lambda_n)}{\phi_n(\lambda_n)} \right] \frac{\varepsilon_{n+1}r_{n+1}^2 - \varepsilon_n r_n^2}{r_{n+1}^2 - r_n^2} \pm \\ &\pm \frac{1}{r^2} \cdot \frac{\varepsilon_{n+1} - \varepsilon_n}{r_{n+1}^{-2} - r_n^{-2}} - \frac{\eta_{on}}{2G_{on}} \frac{\eta_n(\lambda_n)}{\phi_n(\lambda_n)} \alpha_n \tilde{\lambda}_n \end{aligned} \quad (14)$$

(для $n = 1, 2, \dots, N - 1$)

$$\begin{aligned} \frac{1}{2G_{on}\phi_n(\lambda_n)} \sigma_{zz} &= \left[1 + \frac{\nu_{on}}{1 - 2\nu_{on}} \cdot \frac{\psi_n(\lambda_n)}{\phi_n(\lambda_n)} \right] \varepsilon_z + \frac{2\nu_{on}}{1 - 2\nu_{on}} \frac{\psi_n(\lambda_n)}{\phi_n(\lambda_n)} \frac{\varepsilon_{n+1}r_{n+1}^2 - \varepsilon_n r_n^2}{r_{n+1}^2 - r_n^2} - \\ &- \frac{\eta_{on}}{2G_{on}} \frac{\eta_n(\lambda_n)}{\phi_n(\lambda_n)} \cdot \alpha_n \cdot \tilde{\lambda}_n \end{aligned} \quad (15)$$

Тогда из (14) радиальные напряжения на $\sigma_r|_{r=r_{n+1}} = \sigma_{n+1}^-$ n -го слоя слоистой трубы, будут граничных поверхностях $\sigma_r|_{r=r_n} = \sigma_n^+$ и равны:

$$\frac{1}{2G_{on}\phi_n(\lambda_n)} \sigma_n^+ = \frac{\nu_{on}}{1 - 2\nu_{on}} \cdot \frac{\psi_n(\lambda_n)}{\phi_n(\lambda_n)} \varepsilon_z - \frac{1}{r_{n+1}^2 - r_n^2} \left\{ r_{n+1}^2 + \left[1 + \frac{2\nu_{on}}{1 - 2\nu_{on}} \cdot \frac{\psi_n(\lambda_n)}{\phi_n(\lambda_n)} \right] r_n^2 \right\} \cdot \varepsilon_n +$$

$$+ \frac{2r_{n+1}^2}{r_{n+1}^2 - r_n^2} \left[1 + \frac{v_{on}}{1 - 2v_{on}} \frac{\psi_n(\lambda_n)}{\varphi_n(\lambda_n)} \right] \varepsilon_{n+1} - \frac{\eta_{on}}{2G_{on}} \frac{\eta_n(\lambda_n)}{\varphi_n(\lambda_n)} \cdot \alpha_n \cdot \tilde{\lambda}_n \quad (16)$$

(для $n=1, 2, \dots, N-1$)

$$\frac{1}{2G_{on}\varphi_n(\lambda_n)} \sigma_{n+1}^- = \frac{v_{on}}{1 - 2v_{on}} \cdot \frac{\psi_n(\lambda_n)}{\varphi_n(\lambda_n)} \varepsilon_z - \frac{2r_n^2}{r_{n+1}^2 - r_n^2} \left[1 + \frac{v_{on}}{1 - 2v_{on}} \cdot \frac{\psi_n(\lambda_n)}{\varphi_n(\lambda_n)} \right] \varepsilon_n +$$

$$+ \frac{1}{r_{n+1}^2 - r_n^2} \left[r_n^2 + \left(1 + \frac{2v_{on}}{1 - 2v_{on}} \cdot \frac{\psi_n(\lambda_n)}{\varphi_n(\lambda_n)} \right) r_{n+1}^2 \right] \varepsilon_{n+1} - \frac{\eta_{on}}{2G_{on}} \frac{\eta_n(\lambda_n)}{\varphi_n(\lambda_n)} \cdot \alpha_n \cdot \tilde{\lambda}_n \quad (17)$$

(для $n=1, 2, \dots, N-1$)

Адгезионная прочность слоистой трубы на n -ой граничной поверхности с учетом изменения физико-химических свойств слоев определим в виде равенства нулю разности радиальных напряжений σ_n^+ и σ_n^- действующие на n -ой граничной поверхности в виде [1,2]:

$$\Delta\sigma_n = \sigma_n^+ - \sigma_n^- = 0, \quad (\text{для } n=1, 2, \dots, N) \quad (18)$$

Из (17) определим σ_n^- . Для этого в (17) заменим индекс $(n+1)$ на n , получим:

$$\frac{1}{2G_{on-1}\varphi_{n-1}(\lambda_{n-1})} \sigma_n^- = \frac{v_{on-1}}{1 - 2v_{on-1}} \cdot \frac{\psi_{n-1}(\lambda_{n-1})}{\varphi_{n-1}(\lambda_{n-1})} \varepsilon_z - \frac{2r_{n-1}^2}{r_n^2 - r_{n-1}^2} \left[1 + \frac{v_{on-1}}{1 - 2v_{on-1}} \cdot \frac{\psi_{n-1}(\lambda_{n-1})}{\varphi_{n-1}(\lambda_{n-1})} \right] \varepsilon_{n-1} +$$

$$+ \frac{1}{r_n^2 - r_{n-1}^2} \left[r_{n-1}^2 + \left(1 + \frac{2v_{on-1}}{1 - 2v_{on-1}} \cdot \frac{\psi_{n-1}(\lambda_{n-1})}{\varphi_{n-1}(\lambda_{n-1})} \right) r_n^2 \right] \varepsilon_n - \frac{\eta_{on-1}}{2G_{on-1}} \frac{\eta_{n-1}(\lambda_{n-1})}{\varphi_{n-1}(\lambda_{n-1})} \alpha_{n-1} \tilde{\lambda}_{n-1} \quad (19)$$

(для $n=2, \dots, N-1$)

Используя (16) и (19) контактное условие на n -ой граничной поверхности (18) примет вид:

$$4G_{on}\varphi_n(\lambda_n) \frac{r_{n+1}^2}{r_{n+1}^2 - r_n^2} \left(1 + \frac{v_{on}}{1 - 2v_{on}} \frac{\psi_n(\lambda_n)}{\varphi_n(\lambda_n)} \right) \varepsilon_{n+1} - \left\{ \frac{2G_{on}\varphi_n(\lambda_n)}{r_{n+1}^2 - r_n^2} \cdot \left[r_{n+1}^2 + \left(1 + \frac{2v_{on}}{1 - 2v_{on}} \cdot \frac{\psi_n(\lambda_n)}{\varphi_n(\lambda_n)} \right) r_n^2 \right] + \right.$$

$$\left. + \frac{2G_{on-1}\varphi_{n-1}(\lambda_{n-1})}{r_n^2 - r_{n-1}^2} \left[r_{n-1}^2 + \left(1 + \frac{2v_{on-1}}{1 - 2v_{on-1}} \cdot \frac{\psi_{n-1}(\lambda_{n-1})}{\varphi_{n-1}(\lambda_{n-1})} \right) r_n^2 \right] \right\} \varepsilon_n +$$

$$+ 4G_{on-1}\varphi_{n-1}(\lambda_{n-1}) \frac{r_{n-1}^2}{r_n^2 - r_{n-1}^2} \left[1 + \frac{v_{on-1}}{1 - 2v_{on-1}} \cdot \frac{\psi_{n-1}(\lambda_{n-1})}{\varphi_{n-1}(\lambda_{n-1})} \right] \varepsilon_{n-1} +$$

$$+ 2 \left[\frac{G_{on}v_{on}}{1 - 2v_{on}} \cdot \psi_n(\lambda_n) - \frac{G_{on-1}v_{on-1}}{1 - 2v_{on-1}} \cdot \psi_{n-1}(\lambda_{n-1}) \right] \varepsilon_z = \eta_{on}\eta_n(\lambda_n)\alpha_n\tilde{\lambda}_n - \eta_{on-1}\eta_{n-1}(\lambda_{n-1})\alpha_{n-1}\tilde{\lambda}_{n-1}$$

(для $n = 2, \dots, N - 1$) (20)

Значения радиальных напряжений первого σ_1^- и последнего σ_N^+ слоев определяются из граничных условий:

$$r = r_1, \sigma_1^- = -p_a \quad (21)$$

$$r = r_N, \sigma_N^+ = -p_b \quad (22)$$

Из (18) контактные условия на 1-ой и N -ой граничной поверхностях будут в следующем виде:

$$\Delta\sigma_1 = \sigma_1^+ - \sigma_1^- = 0 \quad (23)$$

$$\Delta\sigma_N = \sigma_N^+ - \sigma_N^- = 0 \quad (24)$$

Из (23) и (24) и с учетом (21) и (22) определим σ_1^+ и σ_N^- , в виде:

$$\sigma_1^+ = -p_a, \quad (25)$$

$$\sigma_N^- = -p_b \quad (26)$$

Из (16) при $n = 1$ и (25) получим контактное условие на 1-ой граничной поверхности, в виде:

$$\begin{aligned} \frac{2r_2^2}{r_2^2 - r_1^2} \left(1 + \frac{v_{01}}{1 - 2v_{01}} \frac{\psi_1(\lambda_1)}{\phi_1(\lambda_1)}\right) \varepsilon_2 - \frac{1}{r_2^2 - r_1^2} [r_2^2 + (1 + \frac{2v_{01}}{1 - 2v_{01}} \cdot \frac{\psi_1(\lambda_1)}{\phi_1(\lambda_1)}) r_1^2] \varepsilon_1 + \\ + \frac{v_{01}}{1 - 2v_{01}} \frac{\psi_1(\lambda_1)}{\phi_1(\lambda_1)} \varepsilon_z = \frac{1}{2G_{01}\phi_1(\lambda_1)} [\eta_{01}\eta_1(\lambda_1)\alpha_1\tilde{\lambda}_1 - p_a] \end{aligned} \quad (27)$$

Из (17) при $n = N - 1$ и (26) получим контактное условие на N -ой граничной поверхности, в виде:

$$\begin{aligned} \frac{1}{r_N^2 - r_{N-1}^2} [r_{N-1}^2 + (1 + \frac{2v_{0N-1}}{1 - 2v_{0N-1}} \cdot \frac{\psi_{N-1}(\lambda_{N-1})}{\phi_{N-1}(\lambda_{N-1})}) r_N^2] \varepsilon_N - \frac{2r_{N-1}^2}{r_N^2 - r_{N-1}^2} \cdot [1 + \\ + \frac{v_{0N-1}}{1 - 2v_{0N-1}} \cdot \frac{\psi_{N-1}(\lambda_{N-1})}{\phi_{N-1}(\lambda_{N-1})}] \varepsilon_{N-1} + \frac{v_{0N-1}}{1 - 2v_{0N-1}} \cdot \frac{\psi_{N-1}(\lambda_{N-1})}{\phi_{N-1}(\lambda_{N-1})} \varepsilon_{zz} = \\ = \frac{1}{2G_{0N-1}\phi_{N-1}(\lambda_{N-1})} [\eta_{0N-1} \cdot \eta_{N-1}(\lambda_{N-1}) \cdot \alpha_{N-1} \cdot \tilde{\lambda}_{N-1} - p_b] \end{aligned} \quad (28)$$

Продольная сила P в толстостенной слоистой трубе равна:

$$P = \pi \sum_{n=1}^{N-1} (r_{n+1}^2 - r_n^2) \sigma_{zz} \quad (29)$$

Подставляя (15) в (29), получим:

$$\begin{aligned} 4 \sum_{n=1}^{N-1} G_{0n} \psi_n(\lambda_n) \frac{v_{0n}}{1 - 2v_{0n}} (\varepsilon_{n+1} r_{n+1}^2 - \varepsilon_n r_n^2) + 2\varepsilon_z \cdot \sum_{n=1}^{N-1} G_{0n} \phi_n(\lambda_n) (r_{n+1}^2 - r_n^2) \left(1 + \frac{v_{0n}}{1 - 2v_{0n}} \frac{\psi_n(\lambda_n)}{\phi_n(\lambda_n)}\right) = \\ = \frac{1}{\pi} P + \sum_{n=1}^{N-1} \eta_{0n} \eta_n(\lambda_n) (r_{n+1}^2 - r_n^2) \alpha_n \tilde{\lambda}_n \end{aligned} \quad (30)$$

При этом отметим следующее. В системе алгебраических уравнений (27), (20), (28) и (30) присутствуют параметры набухания λ_n и λ_{n-1} соответствующие разнородным полимерным материалам. Очевидно, что характер изменения физико-химического свойства каждого из полимерных материалов за одинаковый период времени их пребывания в агрессивной жидкой среде будет различным. В связи с этим явлением

нами в работе [9] предложено необходимое математическое условие связи между этими параметрами набухания. Поэтому при нахождении решения алгебраической системы (27), (20), (28) и (30) в качестве математического соотношения между параметрами набухания в n -ой и $(n - 1)$ -ой слоями слоистой трубы следует использовать условие следующего вида [1]:

$$\lambda_n = \frac{q_n}{q_{n-1}} \lambda_{n-1} \quad (31)$$

Здесь q_n и q_{n-1} - есть линейные коэффициенты в зависимостях параметра набухания λ_n от времени t в n -ой и $(n - 1)$ -ой полимерных слоях слоистой трубы. Таким образом, система уравнений (27), (20), (28) и (30) представляет $(N + 1)$ линейно-алгебраическое уравнение с таким же числом неизвестных тангенциальных $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_N$ и продольной ε_{zz} деформаций с учетом физико-химической изменяемостью слоев трубы и эффекта

распорных массовых сил возникающих в слоях. Если решение системы уравнений (27), (20), (28) и (30) найдено относительно внешних нагрузок P, p_a, p_b и параметров набухания λ_n , то по формуле(14) - (15) нетрудно определить распределение напряжений по толщине слоев трубы, а также, адгезионную прочность, т.е. максимальное отрывающее напряжение между слоями по формуле:

$$(\sigma_{\text{отр}}) \max \left(\frac{\sigma_n^+}{\sigma_n^-} \right)_{\max} \quad (32)$$

Частный случай. При рассмотрении частного случая многослойной трубы находящейся только под действием эффекта набухания необходимо будет в алгебраической системе (27), (20), (28) и (30) внешние механические нагрузки P, p_a, p_b приравнять нулю. Этот случай интересен в смысле изучения характера распределения напряжений и деформаций за счет влияния физико-химического изменения материала слоев. При этом представляет интерес знание максимальных отрывающих напряжений на границах между слоями (32) в зависимости от изменения физико-химических свойств материала слоев и распорных массовых сил, возникающих в слоистой трубе.

$$1\text{-ый слой} - E_{01}, \nu_{01}, G_{01}, \eta_{01}, \lambda_1, \alpha_1, \phi_1(\lambda_1), \psi_1(\lambda_1), \eta_1(\lambda_1)$$

$$2\text{-ой слой} - E_{02}, \nu_{02}, G_{02}, \eta_{02}, \lambda_2, \alpha_2, \phi_2(\lambda_2), \psi_2(\lambda_2), \eta_2(\lambda_2) \quad (33)$$

Определим напряжения и деформации в слоях и максимальные отрывающие напряжения между слоями, определяющие адгезионную прочность слоистой трубы, находящейся под совместным действием внешних нагрузок p_a, p_b, P и сил набухания материала слоев λ_n . Решение задачи будет определено с помощью полученных в

Напряженно-деформированное состояние двухслойной трубы **находящейся под действием агрессивной жидкой среды и внешних нагрузок**

Исследуем задачу прочности двухслойной трубы, состоящей из полимерных материалов с учетом изменения физико-химических свойств слоев, а также, от возникающих распорных массовых сил в слоях слоистой трубы, которая возникает при контакте с агрессивной жидкостью [1]. Предполагается, что слои трубы кусочно-однородные со следующими заданными механическими и физико-химическими свойствами:

предыдущем параграфе общих уравнений. Для этого в системе уравнений (27), (20), (28) и (30) примем $n = 2$. Задача сведется к системе 4 алгебраических уравнений относительно неизвестных контурных значений тангенциальных $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ и продольной $\varepsilon_z = \varepsilon_4$ деформаций, вида:

$$-\frac{1}{r_2^2 - r_1^2} [r_2^2 + (1 + \frac{2\nu_{01}}{1 - 2\nu_{01}} \frac{\psi_1(\lambda_1)}{\phi_1(\lambda_1)})r_1^2] \varepsilon_1 + \frac{2r_2^2}{r_2^2 - r_1^2} (1 + \frac{\nu_{01}}{1 - 2\nu_{01}} \frac{\psi_1(\lambda_1)}{\phi_1(\lambda_1)}) \varepsilon_2 + \frac{\nu_{01}}{1 - 2\nu_{01}} \frac{\psi_1(\lambda_1)}{\phi_1(\lambda_1)} \varepsilon_{zz} = \frac{1}{2G_{01}\phi_1(\lambda_1)} [\eta_{01}\eta_1(\lambda_1) \cdot \alpha_1 \cdot \tilde{\lambda}_1 - p_a] \quad (34)$$

$$4G_{01}\phi_1(\lambda_1) \frac{r_1^2}{r_2^2 - r_1^2} (1 + \frac{\nu_{01}}{1 - 2\nu_{01}} \frac{\psi_1(\lambda_1)}{\phi_1(\lambda_1)}) \varepsilon_1 - \{ \frac{2G_{02}\phi_2(\lambda_2)}{r_3^2 - r_2^2} [r_3^2 + (1 + \frac{2\nu_{02}}{1 - 2\nu_{02}} \frac{\psi_2(\lambda_2)}{\phi_2(\lambda_2)}) \cdot r_2^2] + \frac{2G_{01}\phi_1(\lambda_1)}{r_2^2 - r_1^2} [r_1^2 + (1 + \frac{2\nu_{01}}{1 - 2\nu_{01}} \frac{\psi_1(\lambda_1)}{\phi_1(\lambda_1)}) \cdot r_2^2] \} \varepsilon_2 + 4G_{02}\phi_2(\lambda_2) \frac{r_3^2}{r_3^2 - r_2^2} (1 + \frac{\nu_{02}}{1 - 2\nu_{02}} \frac{\psi_2(\lambda_2)}{\phi_2(\lambda_2)}) \varepsilon_3 + 2[\frac{G_{02}\nu_{02}}{1 - 2\nu_{02}} \psi_2(\lambda_2) - \frac{G_{01}\nu_{01}}{1 - 2\nu_{01}} \psi_1(\lambda_1)] \cdot \varepsilon_{zz} = \eta_{02}\eta_2(\lambda_2)\alpha_2\tilde{\lambda}_2 - \eta_{01}\eta_1(\lambda_1)\alpha_1\tilde{\lambda}_1 \quad (35)$$

$$\frac{1}{r_3^2 - r_2^2} [r_2^2 + (1 + \frac{2\nu_{02}}{1 - 2\nu_{02}} \frac{\psi_2(\lambda_2)}{\phi_2(\lambda_2)})r_3^2] \varepsilon_3 - \frac{2r_2^2}{r_3^2 - r_2^2} [1 + \frac{\nu_{02}}{1 - 2\nu_{02}} \frac{\psi_2(\lambda_2)}{\phi_2(\lambda_2)}] \varepsilon_2 + \frac{\nu_{02}}{1 - 2\nu_{02}} \frac{\psi_2(\lambda_2)}{\phi_2(\lambda_2)} \varepsilon_{zz} = \frac{1}{2G_{02}\phi_2(\lambda_2)} [\eta_{02}\eta_2(\lambda_2)\alpha_2\tilde{\lambda}_2 - p_b] \quad (36)$$

$$4 \sum_{n=1}^2 G_{on} \psi_n(\lambda_n) \frac{\nu_{on}}{1 - 2\nu_{on}} (\varepsilon_{n+1} r_{n+1}^2 - \varepsilon_n r_n^2) + 2\varepsilon_{zz} \sum_{n=1}^2 G_{on} \phi_n(\lambda_n) (r_{n+1}^2 - r_n^2) (1 + \frac{\nu_{on}}{1 - 2\nu_{on}} \frac{\psi_n(\lambda_n)}{\phi_n(\lambda_n)}) = \frac{1}{\pi} P + \sum_{n=1}^2 \eta_{on} \eta_n(\lambda_n) (r_{n+1}^2 - r_n^2) \alpha_n \tilde{\lambda}_n \quad (37)$$

При этом отметим следующее. В силу разнородности полимерных материалов 1-ого и 2-

ого слоев трубы, математическое соотношение (31) между параметрами λ_1 и λ_2 будет в виде:

$$\lambda_2 = \frac{q_2}{q_1} \lambda_1 \quad (38)$$

Где q_1 и q_2 представляют собою коэффициенты линейных зависимостей $\lambda = \lambda(t)$ для каждого слоя слоистой трубы. Они определяются экспериментальным путем. Например, принимая для материала 1-ого слоя

значение $\lambda_1 = \lambda_{1max}$, тогда ему соответствующее значение для параметра λ_2 будет определяться соотношением (38) в виде:

$$\lambda_2 = \frac{q_2}{q_1} \lambda_{21max}^* \quad (39)$$

Система уравнений (34)-(37) (2.3.2)-(2.3.5) относительно $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3, \varepsilon_4 = \varepsilon_z$. Эту систему линейно-алгебраическая система 4-х уравнений запишем в матричной форме:

$$a_{ij}\varepsilon_j = b_i \quad (40)$$

Где

$$\begin{aligned} a_{11} &= -\frac{1}{r_2^2 - r_1^2} [r_2^2 + (1 + \frac{2\nu_{01}}{1-2\nu_{01}} \frac{\psi_1(\lambda_1)}{\phi_1(\lambda_1)})r_1^2], a_{12} = \frac{2r_2^2}{r_2^2 - r_1^2} (1 + \frac{\nu_{01}}{1-2\nu_{01}} \frac{\psi_1(\lambda_1)}{\phi_1(\lambda_1)}) \\ a_{13} &= 0, a_{14} = \frac{\nu_{01}}{1-2\nu_{01}} \frac{\psi_1(\lambda_1)}{\phi_1(\lambda_1)}, b_1 = \frac{1}{2G_0\phi_1(\lambda_1)} [\eta_{01}\eta_1(\lambda_1)\alpha_1\tilde{\lambda}_1 - p_a] \\ a_{21} &= 4G_{01}\phi_1(\lambda_1) \frac{r_1^2}{r_2^2 - r_1^2} (1 + \frac{\nu_{01}}{1-2\nu_{01}} \frac{\psi_1(\lambda_1)}{\phi_1(\lambda_1)}), \\ -a_{22} &= \frac{2G_{02}\phi_2(\lambda_2)}{r_3^2 - r_2^2} [r_3^2 + (1 + \frac{2\nu_{02}}{1-2\nu_{02}} \frac{\psi_2(\lambda_2)}{\phi_2(\lambda_2)})r_2^2] + \frac{2G_{01}\phi_1(\lambda_1)}{r_2^2 - r_1^2} [r_1^2 + (1 + \frac{2\nu_{01}}{1-2\nu_{01}} \frac{\psi_1(\lambda_1)}{\phi_1(\lambda_1)})r_2^2] \\ a_{23} &= 4G_{02}\phi_2(\lambda_2) \frac{r_3^2}{r_3^2 - r_2^2} (1 + \frac{\nu_{02}}{1-2\nu_{02}} \frac{\psi_2(\lambda_2)}{\phi_2(\lambda_2)}), a_{24} = 2[\frac{G_{02}\nu_{02}}{1-2\nu_{02}} \psi_2(\lambda_2) - \frac{G_{01}\nu_{01}}{1-2\nu_{01}} \psi_1(\lambda_1)], \\ b_2 &= \eta_{02}\eta_2(\lambda_2)\alpha_2\tilde{\lambda}_2 - \eta_{01}\eta_1(\lambda_1)\alpha_1\tilde{\lambda}_1, a_{31} = 0, a_{32} = -\frac{2r_2^2}{r_3^2 - r_2^2} [1 + \frac{\nu_{02}}{1-2\nu_{02}} \frac{\psi_2(\lambda_2)}{\phi_2(\lambda_2)}], \\ a_{33} &= \frac{1}{r_3^2 - r_2^2} [r_2^2 + (1 + \frac{2\nu_{02}}{1-2\nu_{02}} \frac{\psi_2(\lambda_2)}{\phi_2(\lambda_2)})r_3^2], a_{34} = \frac{\nu_{02}}{1-2\nu_{02}} \frac{\psi_2(\lambda_2)}{\phi_2(\lambda_2)}, \\ b_3 &= \frac{1}{2G_{02}\phi_2(\lambda_2)} [\eta_{02}\eta_2(\lambda_2)\alpha_2\tilde{\lambda}_2 - p_b], a_{41} = -4G_{01}\psi_1(\lambda_1) \frac{\nu_{01}}{1-2\nu_{01}} r_1^2, a_{42} = \\ 4r_2^2 [G_{01}\psi_1(\lambda_1) \frac{\nu_{01}}{1-2\nu_{01}} - G_{02} \frac{\nu_{02}}{1-2\nu_{02}} \psi_2(\lambda_2)], a_{43} &= 4r_3^2 G_{02} \frac{\nu_{02}}{1-2\nu_{02}} \psi_2(\lambda_2), \\ a_{44} &= 2 \sum_{n=1}^2 G_{0n} \phi_n(\lambda_n) (r_{n+1}^2 - r_n^2) [1 + \frac{\nu_{0n}}{1-2\nu_{0n}} \frac{\psi_n(\lambda_n)}{\phi_n(\lambda_n)}], b_4 = \frac{1}{\pi} P + \sum_{n=1}^2 \eta_{0n} \eta_n(\lambda_n) (r_{n+1}^2 - r_n^2) \alpha_n \tilde{\lambda}_n \end{aligned} \quad (41)$$

По правилу Крамера деформации ε_{ij} будут равны:

$$\varepsilon_j = \frac{|D_{x_j}|_4}{|a_{ij}|_4} = \frac{\sum_{i=1}^4 (-1)^{j+i} b_i B_{ij}^j}{\sum_{k=1}^4 (-1)^{1+k} a_{1k} A_{1k}} \quad (42)$$

Здесь A_{1k} есть миноры определителя $|a_{ij}|_4$, а B_{ij}^j - есть миноры определителей $|D_{x_j}|_4$. Задаваясь механическими и физико-химическими свойствами слоев 2-хслойной трубы $E_{0i}, \nu_{0i}, G_{0i}, \lambda_i, \alpha_{0i}, \tilde{\lambda}_{0i}, \phi_i(\lambda_i), \psi_i(\lambda_i), \eta_{0i}, \eta_i(\lambda_i)$, а также, геометрическими характеристиками конструкции r_1, r_2, r_3 , деформации $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3, \varepsilon_4 = \varepsilon_z$ согласно (42)

определяются однозначно в зависимости от внешних нагрузок p_a, p_b, P с учетом эффекта изменчивости физико-химических свойств слоев. Определив численные значения тангенциальных и продольной деформаций $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3, \varepsilon_4 = \varepsilon_z$ 1-ого и 2-ого слоя, по формулам (14)- (15) найдем распределение напряжений по толщине слоев, в виде:

для 1-ого слоя:

$$\begin{aligned} \frac{1}{2G_{01}\phi_1(\lambda_1)} (\sigma_{yy}) &= \frac{\nu_{01}}{1-2\nu_{01}} \frac{\psi_1(\lambda_1)}{\phi_1(\lambda_1)} \varepsilon_{zz} + [1 + \frac{2\nu_{01}}{1-2\nu_{01}} \frac{\psi_1(\lambda_1)}{\phi_1(\lambda_1)}] \frac{\varepsilon_2 r_2^2 - \varepsilon_1 r_1^2}{r_2^2 - r_1^2} \pm \\ &\pm \frac{1}{r^2} \cdot \frac{\varepsilon_2 - \varepsilon_1}{r_2^{-2} - r_1^{-2}} - \frac{\eta_{01}}{2G_{01}} \frac{\eta_1(\lambda_1)}{\phi_1(\lambda_1)} \alpha_1 \tilde{\lambda}_1 \end{aligned} \quad (43)$$

$$\begin{aligned} \frac{1}{2G_{01}\phi_1(\lambda_1)} \sigma_{zz} &= [1 + \frac{\nu_{01}}{1-2\nu_{01}} \frac{\psi_1(\lambda_1)}{\phi_1(\lambda_1)}] \varepsilon_{zz} + \frac{2\nu_{01}}{1-2\nu_{01}} \frac{\psi_1(\lambda_1)}{\phi_1(\lambda_1)} \frac{\varepsilon_2 r_2^2 - \varepsilon_1 r_1^2}{r_2^2 - r_1^2} - \\ &- \frac{\eta_{01}}{2G_{01}} \frac{\eta_1(\lambda_1)}{\phi_1(\lambda_1)} \cdot \alpha_1 \cdot \tilde{\lambda}_1 \end{aligned} \quad (44)$$

для 2-ого слоя:

$$\begin{aligned} \frac{1}{2G_{02}\phi_2(\lambda_2)} (\sigma_{yy}) &= \frac{\nu_{02}}{1-2\nu_{02}} \frac{\psi_2(\lambda_2)}{\phi_2(\lambda_2)} \varepsilon_{zz} + [1 + \frac{2\nu_{02}}{1-2\nu_{02}} \frac{\psi_2(\lambda_2)}{\phi_2(\lambda_2)}] \frac{\varepsilon_3 r_3^2 - \varepsilon_2 r_2^2}{r_3^2 - r_2^2} \pm \\ &\pm \frac{1}{r^2} \cdot \frac{\varepsilon_3 - \varepsilon_2}{r_3^{-2} - r_2^{-2}} - \frac{\eta_{02}}{2G_{02}} \frac{\eta_2(\lambda_2)}{\phi_2(\lambda_2)} \alpha_2 \tilde{\lambda}_2 \end{aligned} \quad (45)$$

$$\frac{1}{2G_{02}\phi_2(\lambda_2)} \sigma_{zz} = [1 + \frac{\nu_{02}}{1-2\nu_{02}} \frac{\psi_2(\lambda_2)}{\phi_2(\lambda_2)}] \varepsilon_{zz} + \frac{2\nu_{02}}{1-2\nu_{02}} \frac{\psi_2(\lambda_2)}{\phi_2(\lambda_2)} \frac{\varepsilon_3 r_3^2 - \varepsilon_2 r_2^2}{r_3^2 - r_2^2} -$$

$$-\frac{\eta_{02} \eta_2(\lambda_2)}{2G_{02} \phi_2(\lambda_2)} \cdot \alpha_2 \cdot \tilde{\lambda}_2 \quad (46)$$

При $r = r_1$, $r = r_2$ и $r = r_3$ по формулам (43)- (46) определим радиальные напряжения σ_1^+ , σ_2^+ , σ_2^- , σ_3^- и, аналогично, тангенциальные напряжения на граничных поверхностях, в виде:

$$\begin{aligned} \frac{1}{2G_{01}\phi_1(\lambda_1)} \sigma_1^+ = & \frac{\nu_{01}}{1-2\nu_{01}} \frac{\psi_1(\lambda_1)}{\phi_1(\lambda_1)} \varepsilon_4 + \frac{2r_2^2}{r_2^2 - r_1^2} \left[1 + \frac{\nu_{01}}{1-2\nu_{01}} \cdot \frac{\psi_1(\lambda_1)}{\phi_1(\lambda_1)} \right] \cdot \varepsilon_2 - \\ & - \frac{1}{r_2^2 - r_1^2} \left[r_2^2 + \left(1 + \frac{2\nu_{01}}{1-2\nu_{01}} \cdot \frac{\psi_1(\lambda_1)}{\phi_1(\lambda_1)} \right) r_1^2 \right] \cdot \varepsilon_1 - \frac{\eta_{01} \eta_1(\lambda_1)}{2G_{01} \phi_1(\lambda_1)} \alpha_1 \tilde{\lambda}_1 \end{aligned} \quad (47)$$

$$\begin{aligned} \frac{1}{2G_{01}\phi_1(\lambda_1)} \sigma_2^- = & \frac{\nu_{01}}{1-2\nu_{01}} \frac{\psi_1(\lambda_1)}{\phi_1(\lambda_1)} \varepsilon_4 + \frac{1}{r_2^2 - r_1^2} \left[r_1^2 + \left(1 + \frac{2\nu_{01}}{1-2\nu_{01}} \cdot \frac{\psi_1(\lambda_1)}{\phi_1(\lambda_1)} \right) r_2^2 \right] \cdot \varepsilon_2 - \\ & - \frac{2r_1^2}{r_2^2 - r_1^2} \left[1 + \frac{\nu_{01}}{1-2\nu_{01}} \cdot \frac{\psi_1(\lambda_1)}{\phi_1(\lambda_1)} \right] \cdot \varepsilon_1 - \frac{\eta_{01} \eta_1(\lambda_1)}{2G_{01} \phi_1(\lambda_1)} \alpha_1 \tilde{\lambda}_1 \end{aligned} \quad (48)$$

$$\begin{aligned} \frac{1}{2G_{02}\phi_2(\lambda_2)} \sigma_2^+ = & \frac{\nu_{02}}{1-2\nu_{02}} \frac{\psi_2(\lambda_2)}{\phi_2(\lambda_2)} \varepsilon_4 + \frac{2r_3^2}{r_3^2 - r_2^2} \left[1 + \frac{\nu_{02}}{1-2\nu_{02}} \cdot \frac{\psi_2(\lambda_2)}{\phi_2(\lambda_2)} \right] \cdot \varepsilon_3 - \\ & - \frac{1}{r_3^2 - r_2^2} \left[r_3^2 + \left(1 + \frac{2\nu_{02}}{1-2\nu_{02}} \cdot \frac{\psi_2(\lambda_2)}{\phi_2(\lambda_2)} \right) r_2^2 \right] \cdot \varepsilon_2 - \frac{\eta_{02} \eta_2(\lambda_2)}{2G_{02} \phi_2(\lambda_2)} \alpha_2 \tilde{\lambda}_2 \end{aligned} \quad (49)$$

$$\begin{aligned} \frac{1}{2G_{02}\phi_2(\lambda_2)} \sigma_3^- = & \frac{\nu_{02}}{1-2\nu_{02}} \frac{\psi_2(\lambda_2)}{\phi_2(\lambda_2)} \varepsilon_4 + \frac{1}{r_3^2 - r_2^2} \left[r_2^2 + \left(1 + \frac{2\nu_{02}}{1-2\nu_{02}} \cdot \frac{\psi_2(\lambda_2)}{\phi_2(\lambda_2)} \right) r_3^2 \right] \cdot \varepsilon_3 - \\ & - \frac{2r_2^2}{r_3^2 - r_2^2} \left[1 + \frac{\nu_{02}}{1-2\nu_{02}} \cdot \frac{\psi_2(\lambda_2)}{\phi_2(\lambda_2)} \right] \cdot \varepsilon_2 - \frac{\eta_{02} \eta_2(\lambda_2)}{2G_{02} \phi_2(\lambda_2)} \alpha_2 \tilde{\lambda}_2 \end{aligned} \quad (50)$$

Частный случай. Рассмотрим 2-хслойную трубу, состоящую из полимерного материала, находящейся под действием только влияния агрессивной жидкой среды. Этот случай интересен в смысле изучения и знания качественного и количественного характера распределения напряжений и деформаций в слоях конструкции за счет влияния физико-химического изменения материала слоев. При этом представляет также особый интерес определение максимальных отрывающих напряжений на границах между слоями в зависимости от изменения физико-химических свойств материала слоев и возникающих в слоях распорных массовых сил. Для решения этой задачи используем формулы(47)-(50) в которых приравняем нулю внешние механические нагрузки P , p_a и p_b . Численный расчет проведем при следующих входящих данных. Внутренний слой 2-хслойной трубы выполнен из полимерного материала марки «полиэтилен низкой плотности» (ПЭНП) и наружного слоя - полимера марки «полистерол ударопрочный» (ПС). Со следующими геометрическими размерами, механическими свойствами и физико-химическими характеристиками слоев:

- геометрические размеры конструкции 2-хслойной трубы:

$$\begin{cases} -13,5977 \cdot \varepsilon_1 + 21,29 \cdot \varepsilon_2 + 0 \cdot \varepsilon_3 + 3,3462 \cdot \varepsilon_4 = 0,11 - 0,0683 \cdot p_a \\ 184,3615 \cdot \varepsilon_1 - 1836,6211 \cdot \varepsilon_2 + 1918,6245 \cdot \varepsilon_3 + 91,2574 \cdot \varepsilon_4 = 0,8146 \\ 0 \cdot \varepsilon_1 - 14,6245 \cdot \varepsilon_2 + 18,4705 \cdot \varepsilon_3 + 1,423 \cdot \varepsilon_4 = 0,0246 \\ -0,9794 \cdot \varepsilon_1 - 3,0845 \cdot \varepsilon_2 + 6,3102 \cdot \varepsilon_3 + 1,776 \cdot \varepsilon_4 = 0,0247 + 0,3185 \cdot P \end{cases} \quad (51)$$

Решением системы (51) при $P = p_a = p_b = 0$ будет:

$$r_1 = 0,1\text{м}, r_2 = 0,13\text{м}, r_3 = 0,15\text{м}.$$

- механические свойства и физико-химические характеристиками внутреннего слоя (полимера ПЭНП):

$$\begin{aligned} \alpha_1 = 0,3452, \lambda_{1max}, E_{01} = 34\text{МПа}, \nu_{01} = 0,4, \\ E_{0min}, \nu_{1max}, b_1 = 0,61765, k_1 = 0,035, \\ q_1 = 0,0104, \tilde{\alpha}_1 = \alpha_1 \lambda_{1max}, 2G_{01} = 24,2857\text{МПа}, \\ a_{01} = 48,5714, \eta_{01} = 170, \phi_1(\lambda_1)|_{\tilde{\lambda}_1=1} = 0,6026, \\ \psi_1(\lambda_1)|_{\tilde{\lambda}_1=1} = 1,0082, \eta_1(\lambda_1)|_{\tilde{\lambda}_1=1} = 0,0274, \\ \gamma_1 = 9025,2 \frac{\text{Н}}{\text{м}^3}. \end{aligned}$$

- механические свойства и физико-химические характеристиками наружного слоя (полимера ПС):

$$\begin{aligned} \alpha_2 = 0,2333, \lambda_{2max}, E_{02} = 153,5\text{МПа}, \\ \nu_{02} = 0,33, \nu_{2max}, E_{2min}, b_2 = 0,8795, k_2 = 0,04, \\ q_2 = 0,0072, \tilde{\alpha}_2 = \alpha_2 \lambda_{2max}, 2G_{02} = 115,4135\text{МПа}, \\ a_{02} = 112,019, \eta_{02} = 451,4706, \phi_2(\lambda_2)|_{\tilde{\lambda}_2=1} = \\ 0,8538, \psi_2(\lambda_2)|_{\tilde{\lambda}_2=1} = 1,2518, \eta_2(\lambda_2)|_{\tilde{\lambda}_2=1} = 0,023, \\ \gamma_2 = 10300,5 \frac{\text{Н}}{\text{м}^3}. \end{aligned}$$

В этом случае алгебраическая система(40) относительно контурных тангенциальных деформаций ε_1 , ε_2 , ε_3 и продольной деформации $\varepsilon_4 = \varepsilon_{zz}$ будет в виде:

$$\varepsilon_1 = 0,0034, \varepsilon_2 = 0,0064, \varepsilon_3 = 0,006, \varepsilon_4 = 0,0057 \quad (52)$$

В этом случае численные значения перемещений точек граничных поверхностей будут равны:

$$\begin{aligned} w|_{r_1=0,1\text{м}} = \varepsilon_1 r|_{r_1=0,1\text{м}} = 0,34\text{мм}, w|_{r_2=0,13\text{м}} = \varepsilon_2 r|_{r_2=0,13\text{м}} = 0,832\text{мм}, \\ w|_{r_3=0,15\text{м}} = \varepsilon_3 r|_{r_3=0,15\text{м}} = 0,9\text{мм} \end{aligned} \quad (53)$$

Подставляя численные значения найдем распределение напряжений по толщине тангенциальных и продольной деформаций 1-ого и 2-ого слоя. Они будут в виде:

$\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3, \varepsilon_4 = \varepsilon_z$ (52), по формулам (43)-(46)
для 1-ого слоя:

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} \sigma_y \\ \sigma_r \end{pmatrix} = 0,4654 \mp 0,0001 \cdot \frac{1}{r^2} \\ \sigma_{zz} = 0,1741 \quad \text{для } 0,1\text{м} \leq r_1 \leq 0,13\text{м} \end{aligned} \quad (54)$$

для 2-ого слоя:

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} \sigma_y \\ \sigma_r \end{pmatrix} = -0,2759 \pm 0,003 \cdot \frac{1}{r^2} \\ \sigma_{zz} = -0,0591 \quad \text{для } 0,13\text{м} \leq r_1 \leq 0,15\text{м} \end{aligned} \quad (55)$$

По формулам (54)-(55) определим численные значения радиальных напряжений в точках граничных поверхностей:

$$\begin{aligned} \sigma_1^+ = \sigma_r|_{r_1=0,1\text{м}} = 0,4754\text{МПа}, \sigma_2^- = \sigma_r|_{r_2=0,13\text{м}} = 0,4603\text{МПа} \\ \sigma_2^+ = \sigma_r|_{r_2=0,13\text{м}} = -0,4534\text{МПа}, \sigma_3^- = \sigma_r|_{r_3=0,15\text{м}} = -0,4092\text{МПа} \end{aligned} \quad (56)$$

Из (55) видно, что радиальные напряжения в точках граничных поверхностей двухслойной трубы, находящейся под действием только агрессивной жидкой среды, достигают порядка $4,7 \frac{\text{кГ}}{\text{см}^2}$. Другими словами, это есть результат возникающей распорной массовой силы от физико-химического изменения полимерных слоев трубы.

Выводы из данного исследования

1. Формулами (52)-(56) полностью определяются количественные значения перемещений, деформаций, а также, напряжений, как по толщине слоев трубы, так и в точках контакта в зависимости от физико-химической изменяемости слоев конструкции.

2. Во-вторых, результаты этих исследований позволяют для практических целей проектировать надежные конструкции, предназначенные для работ в агрессивных жидких средах.

Список литературы

1. Алиев Г.Г. Основы механики полимерных и композитных материалов с учетом изменения физико-химических свойств. / **Баку.**: Изд. «ЭЛИМ» НАНА, 2012г.-286 стр.
2. Aliyev G.G., Naqiyev F.B. Engineering Mechanics of Polymeric Materials. / USA.: CPC Press,

Taylor and Francis Group., 2013.- pp.267., ISBN 978-1-926895-55-0.

3. Тынный А.Н., Прочность и разрушение полимеров под воздействием жидких агрессивных сред. / Киев: Наукова думка, 1975г., 206 с.

4. Степанов Р.Д., Шленский О.Ф., Расчет на прочность конструкций из пластмасс, работающих в жидких средах. / Москва: Изд. Машиностроение, 1981г., 370 с.

5. Зуев Б.С. Разрушение полимеров под действием агрессивных сред. Москва, Изд. Химия, 1972г., 235с.

6. Манин В.А. , Громов А.Н. Физико-химическая стойкость полимерных материалов в условиях эксплуатации., / Ленинград. Изд. Химия, 1980 г.

7. Саммерфилд М., Исследование ракетных двигателей на твердом топливе. / Москва, Изд. Иностранная Литература, 1963г.

8. Шапиро Я.М., Мазинг Г.Ю., Прудников Н.Е. Основы проектирования ракет на твердом топливе. /Москва, Изд. Военное ведомство, 1968г.

9. Shen F.C., ChEn T.S., Huang I.M. The effect of main-flow radial velocity on the stability of developing laminar pipe flow. Appl. Mech., 1976, vol. 43, 2, p.209-213.

#11(75), 2021 часть 2
Восточно Европейский научный журнал
(Санкт-Петербург, Россия)
Журнал зарегистрирован и издается в России
В журнале публикуются статьи по всем
научным направлениям.
Журнал издается на русском, английском и
польском языках.

Статьи принимаются до 30 числа каждого
месяца.

Периодичность: 12 номеров в год.

Формат - А4, цветная печать

Все статьи рецензируются

Бесплатный доступ к электронной версии
журнала.

Редакционная коллегия

Главный редактор - Адам Барчук

Миколай Вишневецки

Шимон Анджеевский

Доминик Маковски

Павел Левандовски

Ученый совет

Адам Новицки (Варшавский университет)

Михал Адамчик (Институт
международных отношений)

Питер Коэн (Принстонский университет)

Матеуш Яблоньски (Краковский
технологический университет имени
Тадеуша Костюшко)

Петр Михалак (Варшавский университет)

Ежи Чарнецкий (Ягеллонский университет)

Колуб Френнен (Тюбингенский
университет)

Бартош Высоцкий (Институт
международных отношений)

Патрик О'Коннелл (Париж IV Сорбонна)

Мацей Качмарчик (Варшавский
университет)

#11(75), 2021 part 2
Eastern European Scientific Journal
(St. Petersburg, Russia)
The journal is registered and published in Russia
The journal publishes articles on all scientific
areas.
The journal is published in Russian, English
and Polish.

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

Periodicity: 12 issues per year.

Format - A4, color printing

All articles are reviewed

Free access to the electronic version of journal

Editorial

Editor-in-chief - Adam Barczuk

Mikolaj Wisniewski

Szymon Andrzejewski

Dominik Makowski

Pawel Lewandowski

Scientific council

Adam Nowicki (University of Warsaw)

Michal Adamczyk (Institute of International
Relations)

Peter Cohan (Princeton University)

Mateusz Jablonski (Tadeusz Kosciuszko
Cracow University of Technology)

Piotr Michalak (University of Warsaw)

Jerzy Czarnecki (Jagiellonian University)

Kolub Frennen (University of Tübingen)

Bartosz Wysocki (Institute of International
Relations)

Patrick O'Connell (Paris IV Sorbonne)

Maciej Kaczmarczyk (University of Warsaw)

Давид Ковалик (Краковский технологический университет им. Тадеуша Костюшко)

Питер Кларквуд (Университетский колледж Лондона)

Игорь Дзедзич (Польская академия наук)

Александр Клиmek (Польская академия наук)

Александр Роговский (Ягеллонский университет)

Кехан Шрайнер (Еврейский университет)

Бартош Мазуркевич (Краковский технологический университет им. Тадеуша Костюшко)

Энтони Маверик (Университет Бар-Илан)

Миколай Жуковский (Варшавский университет)

Матеуш Маршалек (Ягеллонский университет)

Шимон Матысяк (Польская академия наук)

Михал Невядомский (Институт международных отношений)

Главный редактор - Адам Барчук

Dawid Kowalik (Kracow University of Technology named Tadeusz Kościuszko)

Peter Clarkwood (University College London)

Igor Dziedzic (Polish Academy of Sciences)

Alexander Klimek (Polish Academy of Sciences)

Alexander Rogowski (Jagiellonian University)

Kehan Schreiner (Hebrew University)

Bartosz Mazurkiewicz (Tadeusz Kościuszko Cracow University of Technology)

Anthony Maverick (Bar-Ilan University)

Mikołaj Żukowski (University of Warsaw)

Mateusz Marszałek (Jagiellonian University)

Szymon Matysiak (Polish Academy of Sciences)

Michał Niewiadomski (Institute of International Relations)

Editor in chief - Adam Barczuk

1000 экземпляров.

Отпечатано в ООО «Логика+»

198320, Санкт-Петербург,

Город Красное Село,

ул. Геологическая,

д. 44, к. 1, литера А

«Восточно Европейский Научный Журнал»

Электронная почта: info@eesa-journal.com,

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

1000 copies.

Printed by Logika + LLC

198320, Region: St. Petersburg,

Locality: Krasnoe Selo Town,

Geologicheskaya 44 Street,

Building 1, Litera A

"East European Scientific Journal"

Email: info@eesa-journal.com,

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