

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

СУЧАСНІ ТЕХНОЛОГІЇ У ПРОМИСЛОВОМУ ВИРОБНИЦТВІ

МАТЕРІАЛИ

ХІІІ Всеукраїнської
науково-технічної конференції
(м. Суми, 21–24 квітня 2026 р.)

Суми
Сумський державний університет
2026

УДК 001.891(063)

Г96

Редакційна колегія:

канд. техн. наук, професор О. Г. Гусак;

д-р техн. наук, професор І. В. Павленко.

Члени редакційної колегії:

д-р техн. наук, проф. Л. Д. Пляцук; д-р техн. наук, проф.

М. І. Сотник; канд. техн. наук, проф. А. В. Загорулько; д-р техн.

наук, проф. Р. О. Острога; канд. техн. наук, доц. С. М. Ванеєв;

д-р техн. наук, доц. В. М. Бага; канд. техн. наук,

доц. А. І. Дегула; канд. техн. наук, доц. А. В. Євтухов;

канд. хім. наук, доц. Л. М. Пономарьова; д-р техн. наук,

проф. О. О. Ляпощенко; д-р техн. наук, проф. О. П. Гапонова;

д-р техн. наук, проф. Залогова В. О.; д-р техн. наук,

проф. В. О. Іванов; д-р техн. наук, проф. В. І. Склабінський.

Технічний секретар: аспірант М. В. Муштай.

Сучасні технології у промисловому виробництві : матеріали XIII Всеукраїнської науково-технічної конференції (м. Суми, 21–24 квітня 2026 р.) / редкол.: О. Г. Гусак, І. В. Павленко. – Суми : Сумський державний університет, 2026. – 258 с.

УДК 001.891(063)

До матеріалів конференції включено тези доповідей, що містять результати наукових досліджень представників закладів вищої освіти України. Видання буде корисним для науковців, викладачів, аспірантів, студентів, а також інженерів машинобудівної галузі.

© Сумський державний університет, 2026

Секції конференції:

1. Технології машинобудування.
2. Технологія конструкційних матеріалів і матеріалознавство.
3. Динаміка і міцність, комп'ютерна механіка.
4. Гідравлічні машини і гідропневмоагрегати.
5. Прикладна гідоаеромеханіка.
6. Енергетичне машинобудування.
7. Технічна теплофізика.
8. Хімічні технології та інженерія.
9. Хімічні науки.
10. Екологія і охорона навколишнього середовища.

Конференція присвячена 100-річчю від дня народження Заслуженого діяча науки і техніки України, професора Володимира Альбіновича Марцинковського



(25.11.1926 – 29.06.2019)

Адреса Сумського державного університету:
вул. Харківська, 116, м. Суми, 40007, Україна.

Телефон для довідок: +38 (0542) 33-10-24 – деканат факультету технічних систем та енергоефективних технологій Сумського державного університету.

ЗМІСТ

Життєвий шлях і наукова спадщина Володимира Марцинковського	15
СЕКЦІЯ «ТЕХНОЛОГІЇ МАШИНОБУДУВАННЯ»	19
<i>Медведев Б. В., Довгополов А. Ю.</i> Металево-композиційні укриття для захисту цивільного населення від наслідків ракетних ударів	20
<i>Klymenko Y., Pukhalska H.</i> Technology for manufacturing steering propeller blades from polymer composite materials	21
<i>Zherdiev O., Pukhalska H.</i> Application of CAD/CAM systems in the production of aviation parts	23
<i>Швец Р. С., Дегтярьов І. М.</i> Розроблення методики виготовлення верстатних пристроїв зі штифтовими конічними з'єднаннями	25
<i>Плис В. С., Дегтярьов І. М.</i> Планування експерименту з обробки каналів апарату спрямовувального у верстатному пристрої з розтискною цангою	26
<i>Юсупов Д. А., Бережний Д. І., Євтухов А. В.</i> Порівняльний аналіз статичних та динамічних характеристик, а також матеріалоемності уніфікованих та оптимізованих конструкцій опорного елемента верстатного пристрою типу «плита»	28
<i>Метенко О. М., Євтухов А. В.</i> Імітаційна модель-тренажер роликowego конвеєра	29
<i>Романіка К. Р., Євтухов А. В.</i> 3D-сканування поворотного кулака з використанням сканера Peel 3	30
<i>Кулешов М. М., Євтухов А. В.</i> Імітаційна модель-тренажер робототехнічного комплексу для дорнування отворів	32
<i>Ситнев А. С., Євтухов А. В.</i> Дослідження скінченно-елементної моделі системи «верстатний пристрій-заготовка» методом статичного аналізу	33
<i>Погрібний С. Р., Євтухов А. В.</i> Дослідження скінченно-елементної моделі системи «верстатний пристрій-заготовка»	35
<i>Клімов М. А., Євтухов А. В.</i> Імітаційна модель-тренажер стенда для дослідження статичного балансування системи «шліфувальний круг-оправка»	37
<i>Прохоренко С., Прохоренко М. В., Панчишин І. І., Демидов І. В.</i> Концепція локалізованої системи термодинамічної стабілізації помешкань для адаптивного керування мікрокліматом	38

<i>Черкас А. І., Прохоренко С.</i> Методологічні засади побудови доступної біометричної системи для дистанційного моніторингу реабілітації	39
<i>Шокун Б. О., Швець С. В.</i> Проектування заготовок для глибокого витягування	40
<i>Зельман Б. М., Подоба А. М., Бурдяк М. Р.</i> Аналіз способів охолодження дереворізальних інструментів	42
<i>Mazhuha M., Proskurnia S.</i> Increasing the strength of thin-walled components made from powder steels using chemical-thermal treatment	43
СЕКЦІЯ «ТЕХНОЛОГІЯ КОНСТРУКЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ І МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО»	44
<i>Руденко М. О., Дегула А. І.</i> Перспективи застосування захисних покриттів	45
<i>Поляков С. С., Дегула А. І.</i> Порівняльний аналіз програмного забезпечення для моделювання технологічного процесу лиття	47
<i>Поліновський В. В.</i> Мікроструктурна оптимізація матеріалів енергонакопичення	49
<i>Чорний А. В.</i> Матеріалізація квантових механізмів у твердотільних середовищах	50
<i>Фесенко Т. М.</i> Структурна стабілізація твердотільних квантових систем	51
<i>Живило Є. О.</i> Синтез твердотільних квантових накопичувальних структур	52
<i>Кучма Ю. В.</i> Контрольована кристалізація функціональних квантових матеріалів	53
<i>Калашнікова Ю. В.</i> Формування наногетероструктур для енергонакопичення	54
<i>Магалецька В. В.</i> Інженерія енергетичних станів у твердому тілі	55
<i>Гахов Н. А., Дегула А. І.</i> Підвищення надійності прес-форми для лиття під тиском (інжекційного формування)	56
<i>Пахненко Д. В., Говорун Т. П.</i> Вплив технологічних умов отримання на структуру та властивості покриттів на основі ZrN	58
<i>Ворона А. С., Щербак В. П., Говорун Т. П.</i> Дослідження пошкоджуваності поверхні кочення залізничних коліс	60

<i>Середа Б. Р., Звоник Д. М., Говорун Т. П.</i> Зміцнення клапанних пластин поршневих компресорів методом низькотемпературної нітроцементації	61
<i>Білоус О. А., Говорун Т. П., Кульбачний В. М., Дудка О. М.</i> Моделювання процесів масопереносу та дифузії вуглецю у процесі цементації металевих виробів	63
<i>Маренок С. М.</i> Нові модифіковані ґрунтовочні покриття вуглецевими нанотрубками	64
<i>Кузнєцов В. А., Мішук К. М.</i> Технологія виготовлення будівельних матеріалів на основі промислових відходів (на прикладі геополімербетону)	66
<i>Сазонов О. В., Дощечкіна І. В.</i> Успішний досвід модифікування поверхні методом епіламування	68
<i>Кречковська Г. В.</i> Структурні особливості руйнування азотованого штока регулюючого клапана парової турбіни	70
<i>Галушак А. В., Свірська Л. М., Кречковська С. Р., Шабатура Д.-Г. В.</i> Аналіз структурної неоднорідності та її вплив на властивості спіненого полівінілхлориду	71
<i>Коломієць В. М., Кانیвець В. М., Кононенко І. М., Кравченко С. М.</i> Практичне застосування методу кварцового мікрозважування	72
<i>Середа Б. Р., Говорун Т. П.</i> Технологія виготовлення та термічна обробка коромисла газрозподільного механізму двигунів внутрішнього згоряння	74
<i>Гапонова О. П., Лапоног Г. П., Перекупко Б. А.</i> Модифікація поверхні різального інструменту методом електроіскрового легування	75
<i>Гапонова О. П., Смоленко С. В., Чижов В. В.</i> Зміцнення інструменту методом електроіскрового легування	76
<i>Піменов М. О., Харченко Н. А., Лоскутова Т. В., Дацюк О. Е.</i> Алюмосиліціювання нікелю: структура та властивості дифузійних покриттів	77
<i>Рубін Е. Ю.</i> Технологічне конструювання квантово-активних шарів	79

СЕКЦІЯ «ДИНАМІКА І МІЦНІСТЬ, КОМП'ЮТЕРНА МЕХАНІКА»	80
<i>Жигилій Д. О., Радченко Д. Я.</i> Аналіз розшарування вуглепластикового корпусу FPV-дрона під дією вібрації	81
<i>Жигилій Д. О., Великодний Р. А.</i> Дослідження втрати стійкості легких сталевих тонкостінних елементів конструкцій з гострими концентраторами напружень	82
<i>Ванжула А. Ю., Загорулько А. В.</i> Числовий аналіз динамічних характеристик врівноважуючого пристрою відцентрового насоса	83
<i>Роцупкін О. В., Павленко І. В.</i> Цифровий двійник ротора Джефкота з поперечною тріщиною	84
<i>Росляков М. Ю.</i> Аналіз канавкових шпаринних ущільнень в турбомашинах	86
<i>Позовний О. О., Єршов Б. В.</i> Моделювання та аналіз статичних і динамічних характеристик ущільнень із плаваючими кільцями	87
<i>Позовний О. О., Ступаченко Є. В.</i> Забезпечення надійності турбонасосних агрегатів через аналіз динамічної поведінки їх роторів	88
<i>Кувшинов А. О.</i> Комп'ютерне моделювання напружено-деформованого стану елементів машин	89
<i>Капанайко В. С., Павленко І. В.</i> Використання явища флатера для вимірювання швидкості потоку	91
<i>Титаренко І. В.</i> Інтеграція 3D-сканування та комп'ютерної механіки у цифрове збереження архітектурного середовища	92
<i>Мироненко М. І., Ковалевський С. О.</i> Попіксельна семантична сегментація цифрового зображення природньої заповідної зони	94
<i>Титаренко А. В.</i> Формування національно свідомого інженера в умовах трансформаційного розвитку України: інженерно-педагогічний підхід	96
<i>Павленко І. В.</i> Криза гносеології у контексті розвитку систем штучного інтелекту	98
СЕКЦІЯ «ГІДРАВЛІЧНІ МАШИНИ І ГІДРОПНЕВМОАГРЕГАТИ»	100
<i>Панченко В. О., Петренко С. С., Ігнатенко С. О.</i> Підвищення ефективності вільновихрового насоса	101
<i>Панченко В. О., Лисенко Д. Р., Ядаменко А. О.</i> Відцентровий насос з мехатронним пристроєм автоматичного регулювання подачі	102

<i>Зеленський П. І., Колісніченко Е. В., Обравіт С. Ю.</i> Проблеми перекачування газорідних сумішей відцентровими насосами	104
<i>Bondarenko O. O.</i> Enhancing cantilever pump performance through increased rotational frequency	105
<i>Ратушний О. В., Хованський С. О., Ляпоценко О. О., Острога Р. О., Сімейко К. В., Сотник М. І., Рибальченко В. М., Маренок В. М.</i> Обґрунтування вибору методу й апаратного оформлення першого контуру охолодження малого модульного реактора	107
<i>Муштай М. В., Кондусь В. Ю., Куліков О. А., Андрусак В. О., Твердохлеб А. С.</i> Сучасні конструктивні рішення та напрями вдосконалення вільновихрових насосів (за результатами патентного огляду)	108
<i>Твердохлеб А. С., Кондусь В. Ю., Куліков О. А., Андрусак В. О., Муштай М. В.</i> Аналіз сучасного стану досліджень та шляхи підвищення енергоефективності вільновихрових насосів	110
<i>Глянко В. С.</i> Енергетична ефективність та надійність відцентрового насоса при зміні частоти обертання ротора	111
<i>Титаренко Е. С., Кулініч С. П.</i> Методи регулювання аксіально-поршневих насосів у режимі сталої потужності	112
<i>Коробова С. А., Голенко С. О., Хованський С. О., Гречка І. П.</i> Моделювання динамічних процесів у електрогідравлічних насосних системах з урахуванням впливу сил тертя	114
СЕКЦІЯ «ПРИКЛАДНА ГІДРОАЕРОМЕХАНІКА»	116
<i>Луговий О. Л., Гусак О. Г.</i> Модель втрат у комбінованому відводі з боковою камерою	117
<i>Антоненко С. С., Коваленко В. М.</i> Методика аналізу застосування когенераційної станції в систему централізованого тепло- та електропостачання	120
<i>Антоненко С. С., Оніпа В. О.</i> Рекомендації щодо уточнення методики обрахунку обсягів теплоспоживання абонентами системи централізованого тепlopостачання	121
<i>Грабовой О., Сотник М. І.</i> Теплові втрати у тепломережах та алгоритм їх автоматизованого визначення	122
<i>Гудименко С., Сотник М. І.</i> Пропозиції до методики визначення «базових» показників теплових втрат у тепломережах	123

<i>Ратушний О. В., Вареник М. О.</i> Підходи до опису гідродинамічних процесів у прикільцевій області відцентрових контрроторних машин	124
<i>Ратушний О. В., Рибальченко В. М., Бондаренко Д. С.</i> Гармонізація нормативної бази України з міжнародними та європейськими стандартами для впровадження малих модульних реакторів (ММР) у контексті євроінтеграції та післявоєнного відновлення енергетики	126
<i>Сапожніков С. В., Грабовой О. В.</i> Порівняння інформаційних систем енергетичного менеджменту	128
<i>Сапожніков С. В., Григоренко Є. А.</i> Автоматизовані інформаційні системи в енергетичному менеджменті	129
<i>Пушкар В. Ю., Хованський С. О.</i> Аналіз ефективності сонячних колекторів у системах теплопостачання	130
<i>Осіпов Д. В., Хованський С. О.</i> Шляхи підвищення енергоефективності промислового підприємства харчової галузі	133
СЕКЦІЯ «ЕНЕРГЕТИЧНЕ МАШИНОБУДУВАННЯ»	135
<i>Ванєєв С. М., Іванов Г. О., Медведєв Р. О.</i> Турбогенератор на базі вихрової турбіни для комунальних підприємств	136
<i>Ванєєв С. М., Бага Т. С., Мелейчук О. С., Мірошниченко О. І., Ольховик М.-Л. І.</i> Особливості конструкції та використання струминно-реактивних розширювальних машин	137
<i>Сітало В. С., Ванєєв С. М., Карцев О. С.</i> Дослідження впливу площі робочого каналу на характеристики вихрового компресора	139
<i>Ванєєв С. М., Ніколаєнко Д. Р., Галелюк А. З.</i> Дослідження можливостей використання турбогенераторів на основі вихрових розширювальних машин для газорозподільних станцій у рамках «водневої енергетики»	141
<i>Ванєєв С. М., Дмитрієв В. О., Медведєв Р. О., Карцев О. С.</i> Енергозберігаючі турбогенераторні агрегати на базі струминно-реактивних турбін	143
<i>Мелейчук О. С., Ванєєв С. М.</i> Підвищення ефективності енергозберігаючих турбогенераторних агрегатів на базі струминно-реактивних турбін	144
<i>Кіхтенко П. О., Бага Т. С.</i> Види турбінного обладнання та його роль у енергозбереженні	146
<i>Кіхтенко П. О., Бага Т. С.</i> Актуальність енергозбереження: використання вторинних енергоресурсів і турбінного обладнання	148

<i>Маценко М. О., Бага Т. С.</i> Актуальність використання теплообмінних апаратів у промисловості	149
<i>Щербак Д. В., Бага В. М., Бага Т. С.</i> Використання піскоструминного обладнання у промисловості	150
<i>Бага В. М., Чернетський В. Ю., Дяченко С. С.</i> Дослідження робочих характеристик сопла Вентурі	152
СЕКЦІЯ «ТЕХНІЧНА ТЕПЛОФІЗИКА»	153
<i>Лабаш О. С., Баран В. В., Мелейчук С. С.</i> Оптимізація режиму роботи бівалентних теплових насосів для системи опалення в залежності від внутрішніх та зовнішніх температурних факторів	154
<i>Карцов А. С., Назаренко М. В., Мерзляков Ю. С.</i> Мінімізація ексергетичних втрат у транскритичних CO ₂ -системах шляхом модифікації проточної частини струминних ежекторів	155
<i>Чех О. Ю., Мерзляков Ю. С., Арсеньєв В. М.</i> Науково-практичні засади дослідження фізичних процесів у рідинно-парових струминних апаратах	157
<i>Шарапов С. О., Вербицький А. Р., Євтушенко С. О.</i> Експериментальний стенд для дослідження теплоелектрогенеруючого агрегату на базі рідинно-парового струминного апарату	159
<i>Шарапов С. О., Вербицький А. Р., Ткаченко Б. О.</i> Когенераційні установки на базі двофазних струминних апаратів для систем розподіленої генерації	160
<i>Шарапов С. О., Вербицький А. Р., Арсеньєв В. М.</i> Порівняльний аналіз теплоелектрогенеруючих агрегатів на базі рідинно-парових струминних апаратів	161
<i>Шарапов С. О., Ковнір С. В., Щербак Я. В.</i> Тепловий пункт для системи індивідуального опалення на базі водоструминного ежектора	162
<i>Бага В. М., Садовський І. Д.</i> Розрахунок та проектування газодинамічної муфти відцентрового компресора	163
СЕКЦІЯ «ХІМІЧНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ІНЖЕНЕРІЯ»	165
<i>Єсипчук С. С., Скиданенко М. С., Ляпощенко О. О.</i> Моделювання гідродинаміки двофазних потоків у вихровій камері та обґрунтування багатозонної конструкції сепаратора	166

<i>Анацький М. С., Харитонов Р. С., Светіков О. О., Кравченко О. В.</i> Випробування магній гідроксиду/оксиду, отриманого переробкою бішофіту	167
<i>Кірний В. Л., Юхименко М. П.</i> Моделювання та оптимізація процесу дегідратації термолабільних кристалогідратів у секціонованому апараті киплячого шару (на прикладі сульфату заліза)	169
<i>Нічволодін К. В.</i> Вплив температури на в'язкість та поширення вібрацій у розплаві карбаміду в корзині обертового вібраційного гранулятора	170
<i>Корнієнко І. М., Галун А. А., Юхименко М. П.</i> Інтенсифікація процесу сушіння сипких матеріалів у пневматичних сушарках	172
<i>Середа Б. О., Юхименко М. П.</i> Особливості процесу сушіння сипких матеріалів у барабанних сушарках	173
<i>Буділовський О. В.</i> Технологічні аспекти отримання органо- мінеральних добрив на основі дигестату біогазових установок	174
<i>Забіцький Д. В.</i> Теоретичний аналіз розпаду струменя розплаву в обертових системах гранулювання	175
<i>Мищенко Д. І., Пирогов І. С.</i> Стабілізація структури гранул складнозмішаних добрив у процесі конвективного охолодження	176
<i>Острога Д. В., Чміленко Б. С.</i> Сепараційні процеси у формуванні вузкодисперсного гранулометричного складу складнозмішаних добрив	177
<i>Острога Р. О.</i> Розроблення детоксикаційних добрив для відновлення деградованих ґрунтів	178
<i>Яковенко Д. В.</i> Двокаскадна холодильна система у вигляді модернізованого апарату повітряного охолодження для конденсації парів аміаку	179
<i>Котов Ю. В.</i> Шляхи модернізації абсорбера для вилучення дихлоретану із відхідних газів виробництва вінілхлориду	180
<i>Гаджієв М.</i> Модернізації випарного апарату виробництва двоокису титану	181
<i>Каруцький А. Ю.</i> Особливості гідродинаміки розплаву мінеральних добрив у проточній частині високопродуктивних вібраційних грануляторів	182
<i>Карпенко А. С.</i> Гравітаційна пневмокласифікація сипучих матеріалів з урахуванням гідродинаміки двофазного потоку	184

<i>Гнатко І. В.</i> Квантово-хімічний скринінг гідрофобних низькотемпературних евтектичних розчинників на основі монотерпеноїдів	185
<i>Маринченко Д. Д., Книш І. С., Котенко М. Р., Скиданенко М. С.</i> Вплив мінеральних добавок на ерозійний знос елементів грануляційного обладнання у виробництві аміачної селітри	187
<i>Табачун М. О., Анісковець М. М., Піддубний В. Є., Скиданенко М. С.</i> Модифікування гранул карбаміду мінеральними добавками з метою підвищення їх механічної міцності	189
<i>Малишок К. О., Павленко О. В.; Острога Р. О.</i> Морська біомаса <i>Zostera marina</i> як перспективне джерело целюлози для синтезу її нітратів та розвитку технологій у сфері зеленої хімії	191
<i>Криводуб Д. Г., Михайловський Я. Е.</i> Гідродинаміка псевдозрідженого шару: чисельні методи, проблеми та напрями вдосконалення	193
СЕКЦІЯ «ХІМІЧНІ НАУКИ»	194
<i>Shovkun M., Dychenko T.</i> Quantitative determination of methanol in tyrolean fine spirits	195
<i>Чудеса К. В., Пшеничний Р. М.</i> Вплив легування на електрофізичні властивості оксиду цинку	196
<i>Мироненко Д. В., Пшеничний Р. М.</i> Визначення етанолу в аптечних настоянках рефрактометричним та ареометричним методами	198
<i>Шокаленко О. В., Большаніна С. Б.</i> Вплив напруги на перебіг процесу мембранного електролізу іонів кадмію	200
<i>Пятишкіна П. Д., Большаніна С. Б.</i> Біокомпозити для видалення фосфору з водних систем	202
<i>Бульченко Р. М., Пшеничний Р. М.</i> Визначення фосфатів у ґрунтах фотометричним методом	204
<i>Ольховик А. В., Пономарьова Л. М.</i> Якість сирів як показник харчової цінності та безпечності молочних продуктів	206
<i>Чудеса К. В., Пономарьова Л. М.</i> «Зелені» поверхнево-активні речовини	208
<i>Крупська А. М., Большаніна С. Б.</i> Оцінка техногенного забруднення ґрунтів важкими металами внаслідок військових вибухів	210
<i>Запорожець Р. О., Пшеничний Р. М.</i> Визначення нітратів в овочах потенціометричним методом	212

<i>Гончаренко Л. І., Диченко Т. В.</i> Вплив рослинного опаду на склад та властивості ґрунтів паркових зон міста Суми	213
<i>Кочура Є. К., Пономарьова Л. М.</i> Хімічні методи переробки харчових відходів	215
СЕКЦІЯ «ЕКОЛОГІЯ І ОХОРОНА НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА»	217
<i>Твердохлебова Н. Є.</i> Роль цифрових технологій у виявленні екологічних загроз	218
<i>Кузьоменська К.-В. М., Аблєєва І. Ю., Батальцев Є. В.</i> Особливості впливу військових дій на довкілля	220
<i>Красногорський Б. О., Трус І. М., Воробйова В. І., Бондарєва А. І.</i> Застосування низькотемпературних евтектичних розчинників для модифікації адсорбентів	221
<i>Бойко О. С., Пляцук Л. Д., Васькін Р. А.</i> Моніторинг газотранспортної системи міста	223
<i>Вакал В. С.</i> Системний підхід до технології відновлення ґрунтів, порушених внаслідок військових дій	224
<i>Гончаренко Л. І., Пономарьова Л. М.</i> Біополімери як альтернатива нафтохімічним пластикам	225
<i>Гопкало Д. В., Васькін Р. А., Пляцук Л. Д.</i> Оптимізація гідродинамічних умов роботи ферментатора	227
<i>Демченко Є. Р., Баранов В. М., Гурець Л. Л.</i> Ефективне очищення газопилових вибросів від дрібнодисперсного пилу	228
<i>Нейман В. І., Фалько В. В.</i> Технологія поводження з відходами руйнації	230
<i>Парамонов А. В., Аблєєва І. Ю.</i> Вплив добавок електропровідних матеріалів на інтенсифікацію видалення антибіотиків із дигестату	232
<i>Сінко І. О., Аблєєва І. Ю.</i> Гранульований дигестат у технології очищення ґрунтів, забруднених важкими металами	233
<i>Настасенко М. Т., Лазненко Д. О.</i> Створення пунктів роздільного збирання побутових відходів, як складова розвитку системи управління відходами у Сумській області	235
<i>Волювач О. В., Стрельцова О. О.</i> Вилучення технічних катіонних поверхнево-активних речовин із води за присутності екобезпечного адсорбенту (флотажного носія)	236

<i>Ізмоденова Т. І., Гурець Л. Л.</i> Утилізація рослинної золи шляхом виробництва складних органо-мінеральних добрив	238
<i>Попович С. Л., Трус І. М.</i> Застосування низькотемпературних евтектичних розчинників в технологіях очищення води	240
<i>Пляцук Є. Д., Яхненко О. М.</i> Природоорієнтовані рішення в урбаністиці: аналіз потенціалу зелених дахів	242
<i>Прихожай М. Д., Яхненко О. М.</i> Використання біочару для ремедіації ґрунтів та очищення від важких металів	244
<i>Чухіль Є. Р., Яхненко О. М.</i> Проблема забруднення стічних вод мікропластиком і способи мінімізації екологічного ризику	246
<i>Чуряк А. М., Пляцук Л. Д., Козій І. С.</i> Непараметричний алгоритм визначення зон граду	248
<i>Пірімов Р. В., Аблєєва І. Ю.</i> Технологічні підходи до очищення ґрунтів від PFAS	250
<i>Іваненко К. М.</i> Управління відходами та їх вплив на ландшафти Чернігівщини	252
<i>Кривець А. А., Аблєєва І. Ю.</i> Цінність ландшафтного різноманіття і пріоритети щодо його збереження у заповіднику «Михайлівська цілина»	253
<i>Качаловський А. С., Ступаков В. С., Вакал В. С.</i> Визначення рівня воєнно-техногенного забруднення родючого шару ґрунту	254
<i>Карташева Д. М., Аблєєва І. Ю.</i> Екологічні ризики міграції PFAS із ґрунтів у рослинні організми	255
<i>Гуденець В. М., Пляцук Л. Д.</i> Застосування аерації ультратонкими бульбашками для інтенсифікації процесу біологічного очищення стічних вод	257

ЖИТТЄВИЙ ШЛЯХ І НАУКОВА СПАДЩИНА ВОЛОДИМИРА МАРЦИНКОВСЬКОГО

25 листопада 2026 року виповнюється 100 років від дня народження видатного українського вченого у галузі механіки та гідравлічних машин – Володимира Альбіновича Марцинковського. Його ім'я нерозривно пов'язане з розвитком вітчизняної науки у сфері машинобудування, формуванням нових наукових напрямів та становленням наукової школи, що здобула міжнародне визнання. Своєю працею він зробив вагомий внесок у розвиток технічної науки другої половини ХХ ст. – початку ХХІ ст. Його наукові ідеї і досі залишаються актуальними, а учні продовжують розвивати закладені ним напрями досліджень у провідних наукових центрах України та світу.

Зі спогадів про своє дитинство: «Я не був зразковим учнем у початкових класах. Вранці складав шкільне приладдя до торби, потім на шляху до школи закидав її у бур'яни, а цей час проводив на свій розсуд. Так продовжувалось до тих пір поки не дізналася про мій вчинок мама. Після розмови з нею мені сподобалось вчитися». Ця коротка історія яскраво характеризує вплив матері на формування особистості майбутнього вченого. Саме вона прищепила синові розуміння цінності знань, яке він проніс через усе життя і передав сотням своїх студентів та аспірантів.

У червні 1941 року майбутній вчений закінчив 7 класів Шепетівської школи (Хмельницька область), а з поширенням Другої світової війни на територію України закінчилось дитинство. Рано пізнав важку фізичну працю – працював на кузні молотобійцем, у лісництві лісорубом. Ці роки загартували його характер, сформували ту неймовірну витривалість і наполегливість, що стали визначальними рисами його особистості.

У січні 1944 року був відправлений до Німеччини на примусові роботи у табір для оstarбайтерів. У німецькому місті Хемніц розвантажував вагони з вугіллям у депо, кочегарив на паровозі [1]. Потім – чотири місяці ув'язнення в одиночній камері у тюрмі у м. Цвіккау. Американські війська звільнили його: «Я виповз із камери – бо йти вже не міг», – згадував Володимир Альбінович.

Після визволення розпочалася служба в армії водієм. Її проходив у Німеччині, Угорщині, Болгарії, Чехословаччині та ін. За відмінну дисципліну та сумлінне ставлення до обов'язків Володимир Марцинковський отримав можливість відвідувати заняття у вечірній школі, і вже після демобілізації закінчив вечірню школу із золотою медаллю. Далі влаштувався працювати кочегаром у будинок дитини, де кожную вільну хвилину присвячував поглибленню своїх знань [1].

Володимир Марцинковський із юного віку відрізнявся своєю допитливістю, жагою до знань; для нього було дуже важливо щодня дізнаватись щось нове. Він отримував завжди лише найвищі бали, але головними для нього були знання, а не оцінки. Будучи напрочуд освіченою

людиною, В. Марцинковський завжди поведився стримано, ніколи активно не виявляв своїх емоцій [2]. Йому дуже хотілося вступити на механіко-математичний факультет Київського університету. Але мрії не судилося здійснитися. Найімовірніше, причиною стало його перебування на окупованій території [2], а також арешт і розстріл батька, Альбіна Мар'яновича Марцинковського у 1938 році в часи великого терору (реабілітували 13 серпня 1957 р. [3]). Зрештою у 1951 році Харківський політехнічний університет зарахував наполегливого вступника до лав студентів на інженерно-технічний факультет за спеціальністю «Динаміка та міцність машин». Це був один із найскладніших, проте найпрестижніших напрямів підготовки, що вимагав глибоких знань з математики, фізики та теоретичної механіки.

Під час навчання Володимир Альбінович працював учителем фізики у Школі робітничої молоді у Харкові. Заробітна плата і підвищена стипендія за відмінне навчання давали змогу допомагати мамі, яка жила в Шепетівці. Незважаючи на подвійне навантаження – роботу та навчання – він жодного разу не отримав оцінки нижче за «відмінно». Саме у Харківському політехнічному інституті відбулося його формування як вченого – інтерес до вібрацій, динаміки, гідромеханіки – все те, що згодом стало справою життя.

У березні 1957 року Володимир Альбінович закінчив навчання і отримав диплом з відзнакою. За направленням працював молодшим науковим співробітником лабораторії гідромашин Академії наук УРСР, де займався експериментальними і теоретичними дослідженнями вібрацій високонапірних живильних насосів [1]. Ця тематика була надзвичайно актуальною для енергетики України, оскільки проблема забезпечення вібраційної надійності живильних насосів поставала дуже гостро.

За три роки був переведений у Спеціальне конструкторське бюро живильних насосів у місті Суми (нині АТ «Науково-дослідний і проектно-конструкторський інститут атомного та енергетичного насособудування»). Це переведення визначило не лише подальшу долю вченого, а й долю міста як одного з провідних центрів насособудування. Обіймав посади начальника розрахунково-експериментального відділу, заступника головного інженера з наукової роботи. У грудні 1964 року на цьому ж підприємстві без відриву від виробництва захистив кандидатську дисертацію і став першим кандидатом технічних наук у м. Суми [1].

З 11 листопада 1966 року доцент Марцинковський очолює кафедру загальнонаукових дисциплін Сумської філії Харківського політехнічного інституту. Його прихід до вищої школи розпочав нову еру технічної освіти міста Суми. Студентами Володимира Альбіновича були майбутній ректор Сумського державного університету Анатолій Васильєв, декан факультету технічних систем та енергоефективних технологій Олександр Гусак, проректор з науково-педагогічної роботи Володимир Любчак, голова профспілкової організації Валентина Боровик та багато інших. Директор ТОВ «КБ «УКРСПЕЦМАШ» Олександр Чернов, директор ТОВ «НТК «Дайнемікс»

Олександр Гулий, директор ТОВ «ТPIЗ Ltd.» Василь Марцинковський – теж серед числа його випускників, які стали успішними підприємцями та створили свої машинобудівні підприємства, пов'язані з насособудуванням, на яких і тепер працюють випускники кафедри.

З 8 вересня 1972 року на новоствореній кафедрі теоретичної механіки разом зі співробітниками займався науковими дослідженнями у галузі вібраційної надійності та герметичності роторних машин [4].

Вдячні учні та колеги вирішили увіковічити пам'ять свого вчителя, і наставника та відповідно до рішення вченої ради СумДУ від 12.11.2020 року та на підставі наказу № 0947-І від 26.11.2020 року кафедра дістала назву комп'ютерної механіки імені Володимира Марцинковського [4]. На теперішній час на кафедрі продовжують його справу завідувач кафедри, професор Андрій Загорюлько, доктор наук, професор Іван Павленко, доценти Євген Савченко, Сергій Гудков та Дмитро Жигилій, доктор філософії Олександр Позовний та ін.

28 червня 1974 року захистив докторську дисертацію за спеціальністю «Гідравлічні машини та гідропнеumoагрегати». У квітні 1978 року Вища атестаційна комісія присвоїла йому вчене звання професора.

Довгий час Володимир Марцинковський очолював спеціалізовану вчену раду СумДУ із захисту кандидатських дисертацій, був головним редактором наукового фахового видання України «Вісник Сумського держуніверситету: Серія «Технічні науки».

Професор В. Марцинковський є засновником нової дисципліни «Гермомеханіка», підґрунтям якої є теоретичні та практичні напрацювання самого вченого. Також професор В. Марцинковський сформував наукову школу, досягненням якої стало відкриття у 1981 році Галузевої науково-дослідної лабораторії вібраційної надійності та герметичності відцентрових машин, керівником якої став Іван Бережний [5].

У роки незалежності України Володимир Марцинковському було присвоєно почесне звання «Заслужений діяч науки і техніки України», звання доктора «Honoris Causa» Технологічного університету м. Кельце (Польща). Володимир Альбінович був нагороджений почесним знаком Міністерства освіти і науки України «За наукові досягнення» і отримав державну нагороду Республіки Польща – Орден «За заслуги перед Польщею» від Президента Анджея Дуди. Цей орден є найвищою відзнакою, який вручається за значний внесок у зміцнення міжнародного співробітництва [1].

Під керівництвом проф. В. Марцинковського було захищено 5 докторських дисертацій, 2 з яких виконали іноземні дослідники, понад 30 кандидатських дисертацій. Наукова спадщина Володимира Альбіновича вражає своїм обсягом і глибиною: він є автором понад 300 наукових праць, включно з 50 патентами – їх часто використовують як навчальні матеріали [1]. Його монографії стали настільними книгами для інженерів і дослідників у сфері насособудування та ущільнювальної техніки. Серед найважливіших напрямів

його досліджень: динаміка роторів відцентрових машин (розроблення математичних моделей коливань роторів з урахуванням впливу рідинного середовища в ущільненнях і підшипниках); гермомеханіка (створення теорії безконтактних ущільнень, дослідження гідродинамічних і гідростатичних ефектів у щілинних каналах); вібраційна надійність насосного обладнання (розроблення методів діагностування, прогнозування та зниження вібрацій); імпульсні ущільнення (новий тип торцевих ущільнень).

Володимир Альбінович вдало поєднував наукову діяльність із активним способом життя, захоплюючись туризмом і альпінізмом – підкорив не одну гірську вершину, не один перевал. Життєвий шлях Володимира Марцинковського є прикладом виняткової наполегливості, сили духу та відданості науці. Йому довелося пройти через складні історичні випробування – Другу світову війну, примусові роботи, післявоєнний час. Проте ці обставини не зламали його духу і прагнення до знань та науки.

Внесок Володимира Альбіновича Марцинковського у розвиток науки та освіти в Україні та за її межами складно переоцінити. Його наукові досягнення, новаторські ідеї та відданість справі всього життя мали значний вплив на розвиток української та світової науки. Створена ним наукова школа «Вібронадійність і герметичність роторних машин» стала основою для багатьох нових досліджень, а його учні та послідовники продовжують примножувати спадщину, залишену видатним вченим.

До 100-річчя від дня народження В. Марцинковського важливо згадати його постать і оцінити її значення для розвитку науки, освіти та інженерної справи. Від кузні молотобійця до професорської кафедри – цей шлях пройшла людина, яка довела, що справжній талант і наполегливість здатні подолати будь-які перешкоди. Його наукова школа, праці та ідеї і сьогодні продовжують впливати на розвиток сучасного машинобудування. Тому гермомеханіка – це не просто наука. Це справа життя Володимира Марцинковського.

Список літератури

1. Заслужений професор Сумського державного університету Володимир Альбінович Марцинковський: до 85-річчя від дня народження: біобібліографічний покажчик. Суми. 2011. 119 с.
2. Інтерв'ю із Сергієм Марцинковським, проведене В. В. Кулибчук 24 серпня 2024. Місце зберігання: особистий архів.
3. Реабілітовані історією: У 27 томах. Хмельницька область. Хмельницький, 2025. Кн. 6. 1174 с.
4. Незабутні. Резонанс. Газета Сумського державного університету. 2018. № 7–8. С. 7.
5. Сайт кафедри комп'ютерної механіки ім. В. Марцинковського. URL: <https://zmdm.teset.sumdu.edu.ua/ua/department/history/>.

Автор: проф. Загорулько А. В., завідувач кафедри комп'ютерної механіки імені Володимира Марцинковського Сумського державного університету

**СЕКЦІЯ «ТЕХНОЛОГІЇ
МАШИНОБУДУВАННЯ»**

МЕТАЛЕВО-КОМПОЗИЦІЙНІ УКРИТТЯ ДЛЯ ЗАХИСТУ ЦИВІЛЬНОГО НАСЕЛЕННЯ ВІД НАСЛІДКІВ РАКЕТНИХ УДАРІВ

*Медведев Б. В. аспірант; Довгополов А. Ю., доц. каф. ТМВІ,
Сумський державний університет, м. Суми*

В умовах постійних обстрілів з боку країн-агресорів великої популярності в Ізраїлі набувають портативні металеві укриття, які дозволяють захистити людей від наслідків ракетних ударів. Ці укриття розміщують в багатоповерхових будинках, що дозволяє провести евакуацію мешканців квартир до даного укриття під час загроз ракетних обстрілів. На сьогоднішній день більшість мешканців квартир в Ізраїлі має у своєму розпорядженні дані укриття, що є базовою необхідністю для їхнього безпечного життя.

Постійні повітряні атаки на цивільне населення України з боку російської федерації потребують розроблення подібних засобів захисту українського населення від наслідків атаки ворога. Розробка даного типу укриття дозволить зберегти життя та здоров'я як цивільного населення, так і військових.

Основним недоліком зазначеного вище типу укриття є його велика маса та неможливість швидкого його переміщення до іншої будівлі. Дане укриття є великогабаритним та важким. У більшості випадків його монтаж відбувається у процесі будівництва шляхом монтажу укриття в сталі конструкції будівлі.

Ідея авторів полягає в розробленні конструкції металево-композиційного портативного укриття для кожного окремого мешканця будинку. Його планується виготовити поєднанням оптимальної кількості металевих та композиційних елементів, що дозволить досягти необхідних показників міцності для протидії імпульсним навантаженням, спричиненим руйнуванням будівель. Оскільки в умовах виникнення загроз від високоенергетичних боеприпасів екстенсивне нарощування маси укриття є неефективним методом. Автори пропонують перехід до швидкокомтованих металево-композиційних укриттів із застосуванням топологічної оптимізації їхньої форми.

Пропонується замінити традиційні прямокутні форми укриття, які максимізують коефіцієнт відбиття ударної хвилі (10–14 разів), застосуванням оптимізованої макромоделі «Кокон» (овоїди або ланцюгові арки), що забезпечить ефект швидкого аеродинамічного обтікання. Запропоноване технологічне рішення дозволяє зменшити дію на конструкцію руйнівних згинальних напружень шляхом їх часткової заміни на більш безпечні для руйнування конструкції осьові стискаючі навантаження.

При цьому комплексна просторова оптимізація геометрії та матеріалів укриття дозволить знизити вагу захисної конструкції на 50–70% порівняно з металевими аналогами. У свою чергу використання оптимальної форми та матеріалів дозволить збільшити питоме енергопоглинання конструкцією імпульсних навантажень, що відкриває шлях до масового впровадження ефективних мобільних захисних комплексів для протидії наслідкам ракетних атак на цивільне населення та військових.

TECHNOLOGY FOR MANUFACTURING STEERING PROPELLER BLADES FROM POLYMER COMPOSITE MATERIALS

*Klymenko Y., Ph.D. student of the Department of Mechanical Engineering
Technology; Pukhalska H., Assoc. Prof. of the Department of Machinery
Engineering Technology, National University "Zaporizhzhia Polytechnic",
Zaporizhzhia, Ukraine*

The analysis of technologies showed that the optimal technology for manufacturing a helicopter steering propeller blade from polymer composite materials involves the use of a silicone rubber mandrel instead of an elastic diaphragm (press chamber). The technology for manufacturing a blade tip consists in forming prepreg packages in a press mold, which provides an aerodynamic contour of the blade.

The layers of fiberglass must be pressed against the walls of the mold with a force of 800 kPa. One of the complex processes of blade manufacturing is to create the necessary pressure for pressing the prepreg in the mold. This is due to the geometric shape of the aerodynamic profile of the blade at the junction of the lower and upper contours in the form of surfaces of double curvature of variable radius. The press chamber must withstand the required pressure and temperature of 150⁰C for 4 hours [1, 2]. The temperature is set automatically by a heating element built into the mold, the pressure – by pumping compressed gas (nitrogen). The finished product must be easily removed from the internal cavity of the mold.

For the manufacture of prepreg, fiberglass is used. All work related to the impregnation of fiberglass is carried out in a protected room at an air temperature of 18–25 °C and a relative humidity of not more than 75%. Fiberglass intended for impregnation must be pre-dried in a thermo-cabinet at a temperature of 80 °C for 6 hours. The time between the drying operation and the start of impregnation should not exceed 4 hours. The semi-finished products (prepregs) obtained after impregnation serve as the starting material for further work on creating elements of blade structures. The main requirements at this stage, which determine the quality of the blades being manufactured, are the accuracy of the dosage of components and exposure times of the specified technological mixing modes, compliance with the impregnation parameters (temperature in the drying shaft of the impregnation machine, impregnation speed and degree of impregnation of fiberglass with a binder) [1, 2].

The second stage consists of such operations as cutting prepregs, adhesive films and rubbers on the workpiece and their marking; assembly of packages and workpieces (the shell design consists of five packages); laying out packages on mandrels; vacuuming of packages and their preliminary pressing in an autoclave; storage of prepregs and assembled packages. The third stage is laying the obtained workpieces on technological mandrels for preliminary pressing in layers. The laying is carried out along the axes applied to the mandrel, with control of the direction of the fabric base along the lines of laying the base, without folds and the presence of

corrugations. Preliminary pressing is carried out in an autoclave at a temperature of 60 °C and a vacuum of 0.6–0.8 bar. The prepared packages are placed in a mold on a mandrel-liner made of silicone rubber of the Penta elast-750 brand. This material operates at temperatures from –50 to +220 °C. The final formation of the blade shell occurs with a stepwise increase in temperature at a rate of 1–2 degrees per minute to 65 °C, with a holding time at this temperature of 30 minutes and subsequent exit to the 150 °C mode with a holding time of 4 hours. After cooling the mold to ambient temperature, the part is removed and the deposits are removed from the internal channel of the blade. The finished shell is placed in a special device. The polyurethane foam filler is made by pouring with free foaming using a pouring machine at a temperature of 35–40 °C [1, 2].

At the next stage, the blade shell is sent to the machining section. On a band saw machine, technological allowances are trimmed, from which samples are subsequently made to confirm the chemical and physical properties of the resulting composite according to the requirements of the design documentation. Advantages of a silicone rubber mandrel: the mold design is simplified; Molding waste and loss of expensive materials are significantly reduced.

List of references

1. Habali S. M., Saleh I. A. Local design, testing and manufacturing of small mixed airfoil wind turbine blades of glass fiber reinforced plastics. Part I: Design of the blade and root // *Energy Conversion and Management*. – 1999. – Vol. 41, No. 3. – P. 249–280. – DOI: 10.1016/S0196-8904(99)00103-X.
2. Agarwal B. D., Broutman L. J., Chandrashekhara K. *Analysis and performance of fiber composites*. – New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2006. – Chapter 2. – P. 25–45.

APPLICATION OF CAD/CAM SYSTEMS IN THE PRODUCTION OF AVIATION PARTS

Zherdiev O., Ph.D. student of the Department of Mechanical Engineering Technology; Pukhalska H., Assoc. Prof. of the Department of Machinery Engineering Technology, National University "Zaporizhzhia Polytechnic", Zaporizhzhia, Ukraine

Modern CAD/CAM systems allow software engineers to modify a solid model at their discretion using direct editing methods, offset faces or edges, create fillets, move and copy faces. It is possible to divide a solid face into multiple faces in wireframe or composite views, and also to break a part into multiple segments to apply different toolpath strategies to them, which facilitates the processing of complex parts. Although manufacturers may not use any CAD tools to modify the part itself, they can easily and at minimal cost create tooling for complex projects by designing devices and programming their processing in a single CAD/CAM environment.

Most often, the aerospace industry needs to obtain smooth, precise surfaces, which usually requires some additional operations (polishing) to achieve the desired result. This is especially true when it comes to jet engine or transmission parts, which have very tight tolerances and must fit together perfectly. A smart approach is to create control programs that allow for both roughing, semi-finishing, and finishing without the need to remove the part from the machine. When it comes to turbine components, and especially Bladed Disks, whose blades are integral with the rotor disk, machining must be carried out in full accordance with the documentation. This is not an easy task if the parts are made of heat-resistant superalloys that transfer heat to the cutting tool. Composites are often created by layering different materials, including metals, and exhibit specific properties with respect to mechanical loads, melting, and deformation during high-speed machining, which is also a problem. Selecting the right tool and toolpath combination for each individual cutting operation is paramount to reducing scrap rates and increasing cutter life [1].

Recently, collaboration between CAM system developers and cutting tool suppliers has expanded to include the finishing pass stage, where the capabilities of automated toolpath generation lead to innovative cutting tools and vice versa. One such example is the software support for new segment cutters that are well suited for finishing operations. In many cases, this can significantly reduce the finishing cycle time compared to using more traditional spherical end mills. Where these tools and their corresponding toolpaths can be used, cycle time reductions of 50% to 80% or more have become the norm while maintaining excellent surface quality. For this modern finishing strategy to achieve perfection, the cutter and CAM system functionality must be aligned, especially when machining in five axes simultaneously. Segmented cutters can be used in both 3- and 5-axis finishing paths. When used correctly, segmented tools provide a clean and fast finish comparable to what can be achieved with a much larger ball nose end mill [2].

Experienced multi-axis machining technologists can fine-tune the parameters to make the machining path even more efficient when there are special requirements for surface finish. Segmented cutters are designed so that the small-diameter tool has a large effective cutting radius - many times greater than that allowed for a spherical end mill. This design allows for a reduction in the number of finishing passes and the height of the ridges on the material, which significantly improves surface quality while simultaneously reducing cycle time. These tools can also be used on 3-axis CNC machines, but great care should be taken when defining the tool planes to guarantee high finishing accuracy and correct conditions for the cutter to contact the part. The best machine cycles are obtained when using multi-axis equipment. Modern high-speed CNC racks also provide advantages, which can analyze the control program, looking ahead, and consider future cutting conditions [1, 2].

List of references

1. Вірченко Г. А. Деякі питання комп'ютерного структурно-параметричного конструювання вузлів літака / Г. А. Вірченко // Інформаційні системи, механіка та керування. – Вип. 1. – Київ: НТУУ «КПІ», 2008. – С. 70–76.
2. Ванін В. В. Оптимальне варіантне геометричне моделювання технічних об'єктів / В. В. Ванін, В. Г. Вірченко // Прикладна геометрія та інженерна графіка. – Вип. 89. – Київ : КНУБА, 2012. – С. 22–27.

РОЗРОБЛЕННЯ МЕТОДИКИ ВИГОТОВЛЕННЯ ВЕРСТАТНИХ ПРИБОРІВ ЗІ ШТИФТОВИМИ КОНІЧНИМИ З'ЄДНАННЯМИ

*Швець Р. С., аспірант; Дегтярьов І. М., доц. каф. ТМВІ,
Сумський державний університет, м. Суми*

У сучасному машинобудуванні актуальним є підвищення гнучкості виробництва, що пов'язано зі зростанням номенклатури продукції та зменшенням серійності. У цих умовах особливого значення набувають верстатні пристрої (ВП) зі змінними налагодженнями, які забезпечують швидке переналагодження при збереженні високої точності базування [1, 2].

Одним із перспективних конструктивних рішень є застосування штифтових конічних з'єднань, які забезпечують самоустановлення, високу жорсткість і повторюваність позиціонування елементів. Дослідження показують, що такі з'єднання дозволяють досягти точності повторного встановлення на рівні кількох мікрметрів і підвищити стабільність технологічного процесу.

Метою роботи є розроблення методики виготовлення ВП із використанням штифтових конічних з'єднань. Методика включає: вибір параметрів конусності (у межах 1:10–1:30), обробку базових поверхонь із забезпеченням співвісності, високоточну обробку конічних отворів, виготовлення штифтів із подальшим шліфуванням та контроль параметрів з'єднання. Особлива увага приділяється забезпеченню точності контактних поверхонь, що визначає експлуатаційні характеристики вузла.

Експериментальні дослідження підтверджують, що застосування запропонованої методики забезпечує точність позиціонування на рівні 3-5 мкм, підвищення жорсткості з'єднання до 30% та скорочення часу складання до 40% порівняно з традиційними рішеннями. Це узгоджується з результатами інших досліджень у галузі переналагоджуваних пристроїв [2, 3].

Таким чином, використання штифтових конічних з'єднань у ВП є ефективним засобом підвищення продуктивності та точності обробки в умовах гнучкого виробництва. Розроблена методика може бути рекомендована для впровадження на машинобудівних підприємствах.

Список літератури

1. Аналіз сучасного стану верстатних комплексів механічної обробки / Н. Р. Веселовська // Вісник ВНАУ. – 2012. – № 1. – С. 91–95.
2. Резерви підвищення гнучкості верстатних пристроїв механообробного виробництва / В. О. Іванов, В. Є. Карпусь, І. М. Дегтярьов // Вісник Житомирського державного технологічного університету. Серія: Технічні науки. – 2015. – № 4. – С. 38–44.
3. Оптимізація механічної обробки тіл обертання : монографія / В. Є. Карпусь, О. В. Котляр, В. О. Іванов.; за ред. В. Є. Карпуся. – Харків: НТМТ, 2012. – 296 с.

ПЛАНУВАННЯ ЕКСПЕРИМЕНТУ З ОБРОБКИ КАНАЛІВ АПАРАТУ СПРЯМОВУВАЛЬНОГО У ВЕРСТАТНОМУ ПРИСТРОЇ З РОЗТИСКНОЮ ЦАНГОЮ

*Плис В. С., аспірант; Дегтярьов І. М., доц. каф. ТМВІ,
Сумський державний університет, м. Суми, Україна*

Метод планування експерименту (The Design of Experiment, DOE) є важливим інструментом для системного дослідження та оптимізації технологічних процесів, який базується на статистично обґрунтованому підході до проведення експериментів. Його застосування дозволяє не лише визначити вплив окремих факторів на результат, але й виявити їх взаємодію, що особливо важливо для складних інженерних процесів, де результат формується під дією багатьох параметрів одночасно. Використання методів DOE сприяє підвищенню точності та надійності експериментальних досліджень, зменшенню кількості необхідних випробувань і більш раціональному використанню ресурсів, таких як час, матеріали та обладнання. Аналіз отриманих даних за допомогою статистичних методів забезпечує можливість прийняття обґрунтованих рішень щодо оптимізації параметрів процесу та підвищення якості продукції, а також дозволяє краще розуміти поведінку системи в різних умовах. Таким чином, DOE виступає ефективним засобом підвищення результативності досліджень і вдосконалення технологічних процесів, особливо в умовах багатofакторного впливу на результати експерименту [1].

У попередніх дослідженнях з оброблення каналів апаратів спрямовувальних, що були отримані методами чисельного моделювання [2] сказано про принципову можливість виконання обробки у запропонованому типі верстатного пристрою (ВП). На дану конструкцію ВП отримано патент на корисну модель [3], що підтверджує її новизну та практичну значущість. Водночас виникає необхідність проведення експериментальних досліджень з метою встановлення фактичної працездатності пристрою, виявлення можливих конструктивних недоліків та їх подальшого усунення для забезпечення умов серійного виробництва.

На основі запатентованої конструкції було розроблено дослідний зразок верстатного пристрою з урахуванням особливостей ручного закріплення та масштабного фактору [4]. Попередні результати обробки із застосуванням масштабного коефіцієнта виявилися задовільними.

У межах експериментальних досліджень передбачається обробка апаратів спрямовувальних, виготовлених із трьох матеріалів: низьковуглецевої сталі Ст 3, легованої конструкційної сталі 40Х та корозійностійкої жароміцної Сталі 20Х13, з якої виготовляється близько 80% зазначених виробів. Варіювання режимів обробки здійснюватиметься за рахунок зміни швидкості різання та подачі.

Обробка виконуватиметься на фрезерному верстаті з ЧПК моделі 6P13Ф3, максимальна частота обертання шпинделя якого становить 2000 об/хв. Дане обмеження суттєво впливає на призначення режимів різання, зокрема швидкості різання та навантаження на інструмент. У зв'язку з цим виникає необхідність відповідного зменшення хвилинної подачі для забезпечення стабільного процесу різання та ефективного зняття припуску.

Передбачається використання фрез із швидкорізальної сталі (HSS) та твердого сплаву. Розрахунок подачі на зуб інструмента здійснюється з урахуванням кількості зубів фрези ($z = 4$). Для твердосплавного інструмента приймається подача 0,1 мм/зуб (0,4 мм/об), що відповідає хвилинній подачі близько 80 мм/хв. Для інструмента зі швидкорізальної сталі при частоті обертання 1000 об/хв подача може становити 0,2 мм/зуб (0,8 мм/об) при аналогічному значенні хвилинної подачі. Додатково передбачається оцінка впливу зносу інструмента на процес обробки. Режими різання обмежуються значеннями: $V = 12\text{--}65$ м/хв; $S_{\text{хв}} = 80\text{--}150$ мм/хв.

На першому (пошуковому) етапі визначення раціональних режимів різання планується обробка шести каналів апаратів спрямовувальних із трьох зазначених матеріалів. Після отримання позитивних результатів пошукових експериментів передбачається додаткова обробка ще по одному апарату з кожного матеріалу на встановлених експериментальним шляхом режимах.

Після завершення обробки буде виконано вимірювання геометричних параметрів першого та останнього оброблених каналів, що дозволить визначити величину діаметрального зносу інструмента. На основі отриманих результатів будуть сформульовані рекомендації щодо вибору типу різального інструмента та режимів різання для обробки апаратів спрямовувальних із відповідних матеріалів.

Список літератури

1. Dar A. A., Yadav P., N A., Wangmo T. A. Optimizing processes and products: The role of DOE // Insight – Statistics. 2024. Vol. 7, No. 1. P. 1–18.
2. Плис В. С., Дегтярьов І. М., Нешта А. О., Метенко О. М. Розроблення конструкції верстатного пристрою для оброблення каналів апаратів спрямовувальних відцентрових насосів. Технічні науки та тех-нології. 2024. № 3(37). С. 64–78.
3. Плис В. С., Дегтярьов І. М., Нешта А. О., Мосненко Д. С. Переналаджуваний верстатний пристрій із розтискною цангою : пат. на корисну модель №159398, Україна. № заявки у 2024 05571; заявл. 26.11.2024; опубл. 21.05.2025, Бюл. № 21.
4. Плис В. С., Дегтярьов І. М. Аналіз перспектив застосування масштабного фактору під час процесів фрезерування тонкостінних деталей при виготовленні верстатних пристроїв. Сучасні технології промислового комплексу (СТПК – 2025): Тези доповідей ІХ міжнародної науково-практичної конференції, Херсон-Хмельницький 2025, 17–19 вересня 2025 р.

**ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ СТАТИЧНИХ ТА ДИНАМІЧНИХ
ХАРАКТЕРИСТИК, А ТАКОЖ МАТЕРІАЛОЄМНОСТІ УНІФІКОВАНИХ
ТА ОПТИМІЗОВАНИХ КОНСТРУКЦІЙ ОПОРНОГО ЕЛЕМЕНТУ
ВЕРСТАТНОГО ПРИСТРОЮ ТИПУ «ПЛИТА»**

Юсунов Д. А., аспірант; Бережний Д. І., студ. гр. ІМ-21/2тм-3; Євтухов А. В., в. о. зав. каф. ТМВІ, Сумський державний університет, м. Суми

В рамках дослідження, спрямованого на удосконалення конструкцій типових опорних елементів верстатних пристроїв, було проведено топологічну оптимізацію скінченно-елементної моделі плити M/C BASE PLATE BP06-75500-0500-18 (500×500×75 мм) [1]. Аналіз результатів розрахунку статичних та динамічних характеристик моделей уніфікованої конструкції «колони» дозволив передбачити можливість її удосконалення шляхом топологічної оптимізації за критерієм мінімізації маси виробу.

Так, топологічна оптимізація моделі уніфікованої конструкції «колони» з використанням САЕ-системи Ansys Workbench (модуль Structural Optimization) дозволила запропонувати проект виробу, який характеризується зменшенням маси зі 142 до 116 кг при допустимих змінах статичних та динамічних характеристик.

Результати розрахунку статичних (для умов навантаження, характерних для торцевого фрезерування виробів) та динамічних характеристик, одержані для скінченно-елементних моделей уніфікованих та оптимізованих конструкцій опорного елемента типу «плита», наведені в табл. 1–2.

Таблиця 1 – Порівняння статичних характеристик моделей «плити»

Конструкція	Максимальне деформація, м	Максимальне еквівалентне напруження, МПа
Уніфікована	$1,54 \cdot 10^{-6}$	$7,03 \cdot 10^6$
Оптимізована	$1,60 \cdot 10^{-6}$	$5,14 \cdot 10^6$
Різниця, %	+3,8	-27,0

Таблиця 2 – Порівняння резонансних частот коливань моделей «плити»

Конструкція	Частота, Гц		
	Мода 1	Мода 2	Мода 3
Уніфікована	1635	2498	2512
Оптимізована	1904	2795	2803
Різниця, %	+16.4	+11.9	+11.6

Список літератури

1. M/C BASE PLATE BP06-75500-0500-18. URL: <https://www.leave-fixture.com/en-US/p667-bp06-75500-0500-18>

ІМІТАЦІЙНА МОДЕЛЬ-ТРЕНАЖЕР РОЛИКОВОГО КОНВЕЄРА

*Метенко О. М., студ. гр. ТМ.м-41; Євтухов А. В., в. о. зав. каф. ТМВІ,
Сумський державний університет, м. Суми*

В рамках підготовки кваліфікаційної роботи магістра було розроблено імітаційну модель-тренажер роликowego конвеєра (рис. 1), до складу якої увійшли такі основні функціональні компоненти:

- опорна рама, як базовий елемент всієї конструкції конвеєра;
- ролики, як несучі елементи, призначені для розподілення навантаження з боку транспортованого об'єкта та передачі руху останньому;
- ланцюгова передача, призначена для передачі руху від приводу до роликів;
- привідна станція, як складальний вузол, який задає рух в системі конвеєра (до складу вузла входять електричний двигун та коробка передач).

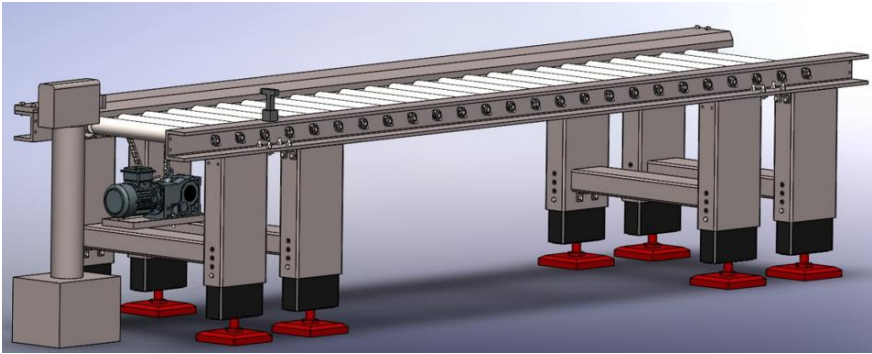


Рисунок 1 – Загальний вигляд імітаційної моделі роликowego конвеєра

Геометрична модель конвеєра розроблена в системі SolidWorks. Використання утиліти Motion Analysis дозволило задати фізичні властивості та характеристики елементів зазначених функціональних компонентів та транспортованих об'єктів.

Наявність такої інтерактивної моделі дозволяє досліджувати кінематику та динаміку руху транспортованих об'єктів, кінематику ланцюгової передачі, будову та принцип дії конвеєра загалом, використовуючи середовище SolidWorks.

Результати роботи впроваджені в навчальний процес в рамках вивчення обов'язкової дисципліни «Автоматизація виробничих процесів» (освітня програма «Технології машинобудування», другий (магістерський) рівень вищої освіти).

3D-СКАНУВАННЯ ПОВОРОТНОГО КУЛАКА З ВИКОРИСТАННЯМ СКАНЕРА PEEL 3

*Романіка К. Р., студ. гр. ТМ.м-51; Свтухов А. В., в. о. зав. каф. ТМВІ,
Сумський державний університет, м. Суми*

3D-сканування виробів зі складною просторовою геометрією порівняно з використанням традиційних (ручних) методів та навіть координатно-вимірювальних машин є ефективним рішенням для створення їх цифрових моделей.

До основних переваг 3D-сканування можна віднести високу точність та деталізацію цифрової моделі (сканер захоплює мільйони точок, створюючи «цифрову хмару даних», яка описує кожен вигин сканованої поверхні з точністю до мікрметрів), високу продуктивність, можливість швидкого та наочного порівняння цифрового образу реального виробу з точною CAD-моделлю виробу.

Так, для створення цифрової моделі поворотного кулака квадроцикла BRP Can-AM Outlander L Max 500 DPS (рис. 1) було використано 3D-сканер PEEL 3.



Рисунок 1 – Поворотний кулак квадроцикла Outlander L Max 500 DPS

Сканування виробу з використанням 3D-сканера PEEL 3 реалізується в декілька основних етапів:

- 1) підготовка об'єкта та робочого місця (очищення виробу від пилу та бруду, розміщення світловідбиваючих маркерів на об'єкті сканування);
- 2) налаштування програмного засобу Peel.OS (вибір розміру об'єкта сканування, ступеня деталізації тощо);
- 3) калібрування сканера з використанням спеціального маркованого столу;
- 4) сканування (програмний засіб Peel.OS надає підказки у вигляді кольорової карти для забезпечення оптимального розміщення сканера щодо об'єкта сканування);

5) обробка цифрової хмари точок / post-processing (видалення «шуму» та зайвих деталей (поверхні столу), об'єднання «сканів» (для складних виробів, які скануються в декількох позиціях), виправлення «сірих» областей);

6) Експорт результатів сканування. Найпопулярнішими форматами для експорту сканованих моделей є STL (для роботи в інженерних CAD-системах та 3D-друку) і OBJ (у разі сканування об'єктів з текстурою (кольором)).

В результаті сканування поворотного кулака було одержано його цифрову модель (рис. 2), яку було експортовано у форматі STL з метою подальшого доопрацювання та створення твердотільної моделі з використанням програми інженерного дизайну SolidWorks.

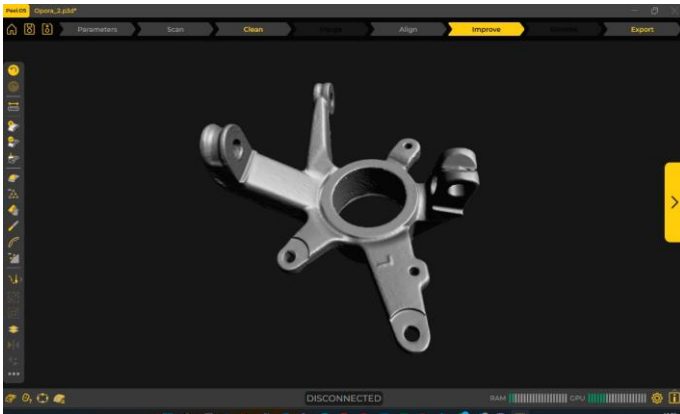


Рисунок 2 – Цифрова модель поворотного кулака, одержана шляхом 3D-сканування (Peel.OS)

ІМІТАЦІЙНА МОДЕЛЬ-ТРЕНАЖЕР РОБОТОТЕХНІЧНОГО КОМПЛЕКСУ ДЛЯ ДОРНУВАННЯ ОТВОРІВ

*Кулешов М. М., студ. гр. ТМ.м-41; Свухов А. В., в. о. зав. каф. ТМВІ,
Сумський державний університет, м. Суми*

В рамках підготовки кваліфікаційної роботи магістра було розроблено імітаційну модель-тренажер (далі «модель») робототехнічного комплексу для дорнування отворів у корпусах газової запальнички ЗГУ-71-1.

Модель РТК була розроблена з використанням системи графічного дизайну SolidWorks та утиліти Motion Analysis.

Геометрична конфігурація моделі є максимально наближеною до конфігурації реального РТК (рис. 1), а використання утиліти Motion Analysis дозволяє враховувати під час розрахунку моделі різноманітні фізичні явища: дію сили тяжіння, сил пружного та непружного опору тощо.

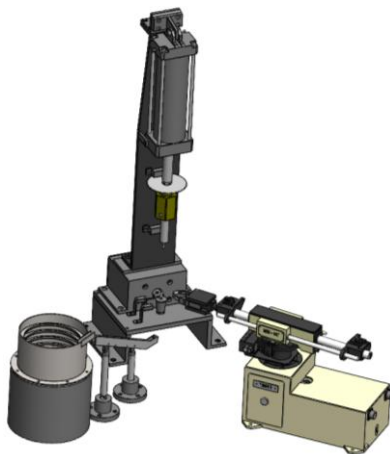


Рисунок 1 – Загальний вигляд імітаційної моделі РТК для дорнування отворів

Наявність такої наближеної до реальної системи інтерактивної моделі дозволяє дослідити, зокрема і дистанційно, будову та принципи функціонування РТК, кінематику та динаміку рухів заготовок, окремих функціональних компонентів РТК (вібробункера, робота-маніпулятора, пристрою для дорнування).

ДОСЛІДЖЕННЯ СКІНЧЕННО-ЕЛЕМЕНТНОЇ МОДЕЛІ СИСТЕМИ «ВЕРСТАТНИЙ ПРИСТРІЙ-ЗАГОТОВКА» МЕТОДОМ СТАТИЧНОГО АНАЛІЗУ

*Ситнев А. С., студ. гр. ТМ.м-41; Свтухов А. В., в. о. зав. каф. ТМВІ,
Сумський державний університет, м. Суми*

В рамках підготовки кваліфікаційної роботи магістра було розроблено спеціальну конструкцію верстатного пристрою (ВП) для базування та закріплення заготовки картера К 31-05.01.01.001 на операції комплексній на обробному центрі з ЧПК.

Для перевірки правильності проектних та конструкторських рішень, прийнятих під час проектування ВП було запропоновано дослідити скінченно-елементну модель системи «пристрій-заготовка» методом статичного аналізу з використанням САЕ-системи Ansys Workbench.

До складу досліджуваної системи «пристрій-заготовка» увійшли такі компоненти: корпус пристрою, заготовка, затискачі, вилки, осі (рис. 1).

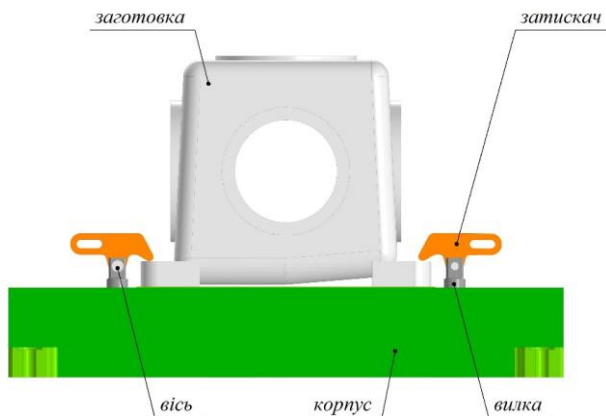


Рисунок 1 – Складальна модель системи «пристрій-заготовка» (SolidWorks)

Для підвищення точності розрахунків моделі були задані характеристики контакту поверхонь компонентів системи «пристрій-заготовка», які взаємодіють між собою. Наприклад, для системи «заготовка-корпус» була задана характеристика «тертя ковзання» з коефіцієнтом тертя 0,2. Як граничні умови були задані момент різання $M = 650 \text{ Н}\cdot\text{м}$, характерний для фрезерування верхнього плоского торця заготовки, та зусилля $P = 13\ 100 \text{ Н}$, що діють з боку штоків затискних приводів на затискачі.

В результаті розрахунку моделі були одержані діаграми внутрішніх напружень (рис. 2) та загальних переміщень (рис. 3).

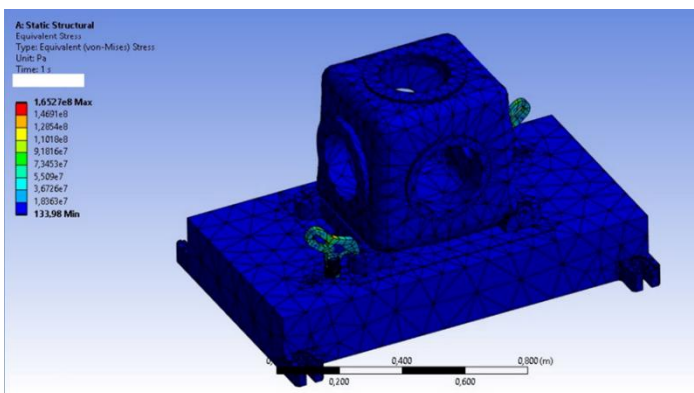


Рисунок 2 – Діаграма внутрішніх напружень (Ansys Workbench)

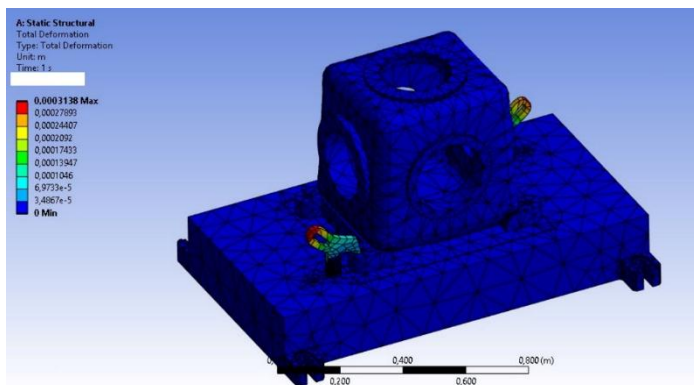


Рисунок 3 – Діаграма загальних переміщень (Ansys Workbench)

Максимальний рівень напружень, характерний затискачам, становить 165 МПа, що не перевищує допустимий рівень (250 МПа), а максимальний рівень переміщень, також характерний затискачам, становить 0,31 мм, що також не перевищує допустимі значення, враховуючи функціональне призначення компонентів пристрою. Отже, запропонована конструкція верстатного пристрою характеризується як надійна, та така, що забезпечує необхідну точність оброблення поверхонь заготовок в умовах дії статичних навантажень.

ДОСЛІДЖЕННЯ СКІНЧЕННО-ЕЛЕМЕНТНОЇ МОДЕЛІ СИСТЕМИ «ВЕРСТАТНИЙ ПРИСТРІЙ-ЗАГОТОВКА»

*Погрібний С. Р., студ. гр. ТМ.м-41; Свухов А. В., в. о. зав. каф. ТМВІ,
Сумський державний університет, м. Суми*

В рамках підготовки кваліфікаційної роботи магістра було розроблено спеціальну конструкцію верстатного пристрою для базування та закріплення заготовок вала вторинного 131-180.20.56 на фрезерній операції. Особливістю пропонуваної конструкції пристрою є можливість одночасного встановлення двох заготовок. Як привід закріплення заготовок використовується пневмокамера односторонньої дії. Для забезпечення компактного компонування пристрою в його конструкції використовується складний передавальний механізм, який поєднує пневмокамеру із затискним елементом.

Для перевірки правильності прийнятих проєктних рішень в роботі було проведено дослідження скінченно-елементної моделі верстатного пристрою із застосуванням методів статичного та модального аналізу.

Розрахунки скінченно-елементних моделей вимагають значних розрахункових ресурсів, отже, складальна модель була спрощена: до її складу, зокрема, увійшли моделі заготовок, фрагмента корпусу, опорних призм, штоку, затискного елемента (рис. 1).

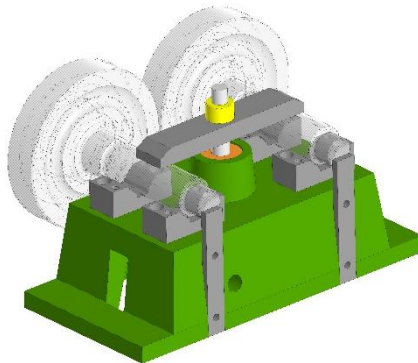


Рисунок 1 – Складальна модель верстатного пристрою (SolidWorks)

Аналіз скінченно-елементної моделі був виконаний з використанням САЕ-системи Ansys Workbench (модулі Static Structural, Modal). В результаті статичного розрахунку моделі була одержана діаграма (рис. 2), яка показала максимальний рівень внутрішніх напружень 135 МПа, що не перевищує допустимий рівень, який у свою чергу визначається межею текучості середньовуглецевої конструкційної сталі 250 МПа.

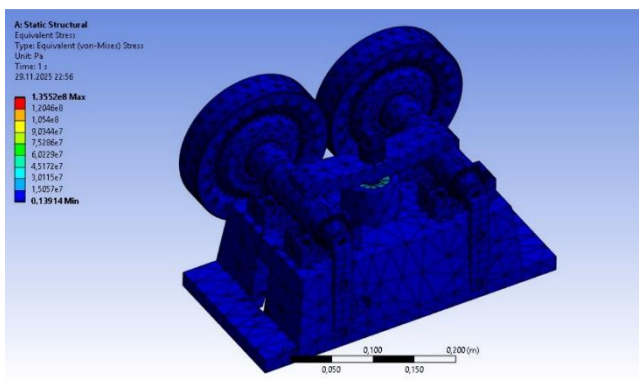


Рисунок 2 – Діаграма внутрішніх напружень (Ansys Workbench)

Також була одержана діаграма (рис. 3), яка показала максимальну величину загальних переміщень 58 мкм, характерну елементу верстатного пристрою (з огляду на функціональне призначення компонентів верстатного пристрою ця величина, хоч і є значною, але не впливає на точність оброблення поверхонь заготовки).

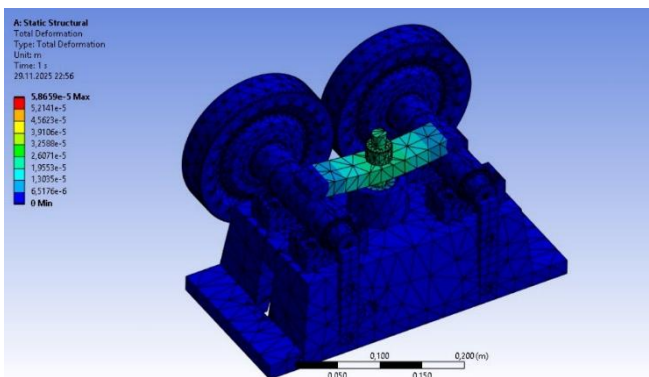


Рисунок 3 – Діаграма загальних переміщень (Ansys Workbench)

За результатами модального аналізу були визначені характерні досліджуваній конструкції системи «пристрій-заготовка» три перших форми власних коливань з притаманними ним «резонансними» частотами (583, 584 та 604 Гц). Аналіз показав, що усі три частоти суттєво відрізняються від частоти «процесу різання» (430 Гц), характерної для фрезерування. Отже, ймовірність виникнення явища резонансу практично відсутня за прийнятих умов.

Запропонована конструкція верстатного пристрою є надійною в умовах дії статичних та динамічних навантажень.

ІМІТАЦІЙНА МОДЕЛЬ-ТРЕНАЖЕР СТЕНДА ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ СТАТИЧНОГО БАЛАНСУВАННЯ СИСТЕМИ «ШЛІФУВАЛЬНИЙ КРУГ-ОПРАВКА»

*Клімов М. А., студ. гр. ТМ.м-41; Євтухов А. В., в. о. зав. каф. ТМВІ,
Сумський державний університет, м. Суми*

В умовах дистанційного навчання актуальності набувають інтерактивні моделі-тренажери, наближені за своїм зовнішнім виглядом та характеристиками до реальних технічних систем.

В рамках підготовки кваліфікаційної роботи магістра було розроблено імітаційну модель-тренажер станда типу «паралельні ножі» для дослідження статичного балансування системи «шліфувальний круг-оправка».

Геометричні моделі станда та системи «круг-оправка» були побудовані в системі інженерного дизайну SolidWorks (рис. 1).

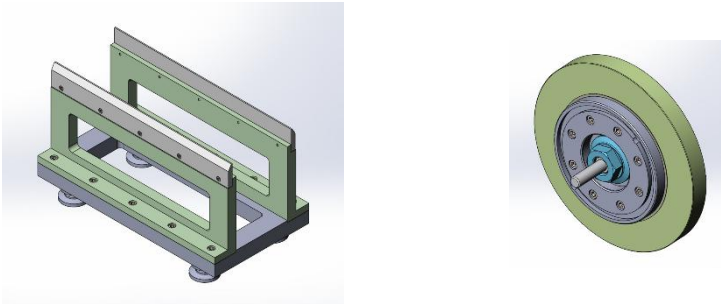


Рисунок 1 – Моделі балансувального станда та системи «круг-оправка»

Інтерактивність та наближеність моделі-тренажера до реальної системи забезпечуються шляхом додавання та налаштування певних фізичних інструментів утиліти Motion Analysis, яка дозволяє проводити повний кінематичний та динамічний аналіз механізмів з урахуванням законів фізики, маси об'єктів, тертя, інерції тощо. Для моделювання явища незрівноваженості системи «круг-оправка» в геометричній моделі системи було задано певний ексцентриситет між центрами зовнішньої циліндричної поверхні круга та його установчим отвором. Водночас густина компонента «круг» була задана на рівні 2300 кг/м^3 , що відповідає середньостатистичній густині абразивного круга. Для підвищення рівня адекватності імітаційної моделі в рамках дослідження процесу статичного балансування системи «круг-оправка» використовувались інструменти: Gravity (сила тяжіння) – для відтворення сили інерції, спричиненої незрівноваженістю круга, Contact (контакт) – для опису взаємодії між поверхнями оправки та ножів, Torsional Damper (крутний демпфер) – для гасіння коливальних рухів системи «круг-оправка» за її наявної незрівноваженості.

КОНЦЕПЦІЯ ЛОКАЛІЗОВАНОЇ СИСТЕМИ ТЕРМОДИНАМІЧНОЇ СТАБІЛІЗАЦІЇ ПОМЕШКАНЬ ДЛЯ АДАПТИВНОГО КЕРУВАННЯ МІКРОКЛІМАТОМ

*Прохоренко С., професор; Прохоренко М. В., доцент;
Панчишин І. І.; Демидов І. В., професор, Національний університет
«Львівська політехніка», м. Львів*

Нами сформовано та попередньо пропрацьовано концептуальну архітектуру інтегрованої системи стабілізації мікроклімату житлових приміщень, орієнтовану на добове та сезонне акумулювання енергії зі збереженням її ексергетичної якості. Система базується на тривірневій структурі: стратифікований термоакумулятор з гравійно-водяним ядром, бімодальний розподільчий контур для адаптивного спрямування теплових потоків та сонячний комин з ламінарним водоспадом як атмосферний інтерфейс. Запропоновано підхід до поєднання цих елементів у єдиний мікрокліматичний контур, де кожному режиму роботи відповідає термодинамічно та просторово обґрунтована траєкторія переміщення енергії.

Наукова новизна полягає не в окремих технічних рішеннях, а в системній інтеграції відомих принципів (стратифікація, променистий теплообмін, пасивна вентиляція) у цілісну архітектуру з єдиним алгоритмом керування. Концепція розглядає будівлю як локальну термодинамічну екосистему, де акумулювання, розподіл, вентиляція та керування підпорядковані принципу «джерело-стік» із максимальним використанням пасивних механізмів.

На поточному етапі документ має характер інженерного концепту високого ступеня опрацьованості. Подальший розвиток передбачає чисельне моделювання термоклину, гідравлічних характеристик, ризиків конденсації, а також експериментальну валідацію на стендовому прототипі. Практичне значення роботи полягає у створенні модульної платформи для індивідуального житла, здатної зменшити пікові енергонавантаження та підвищити автономність будівель у помірному кліматі. Така логіка узгоджується з відомими підходами до стратифікованого теплового акумулювання, де збереження температурного шару підвищує ефективність використання запасеної енергії [1], а також із результатами досліджень променистих систем опалення й охолодження, які демонструють кращий комфорт і менший вертикальний температурний градієнт порівняно з переважно конвективними системами [2].

Список літератури

1. Han Y.M., Wang R.Z., Dai Y.J. Thermal stratification within the water tank // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2009. Vol. 13, No. 5. P. 1014–1026.
2. Imanari T., Omori T., Bogaki K. Thermal comfort and energy consumption of the radiant ceiling panel system: comparison with the conventional all-air system // Energy and Buildings. 1999. Vol. 30, No. 2. P. 167–175.

МЕТОДОЛОГІЧНІ ЗАСАДИ ПОБУДОВИ ДОСТУПНОЇ БІОМЕТРИЧНОЇ СИСТЕМИ ДЛЯ ДИСТАНЦІЙНОГО МОНІТОРИНГУ РЕАБІЛІТАЦІЇ

Черкас А. І., аспірант; Прохоренко С., професор, Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів

В умовах повномасштабної Українсько-російської війни суттєво збільшилася кількість осіб із тяжкими травматичними, ортопедичними та неврологічними ураженнями, що потребують поетапного та довготривалого реабілітаційного відновлення, в той же час наявне перевантаження медичних установ та обмеженість їх ресурсів, що зумовлює необхідність удосконалення підходів до організації медичного супроводу та актуалізує впровадження технічних рішень, здатних забезпечити об'єктивний контроль стану пацієнта поза межами стаціонару. Запропоновано концептуальний підхід до побудови доступної робототехнічної апаратно-програмної біометричної системи, орієнтованої на кореляційно-трендовий аналіз динаміки реабілітаційного процесу. Система передбачає систематичний збір, накопичення та обробку біометричних параметрів у домашніх умовах із формуванням інтегральних кількісних індикаторів ефективності відновлення.

Методологічну основу становлять методи статистичного аналізу часових рядів та дослідження міжпараметрових кореляційних зв'язків, що дозволяє виявляти прихованих закономірностей змін функціонального стану пацієнта. Для забезпечення достовірності результатів передбачено використання методів математичної статистики та метрологічного аналізу, зокрема оцінювання повторюваності вимірювань, аналіз невизначеності та контроль стабільності вимірювальних каналів. Такий підхід мінімізуватиме ризик помилкової інтерпретації отриманих даних та формуватиме підґрунтя для об'єктивного прийняття клінічних рішень. Застосування алгоритмів машинного навчання розширює аналітичні можливості системи кластеризації траєкторій відновлення та формування прогностичних моделей перебігу реабілітаційного процесу. Очікується, що практичне впровадження запропонованої системи сприятиме підвищенню ефективності дистанційного моніторингу, своєчасній корекції реабілітаційних програм та зменшенню навантаження на медичні установи. Розроблена методологія поєднує інженерні, статистичні та метрологічні підходи, забезпечуючи комплексне оцінювання процесу відновлення (особливо позалікарняного) в умовах сучасних викликів системи охорони здоров'я.

ПРОЄКТУВАННЯ ЗАГОТОВОК ДЛЯ ГЛИБОКОГО ВИТЯГУВАННЯ

Шокун Б. О., студ. гр. МБ-21; Швець С. В., доц. каф. ТМВІ,
Сумський державний університет, м. Суми

Визначення розмірів і форми заготовок під час процесу витягування ґрунтується на принципі збереження об'єму між заготовкою та готовою деталлю. Зазвичай зміни товщини матеріалу не враховуються, тому розміри заготовки встановлюють виходячи з рівності площ поверхонь заготовки та готової деталі з додатковим припуском на обрізування. Процес витягування здійснюється внаслідок пластичної деформації матеріалу.

Витягування порожнистих деталей виконують шляхом перетворення плоского фланця на циліндричну або коробчасту форму, що досягається створенням у фланці плоского напруженого стану за схемою «стискання–розтягнення». Такий спосіб дозволяє виготовляти циліндричні, овальні, коробчасті та інші деталі з вертикальними або дещо похилими стінками. Метод застосовується для металів із високою пластичністю та невеликою міцністю, зокрема для сталей марок 08 і 10 у відпаленому стані.

Під час витягування круглих деталей заготовка має форму круга, діаметр якого обчислюють за формулою:

$$D = 1,13\sqrt{F}, \quad (1)$$

де $F = \sum f$ – площа поверхні готової деталі, що дорівнює сумі площ окремих поверхонь.

Діаметри заготовок для витягування деталей складної форми визначають згідно із правилом Паппа: «Площа поверхні тіла обертання, утвореного кривою довільної форми внаслідок її обертання навколо осі, розміщеної в тій самій площині, дорівнює добутку довжини кривої на довжину кола, описаного її центром ваги»:

$$F = 2\pi \cdot R_s \cdot L, \quad (2)$$

де L – довжина твірної;

R_s – відстань від осі до центра ваги.

Папп Александрийський — математик і механік епохи пізнього еллінізму, що жив і працював в Александрії. Ні рік народження, ні рік смерті Паппа не відомі. Мабуть це кінець III і початок IV століття.

У такому разі діаметр заготовки визначають як

$$D = \sqrt{8L \cdot R_s} = \sqrt{8 \sum l_i \cdot r_i}. \quad (3)$$

Вираз для визначення відстаней від центрів ваги дуг профілю до осі, навколо якої вони обертаються:

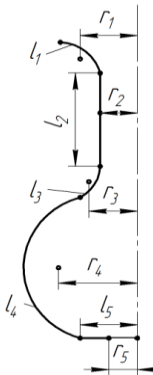


Рисунок 1 – Профіль деталі

$$r_i = \frac{r_A + r_B}{2} \pm \sin \beta \cdot \left(R \frac{\sin \alpha}{\alpha} - \sqrt{R^2 - \frac{L^2 + (r_B - r_A)^2}{4}} \right). \quad (4)$$

Під час багатоопераційного витягування високих коробок заготовка має форму круга.

Алгоритм визначення діаметра заготовки [1] передбачає такі кроки. Контур деталі поділяють на окремі ділянки – прямі відрізки та дуги (рис. 1). Для кожної ділянки визначають положення центра ваги: для відрізка – посередині, для дуги – розраховують або беруть із таблиці. Далі знаходять довжину кожної ділянки та відстань від її центра ваги до осі обертання. Після цього довжини ділянок і відстані центрів ваги від осі обертання перемножують і підсумовують

$$\sum l_i r_i = l_1 r_1 + \dots + l_n r_n \quad (5)$$

Отримане значення використовують у формулі (3) для обчислення діаметра заготовки. Проте, сучасні графічні редактори дозволяють визначити площу поверхні деталі набагато швидше і точніше.

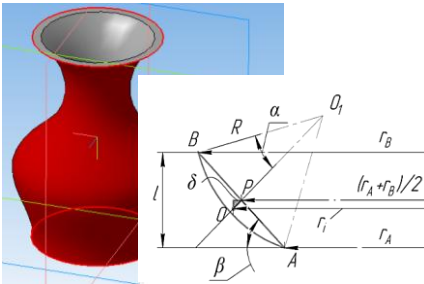


Рисунок 2 – Схема для визначення відстані від центра ваги дуги до осі

визначення площі поверхні деталі набагато швидше і точніше. Визначається площа поверхні, рис. 2, і за формулою (1) діаметр заготовки.

Якщо під час витягування відбувається значне стоншення стінок, розрахунок виконують, виходячи з умови рівності об'ємів заготовки та деталі.

На практиці існують різні випадки витягування, що потребують відмінних методів

визначення розмірів заготовок, зокрема: витягування круглих деталей простої форми; витягування круглих деталей складної форми; витягування прямокутних коробчастих деталей; витягування деталей складної або несиметричної конфігурації; витягування із помітним потоншенням матеріалу.

Геометрична форма деталі є додатковою класифікаційною ознакою. За цим критерієм усі порожнисті деталі поділяють на три основні групи: тіла обертання, деталі коробчастої форми, деталі складної несиметричної форми.

Кожна з цих груп має свої різновиди. Наприклад, тіла обертання можуть мати форму циліндрів, конусів, бути гладкими або східчастими, тощо.

У разі невеликої товщини матеріалу зміщений об'єм є причиною утворення гофрів на поверхні деталі. Для запобігання утворенню гофрів застосовують притискання заготовки тримачем складок.

Список літератури

1. Швець С. В. Моделювання мехатронної ковальсько-пресової системи : навчальний посібник / С. В. Швець, У. С. Швець, В. М. Борисюк. – Суми : Сумський державний університет, 2022. – 176 с.

АНАЛІЗ СПОСОБІВ ОХОЛОДЖЕННЯ ДЕРЕВОРІЗАЛЬНИХ ІНСТРУМЕНТІВ

*Зельман Б. М., аспірант; Подоба А. М., аспірант; Бурдяк М. Р., доц. каф.
ТМТС, Національний лісотехнічний університет України, м. Львів*

Під час пиляння деревини круглими пилками тепло утворюється в зоні різання в контакті «зубець-стружка», а також на задній і бокових поверхнях зубця. Це спричиняє нагрівання ріжучих кромок, інтенсивне затуплення, зростання сил різання та зниження точності пиляння. Для ортогональних круглопилкових верстатів із горизонтально розміщеною пилкою теплове навантаження зростає додатково: нижня частина диска контактує зі стружкою, що опадає на колоду, та третью об поверхню самої колоди. Через низьку теплопровідність деревини відведення тепла майже відсутнє, тому теплова енергія накопичується в металевому диску і віддається переважно через верхню поверхню диска і поверхні фланця, що недостатньо для охолодження.

Особливості теплоутворення й охолодження слід розглядати як теплотрибологічний режим, враховуючи анізотропію, вологість і смолистість деревини, геометрію зубців та режими різання. Ефективність охолодження доцільно оцінювати за трьома групами показників: термічні (максимальна температура диска, рівномірність температурного поля), трибологічні (тертя, адгезійний і абразивний знос, налипання смоли), технологічні (шорсткість, відсутність підпалу, стабільність пропилю).

Сучасні способи охолодження включають: «сухе» самовільне охолодження за рахунок оптимізації геометрії, матеріалу і покриття інструменту та режимів різання; але цього часто недостатньо; примусове повітряне охолодження (обдув, аспірація), що підсилює конвекцію та покращує видалення стружки із зони різання, однак ефективні серійні рішення для колодипильних верстатів майже не застосовують; рідинне охолодження, поширене на стрічковопилкових верстатах: вода з 1-2% добавок (поверхнево-активні речовини, антисмолисті агенти, антифриз у зимовий період) подається крапельно або невеликим струменем для зниження температури й очищення зубців; малорідинні технології і тверді мастила: аерозоль оливи формує тонку плівку, зменшує тертя та нагрівання; криогенне МКЗ (CO_2 або N_2) поєднує мікрозмащування з інтенсифікованим охолодженням і перспективне за високих теплових навантажень.

Для горизонтальної круглої пилки на ортогональному верстаті найбільш раціональним виглядає локальне мінімальне рідинне охолодження в імпульсному режимі: короткі подачі води тонким струменем у зону входу зубців у пропилю повинні забезпечити змочування периферії диска без «заливання» пропилю. Це дозволить знизити температуру, знизити інтенсивність затуплення, зменшити адгезію смоли та бічне тертя, стабілізує пилку у пропилі та забезпечить високу точність пиляння.

INCREASING THE STRENGTH OF THIN-WALLED COMPONENTS MADE FROM POWDER STEELS USING CHEMICAL-THERMAL TREATMENT

Mazhuha M., student; Proskurnia S., Ph.D. student, Sumy State University, Sumy

With high mechanical strength, wear resistance, and corrosion resistance, high-quality powder steel is the material of choice for manufacturing components that operate under heavy-duty conditions. They are used in the manufacture of tooling for the cold working of metals and polymers, press tools, industrial recycling components, and critical parts for military equipment and transmission components (screws, bushings, rollers).

To improve the strength properties of components made from powder-metallurgy steels, the manufacturer recommends heat-treatment regimens determined experimentally. These regimes enable the achievement of optimal strength values for the components; however, they do not fully realise the available potential for surface hardness on the components' working surfaces. The heat treatment regimens specified by the manufacturer do not fully realise the potential of the strength characteristics of components made from these steels, which operate under demanding conditions, as the service life of these components is short compared to the cost of the material.

This is precisely why to improve the surface hardness of components made from these steels, a comprehensive chemical-thermal treatment must be applied in addition to the heat treatment. This additional chemical-thermal treatment will improve the performance characteristics of components made from powder steel, particularly the hardness of their working surfaces.

Properly performed chemical-thermal treatment (CTT) of powder steels will alter the composition and structure of the surface layer of components. It will significantly improve key strength characteristics, such as surface hardness, wear resistance, corrosion resistance and anti-friction properties. At the same time, CTT induces compressive stresses in the surface layer, preventing crack formation under cyclic loading and thereby improving fatigue strength.

The most common methods of chemical-thermal treatment are nitriding or carburising, which create an ultra-hard outer layer critical for components operating under high pressure. At the same time, thanks to the surface saturation with carbon or nitrogen, friction causes significantly less damage to components, extending the service life of bushings, screws, and rollers. The reduced coefficient of friction prevents parts from “seizing up” (jamming) in mechanism assemblies operating under demanding conditions.

The development of optimal chemical-thermal treatment modes will significantly improve the strength properties of powder steels and greatly enhance their suitability for component manufacture.

Research supervisor – Ph.D. in Engineering, Senior Lecturer A. Dovhopolov.

**СЕКЦІЯ «ТЕХНОЛОГІЯ
КОНСТРУКЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ
І МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО»**

ПЕРСПЕКТИВИ ЗАСТОСУВАННЯ ЗАХИСНИХ ПОКРИТТІВ

*Руденко М. О., студ. гр. І-22/2мт; Дезула А. І., в. о. зав. каф. ПМіТКМ,
Сумський державний університет, м. Суми*

Сучасний розвиток машинобудування характеризується зростанням вимог до надійності, довговічності та ефективності роботи машин і механізмів. Деталі машин часто працюють у складних умовах – під дією високих температур, агресивних середовищ, механічних навантажень і тертя. У зв'язку з цим важливим напрямом підвищення експлуатаційних характеристик матеріалів є застосування різноманітних захисних покриттів. Одним із найбільш перспективних рішень є використання дифузійних покриттів, які дозволяють значно покращити фізико-механічні та хімічні властивості поверхні деталей.

Дифузійні покриття формуються внаслідок насичення поверхневого шару металу певними хімічними елементами (алюмінієм, хромом, титаном, кремнієм тощо) при підвищених температурах. У процесі такої обробки відбувається взаємна дифузія елементів покриття і матеріалу основи, що забезпечує високу адгезію та формування міцного дифузійного шару. В результаті покращуються зносостійкість, жаростійкість і корозійна стійкість поверхні виробу [1].

У машинобудуванні дифузійні покриття широко застосовуються для зміцнення деталей, які працюють в умовах інтенсивного тертя та високих температур. До таких деталей належать різальні інструменти, елементи двигунів, турбін, штампи, а також деталі трибологічних систем. Завдяки формуванню міцного поверхневого шару вдається знизити коефіцієнт тертя та інтенсивність зношування, що суттєво підвищує ресурс роботи деталей [2].

Особливу увагу привертають багатокомпонентні дифузійні покриття, які містять декілька легуючих елементів, наприклад титан, алюміній та кремній. Такі покриття характеризуються складною фазовою структурою та підвищеною мікротвердістю, що забезпечує покращені експлуатаційні властивості матеріалу. Дослідження показують, що нанесення багатокомпонентних дифузійних покриттів може значно підвищити жаростійкість та стійкість до окиснення металів і сплавів [3].

Важливою перевагою дифузійних покриттів є також їх висока корозійна стійкість. Наприклад, покриття, що містять титан, хром та алюміній, демонструють значне підвищення стійкості сталей до впливу кислотних і агресивних середовищ. Це дозволяє застосовувати такі матеріали в умовах хімічної промисловості, енергетичного машинобудування та металургії [4].

Сучасні технології нанесення дифузійних покриттів включають порошкові, газофазні та вакуумні методи. Використання вакуумно-дифузійних процесів дозволяє отримувати покриття з високою однорідністю та контролювати їх товщину і структуру. Крім того, такі технології характеризуються відносно низькою енергоємністю та можливістю

формування функціональних поверхневих шарів із заданими властивостями [2].

Перспективи розвитку дифузійних покриттів пов'язані з удосконаленням технологій їх формування, розробкою нових багатокомпонентних систем та використанням наноструктурованих матеріалів. Значну увагу приділяють також комбінованим технологіям, які поєднують дифузійне насичення з іншими методами поверхневого зміцнення. Це дозволяє створювати покриття з комплексом властивостей – високою твердістю, зносостійкістю, термостійкістю та корозійною стійкістю [5].

Отже, застосування захисних дифузійних покриттів є одним із найбільш ефективних напрямів підвищення надійності, довговічності та експлуатаційної ефективності деталей машин. Формування дифузійного шару на поверхні металів і сплавів дозволяє суттєво покращити їх фізико-механічні, трибологічні та хімічні властивості. Завдяки високій адгезії між покриттям і основним матеріалом забезпечується стійкість поверхневого шару до відшаровування, що є важливим фактором під час роботи деталей у складних умовах експлуатації.

Крім того, впровадження дифузійних покриттів у виробничі процеси дозволяє знизити витрати на технічне обслуговування та ремонт обладнання, що має важливе економічне значення для промислових підприємств. Завдяки можливості цілеспрямованого легування поверхневих шарів металів різними елементами можна отримувати покриття з наперед заданими властивостями, адаптованими до конкретних умов експлуатації. Це відкриває широкі можливості для підвищення ефективності роботи деталей, які працюють у умовах високих температур, агресивних середовищ, значних механічних навантажень і інтенсивного тертя.

Список літератури

1. Хижняк В. Г., Лоскутова Т. В., Калашніков Г. Ю. Дифузійні багат шарові покриття за участю титану, хрому, алюмінію, вуглецю та азоту на сталі У8А. // Вісник Національного технічного університету України «КПІ». Серія: Машинобудування. 2018. № 2. С. 45–51.
2. Кобернік Н. А. Підвищення експлуатаційних властивостей вуглецевих сталей шляхом нанесення дифузійних покриттів за участю Ti, Cr, Al : дис. ... канд. техн. наук : 05.02.01. Київ, 2018. 150 с.
3. Khizhnyak V. G., Loskutova T. V., Datsiuk O. E. Multicomponent diffusion coatings based on titanium, aluminum and silicon on nickel // Research Bulletin of NTUU “KPI”. 2015. № 1. P. 35–41.
4. Бобир М. І., Левченко А. М. Поверхнє зміцнення матеріалів у машинобудуванні : монографія. Київ : НТУУ «КПІ», 2016. 280 с.
5. Грузєвач А. В., Дереча Д. О. Дифузійне зміцнення жароміцних сталей та його вплив на експлуатаційні властивості матеріалів // Металознавство та обробка металів. 2018. № 3. С. 28–34.

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ЛИТТЯ

*Поляков С. С., студ. гр. І-42/Ітт; Дегула А. І., в. о. зав. каф. ПМіТКМ,
Сумський державний університет, м. Суми*

У сучасному машинобудуванні та матеріалознавстві значну роль відіграє комп'ютерне моделювання технологічних процесів лиття. Використання спеціалізованих програмних комплексів дозволяє проводити віртуальне моделювання процесу заповнення форми розплавленим металом, процесів кристалізації, утворення дефектів, а також оптимізувати конструкцію ливничкової системи ще на етапі проектування. Це дозволяє суттєво знизити витрати на експериментальні випробування та підвищити якість відливок [1].

Системи комп'ютерного моделювання лиття базуються на методах чисельного моделювання тепло- та масопереносу, гідродинаміки та фазових перетворень. Вони дозволяють досліджувати процеси заповнення форми, твердіння металу, формування усадочних дефектів, газової пористості та внутрішніх напружень [2].

Серед сучасних інженерних систем варто відзначити ProCAST, MAGMASOFT, AnyCasting які широко використовуються для моделювання різних способів лиття.

ProCAST є одним із найвідоміших програмних продуктів для моделювання процесів лиття, який широко застосовується в авіаційній, автомобільній та машинобудівній промисловості. Даний програмний комплекс використовує метод скінченних елементів, що дозволяє детально моделювати складні фізичні процеси, які відбуваються під час лиття [3].

Система ProCAST дозволяє моделювати процеси заповнення форми розплавленим металом, тверднення відливки, формування мікроструктури та виникнення усадкових дефектів. Програмний пакет також дає можливість враховувати напруження та деформації, що виникають у відливці під час охолодження. Завдяки точному опису геометрії та інтеграції з CAD/CAE системами ProCAST ефективно застосовується для моделювання складних деталей, наприклад корпусів двигунів або турбінних лопаток [3].

MAGMASOFT є одним із найпопулярніших програмних продуктів для моделювання лиття у промисловості. Основною особливістю цієї системи є комплексний підхід до моделювання всього технологічного процесу виробництва відливок, включаючи плавлення, заповнення форми, тверднення та подальшу обробку [4].

Програмний комплекс дозволяє прогнозувати такі дефекти, як усадкові пори, газові включення, мікропористість та інші дефекти лиття. Крім того, система має інструменти оптимізації технологічних параметрів та дозволяє проводити віртуальні експерименти для вибору оптимальної конструкції ливничкової системи. У сучасних версіях програмного комплексу також

реалізовано функції автоматизованої оптимізації процесів виробництва та аналізу економічної ефективності [4].

Перевагою MAGMASOFT є зручний інтерфейс, потужні інструменти оптимізації та можливість комплексного аналізу технологічного процесу.

AnyCasting є відносно новим програмним продуктом, який активно використовується в ливарній промисловості для моделювання різних процесів лиття. Основною метою цієї системи є забезпечення доступного та ефективного інструменту для аналізу процесів заповнення форми, тверднення та утворення дефектів [5].

Програмний комплекс підтримує моделювання різних технологічних процесів, зокрема лиття в піщані форми, лиття під тиском, гравітаційне лиття та відцентрове лиття. Система дозволяє аналізувати розподіл температури, швидкість руху металу у формі та прогнозувати утворення дефектів, таких як газова пористість або холодні тріщини [5].

Основною перевагою AnyCasting є відносно простий інтерфейс та доступність порівняно з іншими системами моделювання. Разом з тим функціональні можливості системи дещо поступаються більш складним програмним комплексам, таким як ProCAST або MAGMASOFT.

Порівняльний аналіз показує, що всі три програмні комплекси мають подібну функціональність, але відрізняються методами моделювання та сферою застосування. Для складних наукових досліджень і високоточного моделювання доцільно використовувати ProCAST або MAGMASOFT, тоді як AnyCasting може бути ефективним рішенням для навчальних цілей.

Список літератури

1. Complete Casting Handbook: Metal Casting Processes, Metallurgy, Techniques and Design / John Campbell. – Oxford: Butterworth-Heinemann, 2015. – 944 p.
2. Doru Michael Stefanescu Science and engineering of casting solidification. 2nd ed. Cham : Springer, 2015. 558 p.
3. Про програмний комплекс ProCAST та його можливості моделювання процесів лиття. ESI Group. ProCAST: casting simulation software [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.esi-group.com/products/casting> (дата звернення: 12.03.2026).
4. Про можливості оптимізації технологічних процесів у системі MAGMASOFT. MAGMA GmbH. MAGMASOFT: casting process simulation [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.magma-soft.de/simulation/en/index.html> (дата звернення: 12.03.2026).
5. Функціональні можливості програмного комплексу AnyCasting для моделювання процесів лиття. AnyCasting Software. Casting simulation software AnyCasting [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.anycastsoftware.com/en> (дата звернення: 12.03.2026).

МІКРОСТРУКТУРНА ОПТИМІЗАЦІЯ МАТЕРІАЛІВ ЕНЕРГОНАКОПИЧЕННЯ

Поліновський В. В., проф. каф. комп'ютерних наук, ТОВ «Приватний вищий навчальний заклад «Університет сучасних технологій», м. Київ

Мікроструктурна оптимізація матеріалів твердотільних батарей спрямована на керування параметрами твердого електроліту та електродних шарів з метою підвищення іонної провідності, стабільності інтерфейсів та циклічної довговічності. Ключовими чинниками є розмір зерна, густина дефектів, міжфазна шорсткість і хімічна стабільність границь розділу, оскільки саме вони визначають іонний транспорт та імпеданс системи. Сучасні оглядові дослідження підтверджують, що інженерія інтерфейсів є критичною умовою для реалізації високопродуктивних твердотільних батарей [1].

Експериментальні результати демонструють, що оптимізація мікроструктури твердих електролітів, зокрема зменшення пористості та контроль фазового складу, суттєво підвищують іонну провідність і знижують міжфазний опір [2].

У високощільних твердотільних архітектурах стабільність літійового анода та електроліту визначається механічною сумісністю та контролем утворення дендритів, що безпосередньо пов'язано з мікроструктурними характеристиками матеріалу [3].

У межах даного підходу мікроструктурна оптимізація розглядається як керований інструмент зменшення деградаційних процесів, стабілізації міжфазних меж і мінімізації внутрішнього опору. При цьому, формування однорідної наноструктури з контрольованою густиною дефектів забезпечує підвищення енергетичної щільності, покращення циклічної стабільності та збільшення ресурсу роботи твердотільних батарей. Отримані узагальнення формують матеріалознавчу основу для створення наступного покоління безпечних і високощільних систем накопичення енергії.

Список літератури

1. Xiao, Y., Wang, Y., Bo, S.-H., et al. (2020). *Understanding interface stability in solid-state batteries*. *Nature Reviews Materials*, 5, 105–126. <https://doi.org/10.1038/s41578-019-0157-5>
2. Severson, K.A., Attia, P.M., Jin, N. et al. Data-driven prediction of battery cycle life before capacity degradation. *Nat Energy* 4, 383–391 (2019). <https://doi.org/10.1038/s41560-019-0356-8>
3. Janek, J., & Zeier, W. G. (2016). *A solid future for battery development*. *Nature Energy*, 1, 16141. <https://doi.org/10.1038/nenergy.2016.141>

МАТЕРІАЛІЗАЦІЯ КВАНТОВИХ МЕХАНІЗМІВ У ТВЕРДОТІЛЬНИХ СЕРЕДОВИЩАХ

Чорний А. В., ректор ТОВ «Приватний вищий навчальний заклад
«Університет сучасних технологій», м. Київ

Практична реалізація квантових механізмів у твердотільних системах обмежується декогеренцією, шумом середовища та матеріальними втратами. Взаємодія з оточенням описується теорією відкритих квантових систем, яка формалізує дисипативну еволюцію та втрату когерентності [1]. У твердотільних архітектурах основними каналами втрат є матеріальні дефекти, інтерфейсні неоднорідності та мікроструктурні флуктуації.

Матеріалізація квантових ефектів забезпечується інженерією енергетичних рівнів, контролем інтерфейсів і зниженням дефектності тонкоплівкових структур. У надпровідних кубітних платформах, зокрема транзмон-архітектурах, чутливість до зарядового шуму зменшується завдяки оптимізації енергетичних співвідношень [2]. Масштабованість таких систем підтверджена демонстраціями багатокубітних процесорів із підтриманням когерентності через матеріальну та архітектурну оптимізацію [3].

У спінових системах і центрах дефектів (NV-центри в алмазі) квантові механізми реалізуються через інженерію дефектного середовища, ізотопну очистку та протоколи динамічного розв'язування. Дані підходи забезпечують високоточне керування квантовими станами в дефектних структурах для сенсорних застосувань [4].

При цьому інтеграція матеріального контролю, шумової інженерії та активної стабілізації підвищує час релаксації й когерентність, знижує рівень помилок та забезпечує довготривалу стабільність надпровідних кубітів.

В цілому, дане дослідження формує основу для масштабованих квантових процесорів, відмовостійких мереж і високочутливих сенсорних платформ, забезпечуючи перехід до інженерно реалізованих архітектур із контрольованими показниками когерентності та стабільності.

Список літератури

1. Xiang, Z.-L., Ashhab, S., You, J. Q., & Nori, F. (2013). *Hybrid quantum circuits: Superconducting circuits interacting with other quantum systems*. *Reviews of Modern Physics*, 85(2), 623–653. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.85.623>
2. Koch, J., Yu, T. M., et al. (2007). *Charge-insensitive qubit design derived from the Cooper pair box*. *Physical Review A*, 76(4), 042319.
3. Arute, F., et al. Quantum supremacy using a programmable superconducting processor. *Nature* 574, 505–510 (2019).
4. Lisenfeld, J., Bilmes, A. & Ustinov, A.V. Enhancing the coherence of superconducting quantum bits with electric fields. *npj Quantum Inf* 9, 8 (2023). <https://doi.org/10.1038/s41534-023-00678-9>

СТРУКТУРНА СТАБІЛІЗАЦІЯ ТВЕРДОТІЛЬНИХ КВАНТОВИХ СИСТЕМ

Фесенко Т. М., доц. каф. комп'ютерних та інформаційних технологій і систем, Національний університет «Полтавська політехніка ім. Ю. Кондратюка», м. Полтава

У дослідженні структурна стабілізація твердотільних квантових систем розглядається як багаторівнева задача забезпечення керованої когерентності в умовах матеріального безладу та зовнішніх флуктуацій з метою мінімізації декогеренції й підвищення стабільності квантових станів. Теоретичною основою є моделі відкритих квантових систем і декогеренції, що описують еволюцію стану під дією шуму та дисипативних процесів [1].

У межах цього підходу основним чинником стабілізації є контроль дефектності, мікроструктурної однорідності та якості міжфазних меж [2]. Так, у надпровідних кубітних архітектурах основними каналами декогеренції виступають дворівневі системи в діелектриках [3], квазічастинки та поверхневі втрати, інтенсивність яких залежить від якості тонкоплівкових структур.

В зазначеному контексті додаткові методи стабілізації включають екранування від іонізуючого випромінювання [4], активний зворотний зв'язок [5] та інженерію дефектного середовища у спінових системах і NV-центрах, що дозволяє подовжувати часи когерентності та підвищувати фідельність операцій [6].

Таким чином, багаторівнева інтеграція матеріального контролю, шумової інженерії та керувальних протоколів забезпечує підвищення часу релаксації та фазової когерентності, а також зниження рівня помилок квантових операцій. Отримані результати створюють передумови для реалізації масштабованих квантових процесорів і сенсорних систем нового покоління.

Список літератури

1. Xiang, Z.-L., Ashhab, S., You, J. Q., & Nori, F. (2013). *Hybrid quantum circuits: Superconducting circuits interacting with other quantum systems*. *Reviews of Modern Physics*, 85(2), 623–653.
2. Arute, F., et al. Quantum supremacy using a programmable superconducting processor. *Nature* 574, 505–510 (2019).
3. Koch, J., Yu, T. M., et al. (2007). *Charge-insensitive qubit design derived from the Cooper pair box*. *Physical Review A*, 76(4), 042319.
4. Vepsäläinen, A. P., et al. (2020). Impact of ionizing radiation on superconducting qubit coherence. *Nature*, 584(7822), 551–556.
5. Vepsäläinen, A., Winik, R., Karamlou, A. H., Braumüller, J., Paolo, A. D., Sung, Y., ... & Oliver, W. D. (2022). Improving qubit coherence using closed-loop feedback. *Nature Communications*, 13(1), 1932.
6. Lisenfeld, J., Bilmes, A. & Ustinov, A.V. Enhancing the coherence of superconducting quantum bits with electric fields. *npj Quantum Inf* 9, 8 (2023).

СИНТЕЗ ТВЕРДОТІЛЬНИХ КВАНТОВИХ НАКОПИЧУВАЛЬНИХ СТРУКТУР

*Живило Є. О., доц. каф. комп'ютерних та інформаційних технологій
і систем, Національний університет «Полтавська політехніка
ім. Ю. Кондратюка», м. Полтава*

Синтез твердотільних квантових накопичувальних структур передбачає формування багатшарових функціональних матеріалів із контрольованими електрофізичними параметрами та стабільними енергетичними станами. Концепція базується на інженерії наноструктур, інтерфейсів і дефектної структури, оскільки саме ці фактори визначають механізми збереження енергії та довготривалу стабільність системи. Сучасні підходи до створення твердотільних енергосистем розглядаються у контексті розвитку solid-state архітектур і квантово-орієнтованих механізмів накопичення енергії [1].

Технологічна реалізація синтезу ґрунтується на методах тонкоплівкового осадження, зокрема PVD, CVD та ALD, які забезпечують точний контроль товщини, складу та структурної однорідності шарів [1, 2]. Застосування цих технологій дозволяє формувати наноструктуровані системи з високою відтворюваністю параметрів і можливістю масштабування виробництва. В цих умовах, інтерфейсна інженерія та контроль дефектів є ключовими чинниками забезпечення стабільності функціональних характеристик матеріалу.

Саме дослідження квантових механізмів збереження енергії в метастабільних станах твердотільних систем формують наукову основу для подальшої інтеграції енергетичних і квантово-інформаційних технологій [1, 2].

Наукова новизна полягає у встановленні зв'язку між технологічними параметрами синтезу, мікроструктурою матеріалу та стабільністю квантових станів твердотільних накопичувальних структур. Запропоновано механізм інтерфейсної інженерії для керованої стабілізації функціональних властивостей. Результати створюють основу для інтеграції таких структур у квантові інформаційні системи та вузли квантової передачі даних, де необхідні стабільні квантові стани й висока структурна когерентність.

Список літератури

1. Chemical vapour deposition (cvd) and physical vapour deposition (pvd) techniques: advances in thin film solar cells. (2024). Nigerian Journal of Technology, 43(3). <https://doi.org/10.4314/njt.v43i3.10>
2. Wang, Y., Wu, H., & Zhao, Q. (2025). *Metastability-induced solid-state quantum batteries for powering microwave quantum electronics*. Physical Review A, 112(3), L030201. <https://doi.org/10.1103/73rk-6cp6>

КОНТРОЛЬОВАНА КРИСТАЛІЗАЦІЯ ФУНКЦІОНАЛЬНИХ КВАНТОВИХ МАТЕРІАЛІВ

*Кучма Ю. В., зав. каф. комп'ютерних наук, ТОВ «Приватний вищий
навчальний заклад «Університет сучасних технологій», м. Київ*

Контрольована кристалізація функціональних квантових матеріалів розглядається як базовий фізико-технологічний механізм формування твердотільних структур із керованими електронними та когерентними властивостями. Сучасні підходи атомарно точного синтезу, зокрема молекулярно-променева епітаксія, забезпечують монолаїсовий контроль складу та інтерфейсної якості і є стандартом для створення високоякісних гетероструктур у квантових технологіях [1]. Так, узагальнення розв'язку методів епітаксійного росту та їх застосування для формування функціональних матеріалів розглянуто в багатьох оглядових роботах.

В теоретичному контексті кристалізація інтерпретується як керований термодинамічний процес, у якому параметри росту визначають енергетичний баланс, густину дефектів та електронну структуру матеріалу. Показано, що режим синтезу безпосередньо впливає на структурну однорідність і якість інтерфейсів у наногетероструктурах, що є критичним для функціонування квантових систем [2]. Необхідно зауважити, що з позицій квантової фізики стабільність станів обмежується процесами декогеренції, які залежать від матеріальних параметрів та механізмів розсіювання [3].

Наукова новизна полягає у системному встановленні зв'язку між параметрами контрольованої кристалізації, мікроструктурними характеристиками та метриками квантової стабільності, включаючи когерентність і шумові процеси. Такий підхід формує узгоджену фізичну основу для інженерії матеріалів із прогнозованими квантовими властивостями та створює передумови для їх інтеграції в компоненти квантових комунікацій, сенсорики та енергофункціональних твердотільних систем.

Список літератури

1. M. B. Panish, *Molecular Beam Epitaxy*. Science 208, 916-922 (1980). DOI:10.1126/science.208.4446.916
2. Peng, J.-P., Guan, J.-Q., Zhang, H.-M., Song, C.-L., Wang, L., He, K., Xue, Q.-K., & Ma, X.-C. (2015). *Molecular beam epitaxy growth and scanning tunneling microscopy study of TiSe₂ ultrathin films*. Physical Review B, 91(12), 121113. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.91.121113>
3. Xiang, Z.-L., Ashhab, S., You, J. Q., & Nori, F. (2013). *Hybrid quantum circuits: Superconducting circuits interacting with other quantum systems*. Reviews of Modern Physics, 85(2), 623–653. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.85.623>

ФОРМУВАННЯ НАНОГЕТЕРОСТРУКТУР ДЛЯ ЕНЕРГОНАКОПИЧЕННЯ

Калашнікова Ю. В., асист. каф. комп'ютерних та інформаційних технологій і систем, Національний університет «Полтавська політехніка ім. Ю. Кондратюка», м. Полтава

В дослідження формування наногетероструктур для енергонакопичення розглядається як матеріально-технологічна основа компонентів квантової інфраструктури зв'язку, зокрема систем квантового розподілу ключів і квантових мереж [1, 2]. Основними вимогами до таких структур є стабільність квантових станів, мінімізація декогеренції та контроль втрат, що визначає можливість масштабування квантових мереж [3]. Тому технологія синтезу орієнтована на формування гетеропереходів із керованою енергетичною діаграмою, контрольованою густиною дефектів і високою якістю міжфазних меж, які визначають когерентність і шумові характеристики матеріалу.

У роботі проаналізовано режими формування наногетероструктур із використанням епітаксійного росту та тонкоплівкового осадження, зокрема MBE і ALD, що забезпечують атомарний контроль товщини та складу шарів [4]. Особливу увагу приділено якості міжфазних меж і структурній однорідності, що визначають стабільність квантових станів.

Наукова новизна полягає у встановленні кількісного взаємозв'язку між технологічними параметрами формування наногетероструктур і метриками їх придатності для квантових комунікацій, включаючи стабільність квантових станів, структурну когерентність, рівень втрат та шумові характеристики. Запропонований підхід формує технологічну основу для створення матеріалів, адаптованих до вимог QKD-систем і масштабованих квантових мереж, де критичними є мінімальні втрати, висока когерентність і відтворюваність параметрів.

Список літератури

1. Gisin, N., Ribordy, G., Tittel, W., & Zbinden, H. (2002). *Quantum cryptography*. *Reviews of Modern Physics*, 74(1), 145–195. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.74.145>
2. Scarani, V., Bechmann-Pasquinucci, H., Cerf, N. J., Dušek, M., Lütkenhaus, N., & Peev, M. (2009). *The security of practical quantum key distribution*. *Reviews of Modern Physics*, 81(3), 1301–1350. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.81.1301>
3. Kimble, H. J. (2008). *The quantum internet*. *Nature*, 453(7198), 1023–1030. <https://doi.org/10.1038/nature07127>
4. Baumann, I. (1994). *Analysis of optically detected compositional inhomogeneities in Czochralski-grown LiNbO₃*. *Journal of Crystal Growth*, 144(3), 193–200. [https://doi.org/10.1016/0022-0248\(94\)90455-3](https://doi.org/10.1016/0022-0248(94)90455-3)

ІНЖЕНЕРІЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ СТАНІВ У ТВЕРДОМУ ТІЛІ

Магалецька В. В., проф. каф. комп'ютерних наук, «ТОВ Приватний вищий навчальний заклад «Університет сучасних технологій», м. Київ

В дослідженні інженерія енергетичних станів у твердому тілі розглядається як міждисциплінарний напрям, спрямований на формування та стабілізацію квантових рівнів у матеріалах із керованою електронною структурою. Теоретичну основу роботи становлять моделі зонної структури, інтерфейсної взаємодії та квантової когерентності, які визначають умови реалізації функціональних станів із заданими енергетичними параметрами. Сучасні підходи до атомарно точного синтезу, зокрема методи молекулярно-променевої епітаксії, забезпечують контроль інтерфейсів і дефектності на нанорівні та є технологічною базою для створення квантових структур нового покоління [1].

Формування енергетичних станів у наноструктурованих системах безпосередньо пов'язане з керуванням декогеренцією та механізмами розсіювання. При цьому теоретичні моделі відкритих квантових систем описують втрату когерентності як наслідок взаємодії з навколишнім середовищем, що визначає часи релаксації та фазової стабільності [2].

Водночас інженерія гетероструктур дозволяє формувати контрольовані потенціальні профілі та локалізовані стани, що забезпечують стабілізацію енергетичних рівнів і мінімізацію шумових процесів [3].

У межах даного підходу енергетичні стани розглядаються як керовані параметри матеріальної системи, що визначаються структурною однорідністю, якістю міжфазних меж та густиною дефектів. Оптимізація цих характеристик створює умови для підвищення когерентності, зменшення втрат і реалізації функціональних квантових режимів у твердотільних структурах. Отримані теоретичні положення формують основу для розроблення матеріалів із прогнозованими енергетичними характеристиками, придатних для застосування в квантових комунікаціях, сенсорних системах та перспективних енергофункціональних технологіях.

Список літератури

1. M. B. Panish, *Molecular Beam Epitaxy*. Science 208, 916-922 (1980). DOI:10.1126/science.208.4446.916
2. Xiang, Z.-L., Ashhab, S., You, J. Q., & Nori, F. (2013). *Hybrid quantum circuits: Superconducting circuits interacting with other quantum systems*. *Reviews of Modern Physics*, 85(2), 623–653. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.85.623>
3. Peng, J.-P., Guan, J.-Q., Zhang, H.-M., Song, C.-L., Wang, L., He, K., Xue, Q.-K., & Ma, X.-C. (2015). *Molecular beam epitaxy growth and scanning tunneling microscopy study of TiSe₂ ultrathin films*. *Physical Review B*, 91(12), 121113. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.91.121113>

ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ ПРЕС-ФОРМИ ДЛЯ ЛИТТЯ ПІД ТИСКОМ (ІНЖЕКЦІЙНОГО ФОРМУВАННЯ)

*Гахов Н. А., студ. гр. І-22/2мт; Дегула А. І., в. о. зав. каф. ПМіТКМ,
Сумський державний університет, м. Суми*

Лиття під тиском є одним із найпоширеніших методів виготовлення виробів із полімерних матеріалів, що забезпечує високу продуктивність, точність і повторюваність геометричних параметрів деталей. Основним елементом технологічного оснащення даного процесу є прес-форма, від надійності якої значною мірою залежить якість продукції, економічна ефективність виробництва та ресурс обладнання.

Надійність прес-форми визначається її здатністю зберігати працездатність протягом заданого терміну експлуатації при дії циклічних механічних, термічних і корозійних навантажень. Основними причинами виходу прес-форм з ладу є зношування робочих поверхонь, термічні тріщини, корозія, деформації та поломки елементів конструкції [1].

Одним із ключових напрямів підвищення надійності прес-форм є оптимізація матеріалів та їх термічної обробки. Для виготовлення формують елементів широко застосовуються леговані інструментальні сталі, які забезпечують необхідну твердість, міцність та теплостійкість. Застосування сучасних методів зміцнення, таких як хіміко-термічна обробка (борування, азотування) та нанесення зносостійких покриттів, дозволяє суттєво підвищити ресурс роботи прес-форми. Зокрема, використання боридних шарів забезпечує значне підвищення зносостійкості та експлуатаційних характеристик поверхонь [2].

Ефективним способом підвищення довговічності є нанесення плазмових покриттів на основі нітридів металів. Дослідження показують, що такі покриття здатні підвищити корозійну стійкість у кілька разів і забезпечити збільшення ресурсу прес-форми приблизно на 20 % . Крім того, формування залишкових стискуючих напружень у поверхневому шарі сприяє підвищенню опору утворенню тріщин [3].

Не менш важливим фактором є конструктивна досконалість прес-форми. Рациональне проектування литникової системи, системи охолодження та виштовхування забезпечує рівномірне заповнення форми, зменшення внутрішніх напружень і дефектів виробів. Оптимізація каналів подачі розплаву дозволяє зменшити пористість і підвищити вихід придатної продукції . Також значну роль відіграє правильний вибір напрямних елементів і забезпечення точності їх виготовлення.

Система охолодження прес-форми має критичний вплив на її надійність. Нерівномірне охолодження призводить до термічних напружень, деформацій та утворення тріщин. Використання оптимізованих каналів охолодження, у тому числі конформних (виготовлених за допомогою адитивних технологій),

дозволяє знизити температурні градієнти та підвищити довговічність форми [4].

Важливим аспектом є також удосконалення системи виштовхування виробів. Нерівномірне навантаження на штовхачі може призводити до їхнього передчасного зношування або поломки. Дослідження показують, що модернізація вузлів прес-форми, зокрема системи виштовхування, дозволяє підвищити ефективність роботи обладнання та його надійність.

Сучасні підходи до підвищення надійності прес-форм включають застосування комп'ютерного моделювання процесу лиття. Використання методів скінченно-елементного аналізу дає змогу прогнозувати напружено-деформований стан, температурні поля та можливі дефекти ще на стадії проектування. Це дозволяє зменшити кількість експериментальних випробувань і підвищити якість конструкції [5].

Крім того, важливим є дотримання умов експлуатації та технічного обслуговування прес-форм. Регулярна очистка, контроль стану робочих поверхонь, своєчасна заміна зношених елементів і застосування мастильних матеріалів дозволяють значно продовжити термін служби інструменту [6].

Таким чином, підвищення надійності прес-форм для лиття під тиском є складною багатофакторною задачею, що потребує системного підходу на всіх етапах життєвого циклу інструменту — від проектування до експлуатації та технічного обслуговування. Вона включає не лише обґрунтований вибір матеріалів із необхідним комплексом механічних і термофізичних властивостей, але й застосування сучасних методів їх зміцнення, зокрема хіміко-термічної обробки, іонно-плазмового насичення та нанесення функціональних покриттів. Важливу роль відіграє також оптимізація конструкції прес-форми, яка передбачає раціональне проектування литникової системи, каналів охолодження, напрямних елементів і системи виштовхування з урахуванням рівномірності навантажень і мінімізації концентрації напружень.

Список літератури

1. Яранов М. Підвищення стійкості прес-форм лиття під тиском : дипломна робота. Харків : ХНАДУ, 2021. 84 с.
2. Костик К. О. Підвищення зносостійкості деталей прес-форм лиття під тиском методом борування з нанопаст. Вісник НТУ «ХПІ». 2013. № 70.
3. Костик К. О. Зміцнення прес-форм лиття під тиском по нанотехнології. Машинобудування. 2013. № 12.
4. Дудка В. А. Машина для лиття під тиском з модернізацією прес-форми : магістерська дисертація. Київ : КПІ ім. І. Сікорського, 2019. 103 с.
5. Синиця А. О. Машина для лиття під тиском з модернізацією прес-форми : бакалаврська робота. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023.
6. Kreitser K., Kozishkurt Ye. Optimization of die casting parameters considering process dynamics. Вісник ПДТУ. 2025

ВПЛИВ ТЕХНОЛОГІЧНИХ УМОВ ОТРИМАННЯ НА СТРУКТУРУ ТА ВЛАСТИВОСТІ ПОКРИТТІВ НА ОСНОВІ ZrN

*Пахненко Д. В, аспірантка; Говорун Т. П., доц. каф. ПМіТКМ,
Сумський державний університет, м. Суми*

Магнетронне розпилення, розпилення іонним пучком і електродугове випаровування характеризуються спрямованістю потоку частинок, що формують покриття, та нерівноважними умовами процесу. Залежно від параметрів проведення осадження це може призводити до формування покриттів з різними структурними особливостями [1].

Покриття на основі нітриду цирконію (ZrN) характеризуються високою твердістю, зносостійкістю, корозійною стійкістю та термічною стабільністю. Завдяки цим властивостям вони широко застосовуються для зміцнення поверхні різального інструменту, деталей машин, а також у різних галузях промисловості, де необхідно підвищити довговічність та надійність виробів [2].

Властивості покриттів ZrN значною мірою залежать від умов їх формування, зокрема від технологічних параметрів процесу осадження, складу газової суміші, температури та інших факторів. Зміна цих параметрів впливає на структуру, морфологію та механічні характеристики покриттів. Методику формування та особливості процесу отримання покриттів на основі ZrN було наведено у роботі [3].

Для вивчення умов збереження росту зерен у напрямку переважної кристалографічної орієнтації визначали температуру поверхні конденсації в процесі осадження. Встановлено, що температура поверхні конденсації зі збільшенням тривалості процесу осадження покриттів при всіх співвідношеннях газів не тільки підтримується сталою, але й незначно підвищується – приблизно на 45 К. Тому можна стверджувати, що рухливість атомів на поверхні достатня для забезпечення збереження переважної орієнтації зерен у процесі формування покриття та ступеня її текстурованості. Мікротвердість композиції покриття–підкладка за створених технологічних умов більшою мірою залежить від вмісту азоту в газовій суміші (рис. 1).

Товщина покриття є найбільшою при подачі 30% N₂. Можна зробити висновок, що покриття формуватимуться в напрямку (111) при співвідношенні газів N₂/Ar = 40/60% і в напрямку (002) – при N₂/Ar = 50/50% з найменшою енергією у випадку, якщо визначальним фактором процесу їх формування є поверхнева енергія.

Результати рентгенофазового аналізу показали, що отримані покриття складаються з двох фаз: кубічної фази ZrN (тип ґратки NaCl, параметр $a = 0,463$ нм); гексагональної фази ZrN_{0,28} (тип Mg, параметри $a = 0,322$ нм, $c = 0,518$ нм). Встановлено, що зміна співвідношення азоту та аргону в газовій суміші не змінює фазовий склад покриття.

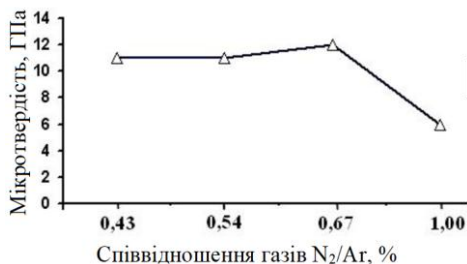


Рисунок 1 – Залежність мікротвердості композиції покриття–підкладка від співвідношення газів N₂/Ar в газовій суміші, %:
30/70 = 0,43; 35/65 = 0,54; 40/60 = 0,67; 50/50 = 1,0

Порівняння інтенсивностей дифракційних максимумів показало, що при співвідношенні газів N₂/Ar = 40/60% утворюється покриття з найбільшою кількістю стехіометричної кубічної фази ZrN, максимальною часткою зерен, орієнтованих у напрямку (111), та мінімальним вмістом гексагональної фази ZrN_{0,28} та найбільшою мікротвердістю порядку 12 ГПа.

Процес формування покриттів ZrN характеризується значною анізотропією у різних напрямках. Це призводить до неоднорідності умов росту на різних ділянках поверхні та утворення різних типів структур: при вмісті азоту 30 і 35% у газовій суміші формуються дендритні та фрактальні структури; при 40% азоту утворюються волокнисті (стовбчасті) та полікристалічні структури. Найменша нерівномірність умов росту спостерігається саме при 40% концентрації азоту, коли фіксується мінімальна анізотропія швидкості формування у різних напрямках. Таким чином, 40% азоту в газовій суміші є оптимальним режимом для отримання рівномірних, стабільних покриттів ZrN з найкращими експлуатаційними властивостями.

Список літератури

1. Dohm J. C., Schmidt S., Puente Reyna A. L., Richter B., Santana A., Grupp T. M. Comparative study of zirconium nitride multilayer coatings: crystallinity, in vitro oxidation behaviour and tribological properties deposited via sputtering and arc deposition // *Journal of Functional Biomaterials*. 2024. Vol. 15, № 8. Article 223. <https://doi.org/10.3390/jfb15080223>.
2. Romaniuk S. P., Volchuk V. M., Taran A. V., Nowakowska-Langier K., Byrka O. V. Characterization of ARC-PVD ZrN nanostructured coatings by using the fractals theory // *Problems of Atomic Science and Technology*. 2022. № 6(142). P. 123–128. <https://doi.org/10.46813/2022-142-123>.
3. Пахненко Д. В., Ханюков К. С., Варакін В. О., Говорун Т. П. Процеси структуроутворення покриттів на основі ZrN в умовах магнетронного розпилення. Сучасні технології у промисловому виробництві : матеріали XII Всеукраїнської науково-технічної конференції (м. Суми, 22–25 квітня 2025 р.): тези доповідей. Сумський державний університет, 2025. С. 63–64.

ДОСЛІДЖЕННЯ ПОШКОДЖУВАНOSTI ПОВЕРХНІ КОЧЕННЯ ЗАЛІЗНИЧНИХ КОЛІС

*Ворона А. С., студ. гр. І-32/Імт; Щербак В. П., студ. гр. МТ-41-5;
Говорун Т. П., доц. каф. ПМіТКМ, Сумський державний університет, м. Суми*

На сучасному етапі інтенсивний розвиток техніки неможливо уявити без постійного зростання вимог до металів і сплавів, що застосовуються для виготовлення конструкційних елементів, які працюють в умовах складних температурно-силових навантажень. Одним із таких елементів є залізничне колесо, яке під час експлуатації зазнає дії змінних навантажень, температурних коливань та впливу навколишнього середовища.

Колісна пара належить до найвідповідальніших вузлів ходової частини рухомого складу, а її надійність безпосередньо визначає рівень безпеки руху. Основною причиною передчасного виходу з ладу залізничних коліс є пошкодження поверхні кочення – повзуни, вищербини та контактне викришування, що виникають унаслідок накопичення структурних дефектів у металі. Аналіз численних випадків пошкоджень свідчить, що головною причиною руйнування металу є розвиток структурних перетворень, зумовлених накопиченням дефектів у процесі експлуатації.

Вивчення механізмів мікроструктурних змін у металі колеса залежно від умов навантаження дозволяє визначити причини виникнення пошкоджень, розробити рекомендації щодо зниження їх негативних впливів і заходи для попередження.

Проведено аналіз хімічного складу сталей, внутрішньої будови металу, макро- та мікроструктури, а також визначено механічні властивості матеріалу. Встановлено, що перевищення граничної концентрації вуглецю в сталі 60 прискорює зародження поверхневих пошкоджень. Безперервне накопичення дефектів кристалічної будови внаслідок циклічної взаємодії колеса з рейкою є головною умовою формування вищербин і повзунів. Збільшення вмісту вуглецю в сталі залізничних коліс сприяє зростанню кількості повзунів, ділянки яких надалі перетворюються в вищербини. Показано, що зниження температури навколишнього середовища збільшує ймовірність пошкодження поверхні кочення внаслідок зміни механізму пластичної деформації при наклепі металу.

На основі отриманих результатів сформульовано рекомендації щодо усунення причин браку залізничних коліс: оптимізація хімічного складу сталі, режимів термообробки та наплавлення при відновленні, застосування високочастотного індукційного нагріву для генерування теплової енергії безпосередньо в нагрівавемому виробі, що забезпечує високу швидкість нагріву до температур, при яких відбуваються структурні перетворення в металі. Реалізація запропонованих заходів забезпечує підвищення надійності та довговічності колісних пар рухомого складу.

ЗМІЦНЕННЯ КЛАПАННИХ ПЛАСТИН ПОРШНЕВИХ КОМПРЕСОРИВ МЕТОДОМ НИЗЬКОТЕМПЕРАТУРНОЇ НІТРОЦЕМЕНТАЦІЇ

Середа Б. Р., студ. гр. І-22/2мт; Звоник Д. М., студ. гр. МТ.м-51; Говорун Т. П., доц. каф. ПМіТКМ, Сумський державний університет, м. Суми

Прямоточні клапани виконують функцію запірною елемента в газовому тракті циліндра поршневого компресора. Вони забезпечують регулювання процесів всмоктування та нагнітання повітря або газу в поршневих компресорах, що експлуатуються в неагресивних середовищах при швидкості обертання колінчастого вала, яка не перевищує 1000 об/хв. Корпуси клапанів виготовляються залежно від умов експлуатації із латуні, алюмінію або сталі. Пластини виготовляють з високоякісної пружинної або нержавіючої сталі [1].

Забезпечення функціональної надійності прямоточних клапанів є однією з найбільш актуальних проблем експлуатації поршневих компресорів. Пружні елементи (пластини) клапанів працюють в умовах інтенсивних циклічних знакозмінних навантажень та агресивних газових середовищ при температурах до 200 °С. Для виготовлення таких деталей зазвичай використовується дорога нержавіюча сталь 09Х15Н8Ю, проте перспективною є її заміна на пружинну сталь 60С2ХА за умови застосування ефективних технологій поверхневого зміцнення для підвищення втомної міцності.

Для зміцнення тонких клапанних пластин (товщиною до 0,4 мм) використано метод низькотемпературної нітроцементатації в пастах. Застосовувався пастоподібний карбюризатор на основі карбаміду (20–25%), заліzosинеродистого калію (20–25%) та сажі (55%), а також декстриновий клей, як рідкий компонент для отримання пастоподібної консистенції. Всі компоненти нетоксичні і недорогі. Процес дифузійного насичення проводили в діапазоні температур 550–650 °С з тривалістю від 1 до 5 годин.

Встановлено, що в результаті обробки на поверхні сталі утворюються тонкі дифузійні шари товщиною 20–40 мкм. Структура шару складається з карбонітридної кірки та зони азотистого мартенситу із залишковим аустенітом, що забезпечує високу твердість та формування сприятливих залишкових напруг стиску (рис. 1). Загальна глибина нітроцементованого шару, як і товщина карбонітридної зони на поверхні сталі 60С2ХА на початку процесу насичення зростає дуже інтенсивно, але в міру збільшення тривалості насичення інтенсивність росту дифузійних шарів помітно знижується. У структурі нітроцементованого шару у мартенситно-аустенітній зоні пружинної сталі 60С2ХА присутні численні дисперсні частинки у вигляді окремих карбонітридних включень. Ці частинки можуть виникнути лише при досить високому вмісті азоту у дифузійному шарі. Тому дифузія вуглецю через карбонітридний шар легша, ніж для легованої сталі.

Аналіз результатів випробувань показав, що оптимальним режимом для сталі 60С2ХА є температура 550 °С при тривалості 3 години [2]. Це дозволяє

підвищити межу втомної міцності до 1,3 раза порівняно з необробленим станом. Подальше підвищення температури до 650 °С спричиняє коагуляцію фаз і зниження втомних характеристик навіть нижче початкового рівня.

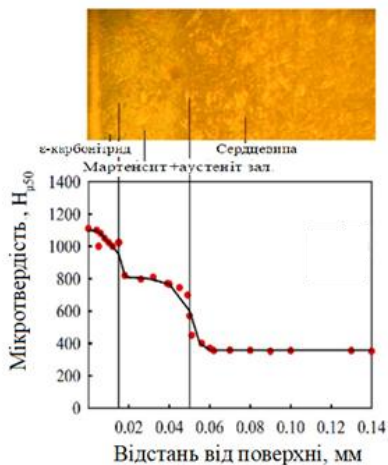


Рисунок 1 – Структура і твердість сталі 60C2XA після нітроцементзації за температури 550 °С і тривалості 3 години

Виробничі випробування нітроцементованих пластин у складі прямоточних клапанів компресора 5Г-100/8 підтвердили їх високу ефективність. Встановлено, що герметичність арматури підвищується на 29–54%, а розрахунковий ресурс роботи нітроцементованих клапанів зростає у 5,7 рази відносно деталей без хіміко-термічної обробки. Причому через 4000 годин клапани із пластинами без застосування нітроцементзації стають непрацездатними. Проте нітроцементовані клапани залишаються ефективними при роботі, тобто через 6000 годин використання втрати герметичності становлять лише 22–35%. Запропонована технологія є економічно вигідною та екологічно безпечною для впровадження у машинобудуванні.

Список літератури

1. Krmela J., Novorun T., Berladir K. et al. Influence of nitrocarburizing on increasing the service life of elastic elements of direct flow valves. *Manuf. Technol.* 2021. Vol. 21. P. 647–656.

2. Харченко Н. А., Говорун Т. П., Берладір Х. В., Лоскутова Т. В., Іванов В. О., Пахненко Д. В., Назаренко І. В., Піменов М. О., Серeda Б. Р., Лопарєв Д. О. Спосіб зміцнення сталі 60C2XA. Пат. 160594 Україна: МПКС23С 12/00; С23С 12/02. №и 2025 01955; заявл. 2025-04-29; опубл. 2025-09-17, Бюл. № 38.

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ МАСОПЕРЕНОСУ ТА ДИФУЗІЇ ВУГЛЕЦЮ У ПРОЦЕСІ ЦЕМЕНТАЦІЇ МЕТАЛЕВИХ ВИРОБІВ

*Білоус О. А., доц. каф. МАіМО; Говорун Т. П., доц. каф. ПМіТКМ;
Кульбачний В. М., студ. гр. І-32/Ітт; Дудка О. М., студ. гр. І-32/Ітт-4,
Сумський державний університет, м. Суми*

Прискорення процесу цементациі металевих виробів досягається шляхом підвищення температури та вуглецевого потенціалу. Формування параметрів технологічного процесу ускладнює визначення тривалості насичення та дифузії матеріалу, необхідних для отримання оптимального вмісту вуглецю на поверхні деталей. Важливим завданням є також встановлення закономірностей розподілу вуглецю від поверхні обробленої деталі за глибиною дифузійного шару.

Дифузійні процеси прийнято описувати першим (для стаціонарної дифузії, при постійному показнику концентрації) та другим (для дифузії, параметри якої змінюються з часом) законами Фіка [1]:

$$\partial c(x, \tau) / \partial \tau = \frac{\partial}{\partial x} (D \partial C / \partial x), \quad (1)$$

де D – коеф. дифузії; $\partial C / \partial x$ – швидкість зміни концентрації вуглецю; τ – час.

Рівняння (1) належить до параболічного типу, для розв'язання якого встановлені початкові та граничні умови, що задовольняють показникам концентрації дифузійного елемента [2]. Перенесення вуглецю з газової фази до поверхні враховується граничною умовою третього роду, а в глибині деталі приймаються адіабатичні умови другого роду.

Математична модель процесу дифузії сформована за результатами рішенням рівняння (1) із відповідними граничними умовами для напівобмеженого тіла. Одержана математична залежність описує розподіл вуглецю в цементованому шарі на різних етапах процесу насичення вуглецем. Вона дозволяє розрахувати необхідний час цементациі при заданих параметрах дифузії та масоперееносу вуглецю.

Список літератури

1. Tkadlečková M., Numerical Modelling in Steel Metallurgy / M. Tkadlečková // *Metals.*, Vol. 11, No. 6., P. 885-891 (2021). <https://doi.org/10.3390/met11060885>.
2. Bobyr S.V., Krot P.V. Nonequilibrium Thermodynamic Analysis of Diffusion Processes in the Steel - Carbon // *Thin Film Tribological System. Material Science & Engineering International Journal*, 6 (1), 14 (2022); <http://doi.org/10.15406/mseij.2022.06.00174>.

НОВІ МОДИФІКОВАНІ ГРУНТОВОЧНІ ПОКРИТТЯ ВУГЛЕЦЕВИМИ НАНОТРУБКАМИ

Маренок С. М., аспірант, Сумський державний університет, м. Суми

Однією із основних причин руйнування металевих виробів є корозія. Захисні органічні покриття є найбільш поширеним підходом до захисту металевих конструкцій від впливу корозії, оскільки вони найбільш доступні та прості у нанесенні. Основний принцип захисту металевих поверхонь органічними покриттями полягає в створенні фізичного бар'єру, що відокремлює поверхню металу від корозійного середовища. Однак органічні покриття не можуть забезпечити довготривалий захист через недостатню міцність, щільність, стійкість до ультрафіолетового випромінювання та пасивність захисту [1].

Для поліпшення властивостей та корозійної стійкості органічних покриттів, таких як фарби, перспективним напрямом розвитку є модифікування їх вуглецевими нанотрубками.

Вуглецеві нанотрубки (ВНТ) – циліндричні структури діаметром від одного до декількох десятків нанометрів, що складаються з однієї або декількох згорнутих в трубку гексагональних графітових площин (графенів). ВНТ мають унікальні механічні властивості: міцність та гнучкість (у 10–12 разів міцніші й у 6 разів легші за сталь) [2]. Отже завдяки унікальним фізико-механічним властивостям, ВНТ є перспективним матеріалом у нанотехнологіях для створення нових композиційних матеріалів.

Досліди з лакофарбовими покриттями [3] показують, що додавання вуглецевих нанотрубок у алкідні фарби, у концентрації від 0,01% до 2% за масою, дозволяє досягти позитивних результатів по підвищенню наступних показників:

- зносостійкості на 25–40%;
- твердості на 15–20%, завдяки армуванню полімерної матриці;
- адгезії, що мінімізує ризик відшарування покриття;
- термостійкості (початкова температура деструкції алкідної плівки зміщується вгору на 10–15°C).

При цьому додавання ВНТ у фарби впливає на колір покриття, змінюючи відтінки та естетичний вигляд, що є недоліком.

Алкідні системи покриття складаються з ґрунту, фарби та лаку. При використанні модифікованих ВНТ алкідних ґрунтів з наступним нанесенням звичайних емалей дозволить отримати поліпшене захисне покриття без втрати забарвлення декоративного шару. При цьому модифікований ґрунтовий шар забезпечує покращені властивості захисного покриття.

При використанні у якості бази для модифікації ВНТ найбільш поширеної на ринку універсальної та недороговартисної гліфталевої ґрунтовки ГФ-021, у

перспективі можливо отримати ґрунтові покриття з покращеними властивостями при збереженні низької ціни та доступності базової сировини.

Додавання ВНТ до ґрунтовки ГФ-021 кардинально змінює принцип її роботи, перетворюючи звичайне ізоляційне покриття на систему активного захисту, за рахунок високої електропровідності нанотрубок. При досягненні порогу перколяції вони створюють всередині шару ґрунту безперервну тривимірну провідну мережу. Ефект захисту може бути обумовлений можливістю створення різниці електродних потенціалів між поверхнею металу, електропровідною ґрунтовкою та пасивацією, що зменшує рушійну силу електрохімічних процесів корозії.

Окрім того, вміст ВНТ у ґрунті сприяє покращенню механічних властивостей та очікуванню підвищеної адгезії шарів системи поверхня – ґрунт – емаль.

Для створення модифікованого ґрунтового покриття необхідно вирішити завдання по визначенню потрібної концентрації, способу введення, деагломерації та рівномірного розподілу ВНТ у ґрунті. Проведення дослідної роботи для отримання нанонаповненої ґрунтовки ГФ-021 дозволить визначити оптимальну концентрацію вмісту ВНТ, що відповідатиме забезпеченню необхідних властивостей при мінімальній вартості.

Список літератури

1. Sepideh Pourhashem, Farhad Saba, Jizhou Duan, Alimorad Rashidi, Fang Guan, Elham Garmroudi Nezhad, Baorong Hou Polymer/Inorganic nanocomposite coatings with superior corrosion protection performance. Journal of Industrial and Engineering Chemistry – Elsevier, 25 August 2020, <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2020.04.029>

2. Dresselhaus M. S., Dresselhaus G., Eklund P. C. Science of Fullerenes and Carbon Nanotubes: Their Properties and Applications. — New York: Academic Press, 1996. – 985 p.

3. Методи захисту обладнання від корозії та захист на стадії проектування [Електронний ресурс]: підр. для студ. спеціальності 161 «Хімічні технології», спеціалізації «Електрохімічні технології неорганічних та органічних матеріалів» / М. В. Бик, О. І. Букет, Г. С. Васильєв – Електронні текстові дані (1 файл: 8,81 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. – 318 с.

Роботу виконано за наукового керівництва доц. Марченка С. В.

ТЕХНОЛОГІЯ ВИГОТОВЛЕННЯ БУДІВЕЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ НА ОСНОВІ ПРОМИСЛОВИХ ВІДХОДІВ (НА ПРИКЛАДІ ГЕОПОЛІМЕРБЕТОНУ)

*Кузнєцов В. А., студ. гр. 6.1922-ПЦБ; Мішук К. М., доц. каф. ПЦБ,
Інженерний навчально-науковий інститут ім. Ю. М. Потебні,
Запорізький національний університет, м. Запоріжжя*

За даними Держстату, за 2020 рік в Україні було утворено понад 462,4 млн тон відходів (85% – добувна промисловість, 11% – переробна промисловість, 1,3% – побутові відходи, решта – відходи інших джерел) [1]. З огляду цього, досить актуальним явищем у розвитку будівельного матеріалознавства, станом на сьогодні, є виробництво будівельних матеріалів на основі вторинної сировини (промислових відходів), що пов'язано як зі значним споживанням будівельною індустрією первинних ресурсів, так необхідністю вирішення екологічного питання, в контексті переробки утворених відходів (як під час промислових процесів, так і за час руйнування об'єктів інфраструктури через проведення воєнних дій).

З огляду на розвиток будівництва, найбільш споживаним матеріалом залишається бетон, виробництво якого є причиною екологічних проблем (понад 8–10% світових антропогенних викидів CO₂) та зміни клімату [2] (з урахуванням цементної промисловості). Для вирішення питання екологічності, досить перспективним будівельним матеріалом, що виготовлений з використанням промислових відходів є геополімербетон, що являє собою композиційний матеріал, який утворюється в результаті процесу геополімеризації, який включає хімічну активацію промислових відходів, багатих на алюмосилікати (червоний шлам, зола-винесення, металургійний (гранульований доменний/мелений гранульований доменний) шлак, метакаолін, кальциновані глини та/або вулканічний попіл), лужними розчинами (NaOH та KOH) [3] для утворення міцного та стійкого в'язучого матеріалу. За деякими підрахунками, застосування геополімербетону, як альтернативи традиційному бетону, скорочує викиди CO₂ до 80% [2]. За деякими дослідженнями, геополімербетон на основі золи-винесення був виготовлений на 30% економічно ефективніше, ніж звичайний цементобетон, при цьому міцність на стиск досягла 62 МПа, тоді як традиційний бетон показав до 21 МПа. Крім того, у випадку втленої енергії геополімеру, його синтез на основі золи-винесення показав на 40% меншу потребу в енергії, порівняно з традиційним бетоном [3].

Технологія виробництва геополімербетону на основі промислових відходів складається з таких ключових етапів [4]: підготовка сировини (промислових відходів), зокрема, проведення процесів сушіння, просювання, подрібнення матеріалів, оскільки, відповідно до досліджень, властивості геополімербетону значною мірою залежать як від використаного типу відходів, так і від їх фракції; формування геополімерної суміші (реакція

геополімеризації), що являє собою контроль за температурою твердіння, концентрацією лужного активатора, вмістом використаних відходів та іншими показниками й змішування компонентів та формування відповідних зразків, при цьому важливо ретельно ставитися до кожного процесу, оскільки від цього буде залежати як структура матеріалу, так і його загальні властивості; формування структури геополімербетону як на молекулярному рівні, так і на макрорівні (правильність виконання процесів та дотримання відповідних умов забезпечить низькі показники пористості й високі показники міцності та довговічності тощо).

Загалом, якщо оглядово проаналізувати переваги використання геополімербетону, враховуючи його недоліки (нерозвинена нормативна база під такий матеріал, точний та обґрунтований вплив відходів на властивості матеріалу, потреба в більш масштабних експериментах та дослідженнях), можна виділити наступне [3]: високі показники міцності та довговічності у порівнянні з традиційним бетоном; підвищена стійкість до впливу агресивного середовища; економічна ефективність, за рахунок скорочення закупівлі первинних ресурсів для виробництва; зменшення кількості відходів та скорочення викидів парникових газів (особливо вуглекислого газу); зменшення кількості використаних природних ресурсів та раціоналізація їх застосування.

Підсумовуючи, варто зазначити, що дослідження, розвиток та впровадження технології виготовлення будівельних матеріалів на основі промислових відходів, на прикладі геополімербетону, є одним із найбільш перспективних напрямків сучасного будівельного матеріалознавства. Зокрема, сучасні дослідження підтверджують можливість створення високоміцних, довговічних і енергоефективних матеріалів, що робить геополімербетон перспективним для сучасного будівництва та післявоєнного відновлення інфраструктури, з урахуванням сталих та екологічних тенденцій.

Список літератури

1. Проект національного плану управління відходами України до 2033 року. URL: <https://share.google/heU6ESglQV1RNwbMZ>
2. Mohammed T. O., Haq A. U., Harun M., Fanijo E. O. Recent Advances in Fly Ash- and Slag-Based Geopolymer Cements. *Sustainability*. 2025. Vol.17 № 24. 11167. URL: <https://doi.org/10.3390/su172411167>
3. Azad N. M., Samarakoon S. M. S. M. K. Utilization of Industrial By-Products/Waste to Manufacture Geopolymer Cement/Concrete. *Sustainability*. 2021. Vol. 13, № 2. P. 873. URL: <https://doi.org/10.3390/su13020873>
4. Ansari G. A., Kumar S. S. Geopolymerization of fly ash and GGBS for sustainable industrial waste utilization. *Scientific Reports*. 2025. Vol. 15, № 1. URL: <https://doi.org/10.1038/s41598-025-16574-5>

УСПІШНИЙ ДОСВІД МОДИФІКУВАННЯ ПОВЕРХНІ МЕТОДОМ ЕПІЛАМУВАННЯ

*Сазонов О. В., аспірант; Дощечкіна І. В., проф. каф. ТМiМ,
Харківський національний автомобільно-дорожній університет, м. Харків*

Стан поверхні є одним із головних і найважливіших факторів, що обумовлює ресурс елементів машин та інших конструкцій, особливо відповідального призначення, розрахованих на довготривалу експлуатацію.

Як відомо, стан поверхні суттєво впливає на опір втомному руйнуванню, що, згідно зі статистикою, призводить до понад 80% відмов деталей машин через руйнування внаслідок розвитку процесів втоми. З метою підвищення втомної міцності широко застосовуються сучасні досить ефективні методи обробки поверхневого шару, які кардинально змінюють його структурно-напружений стан та мікрогеометрію. До них належать ультразвукова ударна обробка, лазерні та широко розповсюджені іонно-плазмові технології. Однак кожний із цих методів поверхневого впливу має своє призначення для зміни певної спеціальної властивості поверхневого шару і не є універсальним для різних умов експлуатації (вид діючих напружень, величина і характер навантажень, зношування, корозійне середовище). Крім того, не кожне виробництво має для цього спеціальне, іноді дороге та енерговитратне устаткування, і не любий габаритний виріб зі складними геометричними параметрами можна обробити за цими технологіями.

До сучасних та ефективних нанотехнологій обробки поверхневого шару належить метод епіламування (ЕП), що останнім часом займає впевнені позиції в різних галузях промисловості і набуває все зростаючого використання для підвищення важливих експлуатаційних властивостей – втомної міцності [1], трибологічних характеристик [2], корозійної стійкості [3] для виробів різного призначення.

У загальному випадку це нанесення на поверхню виробу розчинів фторвмісних поверхневоактивних речовин (фторПАР) у різних легколетючих хладонах. Після випаровування хладонів на поверхнях утворюються нанорозмірна (товщиною 30–50 нм) молекулярна плівка з так званою структурою Ленгмюра–Блоджет, яка являє собою щільний шар молекул фторПАР, які перпендикулярно орієнтовані до поверхні і силами хемосорбції міцно пов'язані з металевою підкладкою. Особливістю фторПАР є дуже низький поверхневий натяг, завдяки чому рідкий розчин епіламу легко затікає і заповнює усі поверхневі дефекти, очищуючи їх від вологи та газів, наслідком чого є майже повна ліквідація потенційних концентраторів локальних напружень, що позначиться на підвищенні довговічності та зменшення ймовірності руйнування виробів. Нанесення плівки епіламу не змінює структуру поверхні і практично незмінними залишаються геометричні розміри оброблюваних деталей.

В дослідженнях нами використаний епілам марки СФК-05. ЕП здійснювали за простою технологією – шляхом занурення на 10 хвилин у рідку ванну епіламу з температурою 50–55 °С. Осаджену плівку термофіксували при температурі 90 °С протягом 20 хвилин. Оброблювали як шліфовані, так і поліровані поверхні і фіксували суттєве згладжування рельєфу. Наш досвід з використанням однієї марки епіламу за однаковою технологією обробки поверхні виробів зі сталей різних класів (09Г2, 40Х, 65Г) і у різному вихідному стані свідчить про унікальні можливості цієї нанотехнології модифікування поверхні – одночасне збільшення втомної міцності і циклічної довговічності, зменшення інтенсивності зношування, що також має втомну природу. Ефект «заліковування» поверхневих дефектів, дуже суттєве зменшення шорсткості поверхні забезпечили підвищення циклічної довговічності в 4,0–4,5 рази в залежності від навантаження. Суттєве підвищення зносостійкості епіламованих поверхонь під дією абразивного середовища пояснюється наявністю між поверхнями тертя розділового бар'єрного шару дуже тонкої молекулярної плівки із низькою поверхневою енергією, наявність якої зменшує адгезію контактуючих матеріалів, істотно знижує коефіцієнт тертя спряжених поверхонь. Зменшення шорсткості поверхонь тертя, збільшення площі їх контакту при наявності мономолекулярної роздільної захисної плівки епіламу також сприяють підвищенню зносостійкості пар тертя.

Отримані нами результати дозволяють розглядати метод ЕП як перспективний для використання, перш за все, на дуже поширених в наш воєнний час ремонтних підприємствах з метою підвищення післяремонтного терміну експлуатації деталей машин та елементів обладнання в різних галузях промисловості. Існують приклади ефективного застосування ЕП для збільшення довговічності деталей двигуна внутрішнього згоряння та шестеренних насосів після ремонту. Варто зазначити, що технологія доступна на будь-якому підприємстві.

Список літератури

1. Трошін О.М., Стадниченко, В. В. Парфіло. Розробка технології епіламування силових елементів транспортних засобів. *Вісник ХНТУСГ ім. П. Василенка*. 2018. Вип. 192. С. 91–98.
2. Кузьменко Б. В., Шендерей Є. О., Кардаш В. П. Управління процесами тертя в опорах валів суднових допоміжних механізмів. Матеріали наук.-техн. конференції молодих дослідників «Суднові енергетичні установки: експлуатація та ремонт». Одеса: НУ «ОМА». 2021. С. 210–214.
3. Думанчук М. Ю. Новий спосіб зниження фретинг-корозії кріпильних деталей пружних муфт. Міжвузівський збірник «Наукові нотатки». Луцьк, 2020. № 70. С. 40–43.

СТРУКТУРНІ ОСОБЛИВОСТІ РУЙНУВАННЯ АЗОТОВАНОГО ШТОКА РЕГУЛЮЮЧОГО КЛАПАНА ПАРОВОЇ ТУРБИНИ

Кречковська Г. В., провідний науковий співробітник, відділ діагностики корозійно-водневої деградації матеріалів, Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, м. Львів

Регульовальні клапани забезпечують стабілізацію параметрів пари й маневреність енергоблоку. Руїнування штока є небезпечним, оскільки призводить до непередбаченого виходу з ладу парової турбіни. На довговічність штоків негативно впливають циклічні навантаження, повзучість і корозійно-ерозійні процеси [1]. Основними причинами відмов є концентрація напружень, дефекти матеріалу та низька втомна міцність, які впливають на утворення тріщин. Дослідження мікроструктурних змін, умов для розвитку та злиття мікротріщин є необхідним для надійної роботи турбін.

Проаналізовано причини відмови штока регульовального клапана парової турбіни після 17 років експлуатації. Руїнування відбулося в кількох точках по периметру штока і злиття тріщин спричинило раптове його руїнування. Увігнута форма зламу до центру перерізу свідчить про суттєвий вплив деформації біля вершин тріщин, які виникли через розтріскування зміцненого поверхневого шару. Рентгеноспектральним аналізом виявлено підвищений вміст азоту в поверхневому шарі, що підтверджено вищою мікротвердістю біля його поверхні (9300 МПа) та її зменшенням до 3000 МПа (що відповідає основному металу) на глибині близько 200 мкм. В азотованому шарі виявлено внутрішнє окиснення у вигляді пор, найбільша концентрація яких спостерігається біля поверхні. Їх злиття сприяє утворенню мікротріщин навіть за невеликих навантажень. У структурі сталі виявлено великі карбіди ніобію та карбіди хрому, що призвело до зменшення вмісту хрому в матриці й, відповідно, зниження стійкості матеріалу до високотемпературного руїнування. Метал штока має структуру високовідпущеного мартенситу з неоднорідними зернами та карбідами вздовж меж, що викликає збіднення матриці хромом і знижує жароміцність. Виявлені витягнуті ніобієві фази створюють концентрації напружень і сприяють виділенню хромових карбідів, що погіршує експлуатаційні властивості штока і відповідно здатність сталі чинити опір руїнуванню.

Список літератури

1. Weng S., Huang Y., Lin S., Xuan F.-Z. Stress-corrosion crack propagation in nuclear steam turbine rotor steels: effects of microstructure in a simulated environment. *Journal of Materials Research and Technology*. 2022. 17. P. 725–742. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.01.020> (Last accessed: 27.03.2026).

Робота виконана у рамках Проєкту 2025.02/0031 за рахунок коштів гранту Президента України, наданого Національним фондом досліджень України.

АНАЛІЗ СТРУКТУРНОЇ НЕОДНОРІДНОСТІ ТА ЇЇ ВПЛИВ НА ВЛАСТИВОСТІ СПІНЕНОГО ПОЛІВІНІЛХЛОРИДУ

Галуцак А. В., аспірант; Свірська Л. М., наук. співр., відділ діагностики корозійно-водневої деградації матеріалів, Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України; Кречковська С. Р., студентка; Шабатура Д.-Г. В., студентка, кафедра матеріалознавства та інженерії матеріалів, НУ «Львівська політехніка», м. Львів

Розвиток сучасних технологій будівництва потребують вдосконалення матеріальної бази. Сьогодні зростає інтерес до полімерних матеріалів, які поєднують низьку густину, добрі ізоляційні характеристики та механічні властивості. Одним із таких матеріалів є спінений полівінілхлорид (СПВХ). Його застосування в будівництві зумовлене високою вологостійкістю, технологічністю та стійкістю в агресивних середовищах. СПВХ має також низку проблемних аспектів, які обмежують його застосування в будівництві, а саме неоднорідність коміркової структури, різницю механічних характеристик по товщині перерізу листів та старіння за впливу навколишнього середовища. Актуальним є вивчення структурно-механічного стану СПВХ і оптимізація для підвищення експлуатаційних властивостей.

Досліджено листи СПВХ щільністю 0,5; 0,6 та 0,65 г/см³, відповідно. Внаслідок спінювання в їх перерізі сформувалася неоднорідна за пористістю структура. На поверхні листів утворювалися однорідні матові шари з мінімальною пористістю. Проаналізовано мікроморфологічні особливості типових пор у перерізах листа щільністю 0,5 г/см³. Біля обох поверхонь листа виявили поодинокі пори розміром до 50 мкм. На глибині 1...2 мм від їх поверхонь, кількість і розміри пор збільшувалися. На віддалі 0,5; 2 та 8 мм від поверхонь листа їх розмір становив 60; 105 та 200 мкм, відповідно. З наближенням до центра перерізу листа розподіл пор стабілізувався і ставав щораз рівномірнішим. Виявили дещо неправильну їх форму, що свідчить про різний опір їх розширення в різних напрямках під час спінювання. Аналогічні тенденції виявили у перерізах СПВХ листів щільністю 0,6 та 0,65 г/см³.

Морфологія пор у СПВХ змінювалася по товщині листів, що впливає на їх твердість. У поверхневих шарів щільністю 0,5 г/см³ твердість за Шором D є 48–55 одиниць, щільністю 0,6 – 62–71; 0,65 г/см³ – 70–78. Тобто, твердість по товщині стінки листів змінювалася якісно протилежно до зміни пористості. Тому, товщина перетинок між суміжними порами матиме вплив на механічні властивості СПВХ. Оптимізація пороутворення в об'ємі спінених полімерів під час формування листових матеріалів, з контролем не лише розмірів і розподілу пор, а ще й товщини перетинок між ними, забезпечить їм механічні та функціональні властивості. Створення науково обґрунтованих підходів до оптимізації структурно-механічного стану СПВХ сприятиме розвитку вітчизняного ринку будівельних матеріалів та дозволить суттєво розширити сфери його застосування.

ПРАКТИЧНЕ ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДУ КВАРЦОВОГО МІКРОЗВАЖУВАННЯ

Коломієць В. М., зав. сектору; Канівець В. М., гол. інж.; Кононенко І. М., м. н. с.; Кравченко С. М., м. н. с.; Інститут прикладної фізики НАН України, м. Суми

Контроль товщини плівок в процесі їх осадження є надзвичайно важливою складовою технологічного процесу та сприяє можливості відтворення фізичних властивостей тонкоплівкових об'єктів. Серед різновиду фізичних методів, які дозволяють вимірювати *in-situ* товщину плівки, досить часто використовується метод кварцового мікрозважування [1], який ґрунтується на ефекті зміни резонансної частоти кварцового кристалу від зміни його маси.

Поштовхом для широкого використання цього методу для вимірювання товщини плівок стала опублікована у 1959 р. праця [2]. Загальноприйнято, що рівняння Заурбрера може бути використане для отримання точних результатів товщини тонких плівок, якщо масове завантаження кварцового кристалу викликає зміну частоти менш, ніж на 2% від частоти незавантаженого кристалу. Для більш товстих плівок потрібно враховувати модуль зсуву (рівняння Z-узгодження) [3], оскільки в цьому випадку властивості плівки будуть впливати на частоту коливання кварцу. Розрахунки за допомогою методу Z-узгодження досить добре співпадають з експериментальними результатами [4] для зміни частоти до 40%.

Авторами роботи був розроблений кварцовий вимірювач товщини плівок (рис. 1), який складається із вимірювача частоти (1), генератора (2), датчика із кварцовою пластиною (3) та герметичного вакуумного вводу (4).

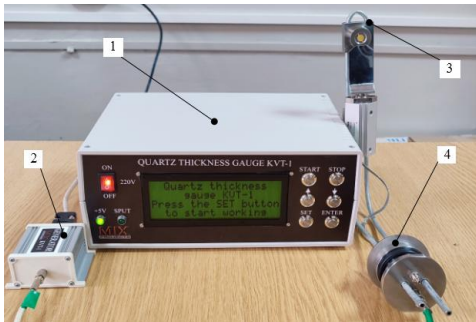


Рисунок 1 – Кварцовий вимірювач товщини

КВТ-1 розрахований для роботи з кварцовими кристалами з резонансною частотою в діапазоні 4 – 10 МГц та має роздільну здатність за товщиною 0,1 нм (для Ta_2O_5).

Прилад може працювати як автономно, так і у складі автоматизованої системи управління (АСУ) за послідовним інтерфейсом UART (ТТЛ 5 В) або RS485.

Перед початком напilenня плівки необхідно ввести вихідні параметри: базову частоту кварцового кристалу (4–10 МГц); густину матеріалу (0,1–25 г/см³), який буде розпилятися; товщину плівки (0,1 – 4999 нм), яку потрібно отримати; коефіцієнт k (0,01 – 1), який залежить від

місяця установки кварцового кристалу відносно пристрою для розпилення. Ці дані зберігаються в пам'яті та при проведенні аналогічних технологічних процесів не потребують постійного введення. На відміну від аналогів, прилад КВТ-1 залежно від заданої оператором необхідної товщини плівки запропонує оператору найбільш точну модель розрахунку: за методом Заубрера або Z-узгодження.

Після напилення плівки (заданої товщини) прозвучить звуковий сигнал та спрацює реле вимкнення блоку живлення джерела напилення. Для цього передбачено «сухі контакти» (24 В, до 5 А). Можливий також і дистанційний запуск початку вимірювання товщини за рахунок подачі зовнішнього сигналу амплітудою 5–12 В.

Слід зазначити, що для зменшення похибки вимірювання товщини осаджуваної плівки необхідно стабілізувати температуру кварцового кристалу за рахунок водяного охолодження. При довготривалому напиленні слід також забезпечити постійність температури резервуару з водою.

Для перевірки коректної роботи КВТ-1 була напилена серія плівок танталу (Ta) на підкладках з кремнію (Si) за умови розташування підкладки та кварцу в однаковому потоці розпиленого матеріалу. Товщина отриманих покриттів була додатково визначена методом рентгенівської рефлектометрії (XRR) в лабораторії Професора Клауї при Університеті Й. Гутенберга (Німеччина). Результати обох методів визначення товщини плівки зведені до Таблиці 1.

Таблиця 1 – Порівняння результатів визначення товщини покриттів Ta за допомогою методів кварцових вагів (КВТ-1) і XRR

№	Товщина КВТ-1, нм	Товщина XRR, нм	Різниця, %
1	10.69	11.35	5.82
2	12.31	13.40	8.13
3	22.12	24.51	9.75
4	32.80	35.11	6.58

Список літератури

1. An analysis of non-destructive methods for thin film thickness measurement / Shupenev E. et all // Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building. 2019. Vol. 709, № 4. P. 18–27.
2. Sauerbrey G. Verwendung von Schwingquarzen zur Wägung dünner Schichten und zur Mikrowägung // Zeitschrift für Physik. 1959. Vol. 155, № 2. P. 206–222. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF01337937> (дата звернення: 10.03.2026)
3. Lu C., Lewis O. Investigation of film-thickness determination by oscillating quartz resonators with large mass load // Journal of Applied Physics. 1972. Vol. 43, № 11. P. 4385–4390. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.1660931>
4. Lu C. Mass determination with piezoelectric quartz crystal resonators // Journal of Vacuum Science and Technology. 1975. Vol. 12, № 1. P. 578–583.

ТЕХНОЛОГІЯ ВИГОТОВЛЕННЯ ТА ТЕРМІЧНА ОБРОБКА КОРОМИСЛА ГАЗРОЗПОДІЛЬНОГО МЕХАНІЗМУ ДВИГУНІВ ВНУТРІШНЬОГО ЗГОРЯННЯ

*Середа Б. Р., студ. гр. І-22/2мт; Говорун Т. П., доц. кафе. ПМіТКМ,
Сумський державний університет, м. Суми*

Газорозподільний механізм (ГРМ) є одним із найвідповідальніших вузлів двигунів внутрішнього згоряння, що забезпечує точний фазовий розподіл газів через клапани впускного та випускного колекторів. Коромисло в цьому механізмі відіграє ключову роль, перетворюючи обертальний рух кулачків розподільного вала у поступальний хід клапанів, при цьому деталь зазнає значних динамічних, циклічних та трибологічних навантажень. Сучасність дослідження зумовлена постійним прагненням виробників дизельних та бензинових двигунів (Cummins, Komatsu, Caterpillar, Detroit Diesel, Perkins, Deutz) підвищувати ресурс та надійність ГРМ в умовах зростання питомої потужності та екологічних вимог до агрегатів. Тому розробка повного технологічного процесу виготовлення коромисла з недорогої, добре оброблюваної та технологічної конструкційної вуглецевої сталі 45, яка широко застосовується в промисловості, машино-, автомобіле- та тракторобудуванні, є актуальною задачею.

Проведено вибір оптимальних режимів термообробки для досягнення комплексних механічних характеристик: твердості поверхневого шару 52–58 HRC, межі тимчасового опору розтягу не менше 780 МПа, відносного видовження $\delta \geq 10\%$, модуля пружності $2,01 \times 10^5$ МПа та питомої ваги 7826 кг/м³. Запропонована технологія термічної обробки включає гартування при 840–860 °С з охолодженням в маслі для отримання мартенситної структури з твердості 55–58 HRC, після чого проводиться високий відпуск при 500–600 °С тривалістю 1,5–2,0 години для зняття внутрішніх напружень і отримання задовільної твердості 40–45 HRC з одночасним підвищенням ударної в'язкості. Для робочих поверхонь коромисла часто застосовують локальне гартування індукційним нагрівом струмами високої частоти (СВЧ), щоб зміцнити лише контактні зони, залишаючи сердцевину деталі більш в'язкою. У виробничих умовах можливе цементування або азотування для підвищення поверхневої твердості. Після СВЧ-гартування коромисло зі сталі 45 отримало поверхневу твердість близько 54–58 HRC, що відповідає вимогам до деталей, які працюють під ударними та циклічними навантаженнями.

Додатково розроблена технологія механічної обробки, яка передбачає фінішну шліфовку поверхонь контакту з кулачками та клапанними штангами до шорсткості Ra 0,4–0,8 мкм, що мінімізує концентратори напруг та абразивне зношування.

Розроблена технологія виготовлення та термічної обробки коромисла з сталі 45 повністю відповідає сучасним вимогам до деталей ГРМ і рекомендується до впровадження у серійне виробництво.

МОДИФІКАЦІЯ ПОВЕРХНІ РІЗАЛЬНОГО ІНСТРУМЕНТУ МЕТОДОМ ЕЛЕКТРОІСКРОВОГО ЛЕГУВАННЯ

Гапонова О. П., проф. каф. ПМіТКМ; Лапоног Г. П., аспірант; Перекупко Б. А., студ. гр. МТ.м-51, Сумський державний університет, м. Суми

У сучасному машинобудуванні ефективність і довговічність різального інструменту є визначальними чинниками продуктивності та якості обробки. Експлуатаційні характеристики інструменту значною мірою залежать від стану його поверхневого шару, який зазнає інтенсивного впливу механічних, теплових і трибологічних навантажень. У зв'язку з цим актуальним є розвиток ефективних технологій модифікації поверхні. Підвищення ресурсу інструменту дозволяє знизити витрати на виробництво та підвищити його економічну ефективність.

Традиційні методи термічної обробки (гартування, відпуск) забезпечують підвищення міцності та твердості матеріалу, однак не завжди гарантують достатню зносостійкість в умовах інтенсивної експлуатації. Сучасні методи інженерії поверхні дозволяють суттєво підвищити ресурс інструменту. Серед них електроіскрове легування (ЕІЛ) є перспективним завдяки високій адгезії покриттів, локальності обробки та мінімальному тепловому впливу на основу. Водночас актуальним залишається вибір оптимальних матеріалів покриттів і режимів обробки.

У роботі досліджено вплив матеріалу електродів і режимів ЕІЛ на якість покриттів. Як підкладку використовували швидкорізальну сталь Р6М5. Покриття наносили з використанням твердих сплавів ВК8 і Т15К6, а також молібдену. Порівняльні випробування на знос проводили за трибологічною схемою «кільце-площина» в умовах змащування. Лінійний знос визначали методом штучних баз, масовий – за втратою маси зразків. Шорсткість поверхні оцінювали за допомогою профілометра. Додатково досліджено вплив фінішного шару на основі міді на параметри поверхні.

Встановлено, що всі досліджені покриття забезпечують істотне підвищення зносостійкості порівняно з необробленими зразками. Лінійний знос зменшується у 1,6–3,5 рази, а масовий – у 2,0–4,7 рази залежно від матеріалу покриття. Найкращі результати отримано для покриття на основі твердого сплаву Т15К6.

Показано, що ЕІЛ є ефективним методом підвищення зносостійкості різального інструменту. Використання комбінованих покриттів дозволяє додатково покращити експлуатаційні характеристики. Найбільш доцільним є застосування двошарового покриття: базовий шар із твердого сплаву Т15К6, фінішний – міді. Запропонована технологія може бути рекомендована для промислового використання.

Робота виконана відповідно до держбюджетної НДР (реєстраційний № 0124U000539).

ЗМІЦНЕННЯ ІНСТРУМЕНТУ МЕТОДОМ ЕЛЕКТРОІСКРОВОГО ЛЕГУВАННЯ

Гапонова О. П., проф. каф. ПМіТКМ; Смоленко С. В., аспірант; Чижов В. В., студ. гр. МТ-41-5, Сумський державний університет, м. Суми

Під час технічного обслуговування та демонтажу обладнання атомних електростанцій різальний інструмент працює в екстремальних умовах, що включають підвищені температури, значні механічні навантаження та радіаційний вплив. Традиційні інструментальні матеріали часто мають обмежену ефективність у таких середовищах, що зумовлює необхідність розробки нових покриттів із підвищеною зносостійкістю.

Розробка зносостійких і радіаційно-стійких покриттів є важливим завданням для ядерної галузі. Матеріали на основі вольфраму та бору привертають особливу увагу завдяки високій твердості, термічній стабільності та стійкості до агресивних середовищ. Система W–Zr–B є перспективною для підвищення експлуатаційних характеристик різального інструменту під час ремонтних і демонтажних робіт.

Електроди системи W–Zr–B були отримані методом іскроплазмового спікання (SPS). Структуру та фазовий склад досліджували методами металографії та рентгенофазового аналізу. Покриття наносили на швидкорізальну сталь HS6-5-2 методом електроіскрового легування (EIJ) за різних режимів обробки. Досліджували морфологію поверхні, фазовий склад, розподіл елементів і мікротвердість. Трибологічні властивості оцінювали за результатами випробувань на зношування.

Отримані методом SPS електроди характеризуються гетерогенною структурою з домінуванням боридних фаз та незначною кількістю оксидів. Матеріал має високу твердість, добру щільність і низьку пористість. У результаті EIJ сформовано зміцнений поверхневий шар товщиною до 30 мкм твердістю близько 1500 HV. Під ним формується дифузійна зона, яка забезпечує міцне металургійне зчеплення з основою. Встановлено збагачення поверхні вольфрамом, цирконієм і бором. Фазовий склад покриттів є складнішим, ніж у вихідному матеріалі, і включає бориди вольфраму і цирконію, а також тверді розчини на основі заліза. Результати випробувань засвідчили зменшення глибини зношування за стабільного коефіцієнта тертя, що вказує на високий рівень триботехнічних характеристик покриттів.

Покриття системи W–Zr–B, отримані методом EIJ, характеризуються високою твердістю, міцним зчепленням з основою та підвищеною зносостійкістю, що робить їх перспективними для інструменту, що працює в екстремальних умовах.

Робота виконана відповідно до держбюджетної НДР (реєстраційний № 0124U000539).

АЛЮМОСИЛІЦІЮВАННЯ НІКЕЛЮ: СТРУКТУРА ТА ВЛАСТИВОСТІ ДИФУЗІЙНИХ ПОКРИТТІВ

Піменов М. О., студ. гр. МТм-51; Харченко Н. А., доц. каф. ПМіТКМ, Сумський державний університет, м. Суми; Лоскутова Т. В., проф. каф. ФМ та ТО, Дацюк О. Е., зав. лаб. електронної та оптичної мікроскопії, НТУУ «КПІ ім. І. Сікорського», м. Київ

Головними напрямками з вдосконалення нікелю та нікелевих сплавів, що полягає в підвищенні опору корозії, термічної стійкості та межі витривалості є нанесення захисного покриття. Комплексне дифузійне насичення поверхні нікелю хімічними елементами [1], зокрема алюмінієм і кремнієм, є перспективним методом підвищення захисних властивостей виробів.

Метою роботи є дослідження оптимального складу порошкової суміші для одночасного насичення нікелю алюмінієм і кремнієм (алюмосиліціювання), а також визначення структури та фізико-механічних властивостей отриманих дифузійних покриттів.

Як матеріал оброблюваної основи використано карбонільний нікель. Хіміко-термічну обробку (ХТО) реалізовували в замкнутому реакційному просторі у порошковій суміші в шахтній печі. Температура насичення – 1000 °С, тривалість ізотермічної витримки – 4 год. Склад насичуючої суміші (Табл. 1) представлений складовими, що містили елементи–дифузанти, нейтральну добавку, яка запобігає спіканню порошків і активатор: Al, Si, Al₂O₃, NH₄Cl. Кількість складових різнилась за співвідношенням.

Таблиця 1 – Склад порошкових сумішей та властивості дифузійних покриттів

№	Вміст компонентів, мас. %				Швидкість корозії, г/м ²	Мікротвердість, ГПа	Межа витривалості, σ ₀ , МПа
	Al	Si	Al ₂ O ₃	NH ₄ Cl			
1	20–25	5–10	22–27	0,4–1,2	0,0759	1,4–1,9	2100
2	48–50	13–15	32–35	2–5	0,0534	2,4–3,6	2600
3	55–60	20–23	41–47	7–9	0,0654	1,8–2,2	2250

Рекомендації щодо оптимального складу порошкової суміші проводили порівнюючи результати визначення властивостей зразків після насичення в трьох варіантах складу порошкової суміші з різним вмістом складових.

Зразки з покриттями досліджували за стандартними методиками металографічним мікроструктурним та дюрOMETричним аналізами. Для виявлення мікроструктури застосовували ніталь та реактив Муракамі [2]. Крім того були проведені випробування на стійкість до корозії та визначена межа міцності.

Для детального вивчення будови перехідної зони поперечні шліфи травили реактивом Муракамі (10 г $K_3[Fe(CN)_6]$, 10 г NaOH, 100 мл H_2O), який дозволяє диференціювати фази, що не виявляються звичайними методами травлення (рис.1).

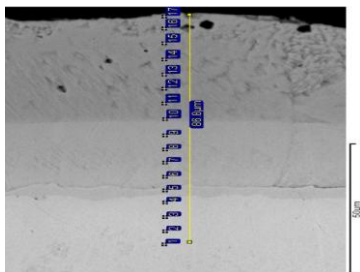


Рисунок 1 – Мікроструктура карбонільного нікелю після контактного порошкового алюмосиліціювання: $T = 1000\text{ }^\circ\text{C}$, $\tau = 4\text{ г}$

Зерна нікелю перехідної зони мають темно-сірий колір із характерними двійниками та світлою межею з основою товщиною 5,0–7,5 мкм.

Порівняння результатів комплексного аналізу властивостей нікелю після ХТО (таблиця 1) рекомендує як оптимальний склад порошкової суміші № 2 (Al: 48–50 %, Si: 13–15 %, Al_2O_3 : 32–35 %, NH_4Cl : 2–5 %). Даний склад забезпечує найнижчу швидкість корозії (0,0534 г/м²), найвищу мікротвердість (2,4–3,6 ГПа) та межу витривалості (2600 МПа). Введення алюмінію і оксиду алюмінію у вказаних межах формує оксидну плівку, що підвищує корозійну стійкість. Кремній (13–15 %) суттєво збільшує мікротвердість та межу витривалості за рахунок фазових перетворень. Хлористий амоній (2–5 %) забезпечує утворення необхідної кількості хлоридів Al та Si як транспортних агентів процесу.

Таким чином, розроблений порошковий склад на основі Al та Si дозволяє отримати на нікелі та його сплавах захисні дифузійні покриття з підвищеним опором корозії, термічною стійкістю та межею витривалості.

Список літератури

1. Podchernyaeva I. A., Panasyuk A. D. Powder Metallurgy and Metal Ceramics. 2000. Vol. 39, No. 9/10. P. 434–444.
2. Murakami's Reagent : Etchants Database. URL: <https://www.metallographic.com/etchants/murakamis-reagent>.

ТЕХНОЛОГІЧНЕ КОНСТРУЮВАННЯ КВАНТОВО-АКТИВНИХ ШАРІВ

Рубін Е. Ю., проректор ТОВ «Приватний вищий навчальний заклад
«Університет сучасних технологій», м. Київ

Технологічне конструювання квантово-активних шарів розглядається як керований процес формування наноструктур із заданими електронними, спіновими та транспортними характеристиками. Атомарно точні методи синтезу, зокрема молекулярно-променева епітаксія, забезпечують монолайвовий контроль складу та якості інтерфейсів і є базовою технологією створення високоякісних гетероструктур [1]. Принципи епітаксійного росту та інтерфейсної інженерії систематизовано в дослідженні [2].

Функціональні властивості квантово-активних шарів визначаються ефектами просторового конфайнменту, енергетичною зонною структурою, різкістю міжфазних меж та рівнем структурних дефектів. Контроль товщини шару та матеріального складу дозволяє формувати квантові ями з керованими енергетичними рівнями. При цьому стабільність квантових станів обмежується процесами декогеренції, що описуються моделями відкритих квантових систем і визначаються взаємодією з оточенням [3].

Дослідження гетероструктур підтверджують, що якість інтерфейсів і структурна однорідність безпосередньо впливають на електронні властивості та когерентні характеристики матеріалів [4]. Отже, параметричний контроль умов росту, включаючи температурний режим, потоки компонентів і вакуумні умови, розглядається як інструмент зниження розсіювання носіїв заряду, мінімізації шуму та підвищення стабільності квантових режимів.

Запропонований підхід формує відтворювану технологічну основу для створення квантово-активних шарів із прогнозованими енергетичними та когерентними характеристиками, придатних для інтеграції у квантові інформаційні системи та твердотільні архітектури нового покоління.

Список літератури

1. Panish, M. B. (1980). Molecular Beam Epitaxy. *Science* 208, 916-922. <https://doi.org/10.1126/science.208.4446.916>
2. Wicks, G. W. (1993). Molecular beam epitaxy of III-V semiconductors. *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences*, 18(3), 239–260. <https://doi.org/10.1080/10408439308242561>
3. Xiang, Z.-L., Ashhab, S., You, J. Q., Nori, F. (2013). *Hybrid quantum circuits: Superconducting circuits interacting with other quantum systems*. *Reviews of Modern Physics*, 85(2), 623–653. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.85.623>
4. Peng, J.-P., Guan, J.-Q., Zhang, H.-M., Song, C.-L., Wang, L., He, K., Xue, Q.-K., Ma, X.-C. (2015). *Molecular beam epitaxy growth and scanning tunneling microscopy study of TiSe₂ ultrathin films*. *Physical Review B*, 91(12), 121113. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.91.121113>

**СЕКЦІЯ «ДИНАМІКА І МІЦНІСТЬ,
КОМП'ЮТЕРНА МЕХАНІКА»**

АНАЛІЗ РОЗШАРУВАННЯ ВУГЛЕПЛАСТИКОВОГО КОРПУСУ FPV-ДРОНА ПІД ДІЄЮ ВІБРАЦІЇ

*Жигилій Д. О., доц. каф. КМ ім. В. Марцінковського; Радченко Д. Я.,
студ. гр. ІМ-21/3, Сумський державний університет, м. Суми*

У сучасних умовах інтенсивної експлуатації FPV-дронів, зокрема 7-дюймових моделей дальнього радіусу дії типу UkrDrone Mark 4, питання структурної цілісності корпусу набуває критичного значення. Попри те, що вуглепластик (CFRP), з якого виготовлено раму, забезпечує високе співвідношення міцності до ваги, він залишається вразливим до специфічних видів руйнування, насамперед розшарування – деламінації. Оскільки фізичні краш-тести композитних матеріалів є дорогими та складними, у цьому дослідженні запропоновано використання чисельного моделювання в середовищі ANSYS Mechanical для прогнозування поведінки 5-міліметрових променів дрона під дією критичних вібраційних навантажень.

Основним інструментом аналізу було обрано метод матеріалу когезійної зони (Cohesive Zone Material – CZM), який дозволяє детально змоделювати процес відокремлення шарів композиту. Геометрія променя була ідеалізована у вигляді подвійної консольної балки (Double Cantilever Beam) з попередньо введеною тріщиною довжиною 30 мм, що імітує виробничий дефект або пошкодження від попереднього удару. Для забезпечення точності розрахунків у товстому перерізі променя використовувалася тривимірна модель деформації. Критичний інтерфейс взаємодії між шарами композиту було налаштовано за допомогою інструменту Contact Debonding за формулювання Pure Penalty, що дозволяє автоматично визначати момент розриву зв'язків між елементами сітки при досягненні критичної енергії руйнування.

Сценарій навантаження передбачав фіксацію одного кінця балки та застосування вертикального переміщення з амплітудою 10 мм до розщеплених кінців іншого боку. Це імітує розкриття тріщини за Модюю I (нормальний відрив), що виникає під час сильної вібрації моторів або при різкому маневруванні. Використання автоматичного крокування у часі (Auto Time Stepping) дозволило детально відстежити кінетику процесу: симуляція показала, як зона максимальних еквівалентних напружень концентрується у вершині тріщини та переміщується вздовж променя в міру його розшарування.

Результати дослідження підтвердили, що за наявності навіть незначних початкових дефектів промені рами Mark 4 схильні до прогресуючого руйнування. Отримані дані про сили реакції дозволяють інженерам визначити порогові навантаження, які конструкція здатна витримати до настання катастрофічної відмови. Таким чином, застосована методика Contact Debonding довела свою ефективність як інструмент для оптимізації геометрії та вибору параметрів композитних рам без необхідності проведення руйнівних натурних випробувань, відкриваючи шлях до створення більш надійних та довговічних безпілотних систем.

ДОСЛІДЖЕННЯ ВТРАТИ СТІЙКОСТІ ЛЕГКИХ СТАЛЕВИХ ТОНКОСТІННИХ ЕЛЕМЕНТІВ КОНСТРУКЦІЙ З ГОСТРИМИ КОНЦЕНТРАТОРАМИ НАПРУЖЕНЬ

*Жигилій Д. О., доц. каф. КМ ім. В. Марцінковського; Великодний Р. А.,
студ. гр. ІМ-21/3, Сумський державний університет, м. Суми*

Втрата стійкості є критичним видом руйнування будівельних легких сталевих тонкостінних конструкцій (ЛСТК). У роботі основний фокус зосереджено на аналізі гострих концентраторів – зон локалізації мінімальних головних напружень, які стають тригерами початку деформації, а також на порівнянні лінійних та нелінійних методів розрахунку.

Методологія дослідження базується на скінченно-елементному моделюванні у середовищі ANSYS із застосуванням триетапного підходу. Першим етапом є лінійний статичний аналіз для визначення напруженого стану. Другий етап – аналіз власних значень, який надає теоретичну, ідеалізовану форму втрати стійкості. Третій, ключовий етап – це нелінійний розрахунок, що враховує фізичну нелінійність матеріалу (модель білінійного кінематичного зміцнення) та геометричні недосконалості конструкції.

Результати порівняльного аналізу демонструють небезпеку покладання виключно на лінійні методи. На прикладі сталеві колони було встановлено, що лінійний розрахунок прогнозує критичне навантаження на рівні 1000 кН. Однак, при введенні в модель реалістичних геометричних недосконалостей та врахуванні пластичності сталі, несуча здатність знижується до 726 кН. Таким чином, ігнорування нелінійних факторів може призводити до переоцінки міцності конструкції майже на 30%.

Важливим висновком роботи є обґрунтування вибору методу прикладання навантаження. Традиційний підхід, заснований на прикладанні сили, виявляється неефективним у момент біфуркації, призводячи до проблем зі збіжністю розв'язку. Натомість метод керування переміщенням дозволяє коректно пройти точку втрати стійкості та дослідити поведінку конструкції в закритичній стадії. Це має вирішальне значення для оцінки резервів міцності, оскільки для деяких систем (наприклад, обшивка фюзеляжу або циліндричні оболонки при крученні) локальна втрата стійкості не означає миттєвого руйнування всієї споруди, на відміну від стиснутих колон.

Окремо розглянуто вплив складного напруженого стану. У випадках зсувної втрати стійкості (наприклад, при крученні циліндра) вирішальну роль відіграють головні стискаючі напруження, що діють під кутом 45 градусів, викликаючи характерне діагональне зморщування.

Підсумовуючи, надійний інженерний аналіз ЛСТК вимагає обов'язкового врахування початкових геометричних недосконалостей, які слід імпортувати з результатів модального аналізу та масштабувати відповідно до виробничих допусків. Проектні межі навантажень та коефіцієнти запасу повинні базуватися на результатах нелінійного моделювання з урахуванням закритичної поведінки, а не на теоретичних значеннях Ейлера, що дозволить забезпечити реальну надійність проєктованих систем.

ЧИСЛОВИЙ АНАЛІЗ ДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВРІВНОВАЖУЮЧОГО ПРИСТРОЮ ВІДЦЕНТРОВОГО НАСОСА

*Ванжула А. Ю., асп. гр. А-45/МБ; Загорулько А. В., зав. каф. КМ
ім. В. Марцинковського, Сумський державний університет, м. Суми*

Дисбаланс осьової сили залишається однією з головних проблем при проектуванні та надійній роботі багатоступінчатих відцентрових насосів, що вимагає використання автоматичних врівноважуючих пристроїв, таких як гідропр'ята, для компенсації осьових сил, що діють на ротор. Врівноважуючі пристрої (гідропр'яти) відцентрових насосів дедалі частіше розглядаються не лише як механізм компенсації осьової сили, а й як гідростатодинамічна опора, що працює на перекачуваній рідині. Це дозволяє відмовитися від традиційних підшипників кочення на користь безконтактних опор.

Мета дослідження полягає у встановленні закономірностей зміни динамічних характеристик врівноважуючого пристрою залежно від робочих та геометричних параметрів. Для дослідження була побудована розрахункова модель на основі експериментальної установки трьохступінчатого відцентрового насоса, в якому гідропр'ята виступала як повноцінна гідростатодинамічна опора. Розрахункова модель побудована методом скінченних об'ємів та використовує Shear Stress Transport $k-\omega$ модель турбулентності для точного моделювання поведінки потоку та швидкостей в малих зазорах. Ротору задано прецесійний рух з гармонічними коливаннями в осьовому напрямку. В якості робочої рідини виступає вода. Відносна похибка між розрахунковими та експериментальними даними становить не більше 5%.

Динамічні характеристики досліджувались при різних режимних та геометричних параметрах. Зокрема, аналізувався вплив зміни тиску на врівноважуючому пристрої шляхом варіювання тиску на вході. Визначено залежність гідродинамічних реакцій від амплітуди коливань ротора та величини торцевих і радіальних зазорів, які можуть змінюватися в процесі зношування. Також увага приділялася впливу початкового ексцентриситету на формування несиметричного поля тисків, що може викликати нестійкість ротора.

Отримані результати чисельного моделювання підтверджують, що врівноважуючий пристрій, як повноцінна гідростатодинамічна опора, динамічно стійка при досліджуваних параметрах. Пряме та перехрестне демпфування мають позитивні значення. Встановлено, що пряма жорсткість може мати негативні значення, проте динамічна стійкість досягається за рахунок перехрестної жорсткості та прямого демпфування. Від них залежить коефіцієнт ефективного демпфування та коефіцієнт частоти завихрення, які безпосередньо впливають на динамічну стійкість ротора.

ЦИФРОВИЙ ДВІЙНИК РОТОРА ДЖЕФКОТА З ПОПЕРЕЧНОЮ ТРІЩИНОЮ

Роцупкін О. В., аспірант; Павленко І. В., професор, кафедра комп'ютерної механіки ім. В. Марцінковського, Сумський державний університет, м. Суми

Надійна експлуатація роторного обладнання в енергетиці, авіації та хімічній промисловості потребує раннього виявлення структурних дефектів, зокрема поперечних тріщин валів [1]. Традиційні підходи щодо технічного діагностування відповідних машин ґрунтуються на аналізі вібросигналів наявного обладнання та, як правило, потребують тривалого накопичення статистичних даних для достовірної ідентифікації дефектів [2]. Концепція цифрового двійника як математичної моделі, що відтворює динаміку досліджуваного об'єкта у режимі, наближеному до реального часу, відкриває нові можливості для діагностики роторних систем. Така модель дозволяє безперервно оцінювати технічний стан, аналізувати зміну динамічних характеристик та прогнозувати розвиток дефектів без зупинки машини.

У роботі розроблено цифровий двійник (Digital Twin) ротора Джефкота на основі запропонованої удосконаленої нелінійної моделі з чотирма ступенями вільності. При цьому враховується анізотропія жорсткості вала за рахунок урахування процесу розвитку тріщини у поперечному перерізі. Модель також враховує зміну у часі момента інерції згідно з одержаною нелінійною залежністю (рис. 1):

$$I_x(t) = I_{x0} \cdot [1 - 2,4 \cdot \chi^{1,5}(t)], \quad (1)$$

де t – час, с; $\chi(t)$ – безрозмірна функція розвитку тріщини; I_{x0} – момент інерції перерізу без дефекту, м^4 ; $I_x(t)$ – момент інерції перерізу з урахуванням дефекту, м^4 .

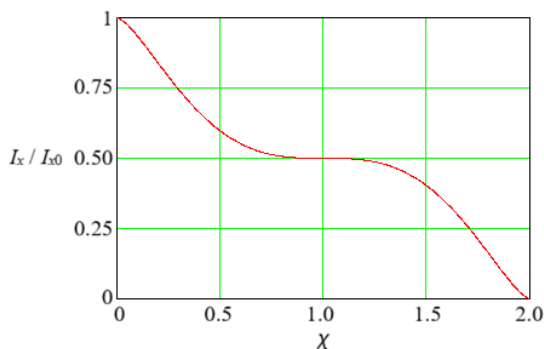


Рисунок 1 – Залежність зміни відносного момента інерції від безрозмірної функції розвитку тріщини

Функція розвитку тріщини апроксимується рядом Фур'є, що дозволяє враховувати залежність жорсткості від поточного прогину вала та кута повороту перерізу.

Запропонована математична модель ураховує два різні стани тріщини – конфігурації, перехід між якими описується за допомогою функції Хевісайда залежно від прогину вала у даному перерізі. Такий ідеалізований підхід відповідає концепції «open-close model» та є консервативною щодо оцінювання зміни згинальної жорсткості вала.

Числове розв'язання моделі здійснюється методом Рунге-Кутти 4-го порядку [3] з часовим кроком, що узгоджується із частотою дискретизації акселерометра.

Ключовим діагностичним параметром є відносний зсув першої власної частоти,

$$\delta(t) = 0,6\chi^{1.5}(t)/K, \quad (2)$$

де K – безрозмірна характеристика жорсткості опори.

Характерною діагностичною ознакою є також поява у спектрі вібрації другої гармоніки, зумовленої нелінійністю функції розвитку тріщини. Крім того, при роботі на частотах, що перевищують першу власну частоту, розвиток тріщини провокує субгармонійну прецесію вала унаслідок параметричного резонансу другого роду.

Розроблена модель реалізована у середовищі MATLAB. Внутрішня узгодженість результатів перевірялася порівнянням критичних частот вала.

Подальші дослідження спрямовуватимуться на експериментальне визначення кількісних характеристик та оцінюванню параметрів розробленої математичної моделі.

Список літератури

1. Sabnavis G., Kirk R.G., Kasarda M., Quinn D. (2004). Cracked shaft detection and diagnostics: A literature review. The Shock and Vibration Digest, Vol. 36, pp. 287–296. <https://doi.org/10.1177/0583102404045439>
2. Ghazali M.H.M., Rahiman W. (2021). Vibration analysis for machine monitoring and diagnosis: A systematic review. Shock and Vibration, Vol. 2021, 9469318. <https://doi.org/10.1155/2021/9469318>
3. Del Buono N., Mastroserio C. (2002). Explicit methods based on a class of four stage fourth order Runge-Kutta methods for preserving quadratic laws. Journal of Computational and Applied Mathematics, Vol. 140(1–2), pp. 231–243. [https://doi.org/10.1016/S0377-0427\(01\)00398-3](https://doi.org/10.1016/S0377-0427(01)00398-3)

Робота виконана у межах розвитку наукового напрямку «Розроблення гібридних методів параметричної ідентифікації гідромеханічних систем».

АНАЛІЗ КАНАВКОВИХ ШПАРИННИХ УЩІЛЬНЕНЬ В ТУРБОМАШИНАХ

Росляков М. Ю., аспірант, Сумський державний університет, м. Суми

Канавкові шпаринні ущільнення широко застосовуються в турбомашинах, насосах і компресорах для зменшення витоків робочого середовища та підвищення ротодинамічної стійкості системи «ротор–статор». Порівняно з гладкими ущільненнями вони характеризуються більш складною структурою течії, яка формується внаслідок наявності канавок на поверхні статора або ротора [1, 2].

Теоретичною основою дослідження шпаринних ущільнень є модель об'ємної (bulk-flow) течії [3, 4]. У межах цієї моделі рівняння руху осереднюються по товщині зазору, що дозволяє визначити розподіл тиску, витоків та ротодинамічні коефіцієнти жорсткості і демпфування. Для канавкових ущільнень ці моделі були модифіковані з урахуванням рециркуляційних зон у канавках [1, 2].

Експериментальні дослідження показали, що застосування окружних канавок дозволяє зменшити перехресну жорсткість ущільнення, яка є основним джерелом дестабілізуючих сил у ротодинамічних системах [5]. Встановлено, що геометричні параметри канавок істотно впливають як на величину витоків, так і на значення ротодинамічних коефіцієнтів [1]. Числові дослідження підтвердили формування зон рециркуляції в канавках, які сприяють дисипації енергії та зменшенню окружної складової швидкості [2].

Порівняльний аналіз показує, що канавкові ущільнення забезпечують більш сприятливий баланс між обмеженням витоків і підвищенням динамічної стійкості ротора порівняно з гладкими ущільненнями [4].

Таким чином, результати аналізу літературних джерел свідчать, що подальші дослідження доцільно спрямувати на уточнення математичних моделей течії та оптимізацію геометрії канавок з метою підвищення ротодинамічної стійкості турбомашин.

Список літератури

1. Nordmann R., Dietzen F. Bulk-flow analysis of annular seals with circumferential grooves // *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*. 1988. Vol. 110. P. 247–252.
2. San Andrés L. Analysis of fluid forces in annular seals with grooves // *Journal of Tribology*. 2002. Vol. 124. P. 747–754.
3. Hirs G. G. A bulk-flow theory for turbulence in lubricant films // *Journal of Lubrication Technology*. 1973. Vol. 95, No. 2. P. 137–146.
4. Childs D. W. *Turbomachinery Rotordynamics: Phenomena, Modeling, and Analysis*. New York : John Wiley & Sons, 1993. 480 p.
5. Ishii N., Kirk R. G. Experimental investigation of rotordynamic coefficients of grooved annular seals // *Journal of Turbomachinery*. 1990. Vol. 112. P. 386–394.

МОДЕЛЮВАННЯ ТА АНАЛІЗ СТАТИЧНИХ І ДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК УЩІЛЬНЕНЬ ІЗ ПЛАВАЮЧИМИ КІЛЬЦЯМИ

*Позовний О. О., ст. викл. каф. КМ ім. В. Марцінковського; Єршов Б. В., студ.
гр. ІМ-21/3км, Сумський державний університет, м. Суми*

Робота присвячена дослідженню статичних і динамічних характеристик ущільнень із плаваючими кільцями, що широко застосовуються у високошвидкісних турбонасосних агрегатах, зокрема в енергетичній, аерокосмічній та нафтохімічній галузях. Такі ущільнення забезпечують ефективне зменшення витоків робочого середовища завдяки малим радіальним зазорам і здатності адаптуватися до вібрацій ротора, що суттєво підвищує герметичність і надійність агрегатів.

У роботі розроблено підхід до моделювання гідродинамічних процесів в ущільнювальному зазорі з урахуванням довільного руху ротора. Для розв'язання системи нелінійних рівнянь використано метод скінченних об'ємів, що дозволило отримати розподіли тиску, швидкостей та витоків, а також визначити гідродинамічні сили, які діють на ротор і плаваюче кільце.

Запропоновано умову блокування для плаваючих кільцевих ущільнень, що дозволяє прогнозувати область стабільного положення кільця в умовах вихрового руху ротора. Встановлено, що в межах помірних ексцентриситетів (менше 0,5) положення блокування є слабо чутливим до зміщення ротора, що підтверджує можливість використання даного підходу для інженерних розрахунків.

Запропоновано зв'язаний підхід до визначення траєкторії ротора та положення плаваючого кільця, який враховує взаємний вплив гідродинамічних і контактних сил. Показано, що зворотний вплив ущільнення на траєкторію ротора є обмеженим, однак суттєво впливає на витoki та динамічні характеристики системи.

Проведено числове дослідження впливу конструктивних параметрів, зокрема ширини кільця та шорсткості поверхонь, на витратні характеристики ущільнення. Встановлено, що сили тертя у вторинному ущільненні відіграють визначальну роль у формуванні динамічних сил ротора. При цьому плаваюче кільце, як правило, займає положення, близьке до концентричного відносно ротора, що забезпечує стабільну роботу системи.

Показано, що використання плаваючих кільцевих ущільнень дозволяє істотно зменшити витoki порівняно з традиційними кільцевими ущільненнями з великими зазорами, водночас зберігаючи здатність компенсувати вібрації ротора. Разом із тим, складна динаміка руху кільця (періодична або хаотична) під дією гідродинамічних, інерційних і контактних сил може призводити до підвищених теплових і контактних навантажень, що необхідно враховувати при проєктуванні.

ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ НАДІЙНОСТІ ТУРБОНАСОСНИХ АГРЕГАТІВ ЧЕРЕЗ АНАЛІЗ ДИНАМІЧНОЇ ПОВЕДІНКИ ЇХ РОТОРІВ

Позовний О. О., ст. викл. каф. КМ. ім. В. Марцинковського; Ступаченко Є. В., студ. гр. ІМ-21/Зкм-3, Сумський державний університет, м. Суми

Робота присвячена підвищенню надійності турбонасосних агрегатів на основі комплексного аналізу динамічної поведінки роторів із урахуванням впливу ущільнювальних систем. У сучасних турбомашинах ущільнення є невід'ємною складовою, що визначає як гідравлічну ефективність, так і динамічну стійкість агрегату. Найбільш поширеними є щілинні ущільнення з мінімальними зазорами, до яких належать втулкові, лабіринтові, стільникові, канавкові та гвинтові конструкції. Їх застосування дозволяє мінімізувати перетікання робочого середовища з області високого тиску в область низького, однак водночас вони формують складну гідродинамічну взаємодію з ротором.

У роботі проведено числове моделювання течії в ущільнювальному зазорі для декількох типів безконтактних ущільнень із використанням сучасних програмних комплексів. Отримано розподіли швидкостей, тиску та турбулентних характеристик потоку, а також визначено величини витоків для різних конструктивних виконань. Порівняльний аналіз показав суттєвий вплив геометрії ущільнення на гідравлічні втрати та ефективність агрегату, що особливо критично для насосів малих розмірів, де виток може досягати значної частки загального об'єму потоку.

Показано, що ущільнення слід розглядати не лише як елементи герметизації, але і як активні компоненти динамічної системи «ротор–підшипник–ущільнення». Гідродинамічні сили, що виникають у зазорі ущільнень, впливають на жорсткість і демпфування системи, змінюють критичні швидкості обертання та визначають характер вібраційного відклику. В умовах експлуатації турбонасосних агрегатів, зокрема в енергетичних установках та ракетно-космічній техніці, де можливе використання робочих середовищ із екстремальними параметрами (наприклад, водню), ці ефекти стають визначальними для забезпечення надійності.

Особливу увагу приділено впливу перекосу валу, вібраційних навантажень та радіальних зміщень на роботу ущільнень. Запропоновано підхід до моделювання динамічних характеристик роторної системи з урахуванням зв'язаних ефектів «ущільнення–ротор», що дозволяє врахувати зміну контактних сил та їх вплив на вібраційний стан системи. Також розглянуто вплив конструктивних параметрів ущільнень на динамічну поведінку роторів, що дає можливість більш точно визначати діапазони критичних швидкостей і забезпечити безпечні режими роботи.

КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ЕЛЕМЕНТІВ МАШИН

Кущинов А. О., доцент, Одеська державна академія будівництва та архітектури, м. Одеса

Сучасні вимоги до надійності машинобудівних конструкцій зумовлюють необхідність застосування високоточних методів аналізу їх міцності [1]. Аналітичні підходи мають обмеження при дослідженні складного напруженого стану, особливо за комбінованого навантаження. Широкого застосування набуває числове моделювання на основі методу скінченних елементів (МСЕ), що дозволяє враховувати реальні умови навантаження та геометричні особливості деталей [2].

Об'єктом дослідження є напружено-деформований стан вала круглого перерізу діаметром $d = 40$ мм та довжиною $L = 500$ мм, виготовленого зі Сталі 45, що працює під дією комбінованого навантаження (вигин і кручення). Моделювання виконувалось в середовищі SolidWork's Simulation. Були прийняті припущення: матеріал — однорідний, ізотропний, лінійно-пружний; навантаження – статичне; один кінець вала жорстко закріплений. Розрахунок виконувався із використанням модуля SolidWork's Simulation [3] з автоматичною генерацією скінченно-елементної сітки. При комбінованому навантаженні напружений стан визначається суперпозицією нормальних і дотичних напружень.

$$\text{Нормальні напруження при вигині:} \quad \sigma = \frac{My}{I}. \quad (1)$$

$$\text{Момент інерції:} \quad I = \frac{\pi d^4}{64}. \quad (2)$$

де M – згинальний момент, y – відстань до нейтральної осі.

$$\text{Дотичні напруження при крученні:} \quad \tau = \frac{Tr}{J}. \quad (3)$$

$$\text{Полярний момент інерції круглого перерізу:} \quad J = \frac{\pi d^4}{32}. \quad (4)$$

Еквівалентні напруження (за IV гіпотезою міцності):

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]}. \quad (5)$$

$$\text{Для плоского напруженого стану:} \quad \sigma_{eq} = \sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2} \quad (6)$$

$$\text{Коефіцієнт запасу міцності:} \quad n = \frac{[\sigma]}{\sigma_{eq}}. \quad (7)$$

Потенціальна енергія деформації:
$$U = \int_V \frac{\sigma_{eq}^2}{2E} dV. \quad (8)$$

У результаті чисельного моделювання отримано поля напружень і переміщень. Встановлено, що: максимальні напруження локалізуються в зоні закріплення вала; уздовж довжини вала напруження поступово зменшуються; у поперечному перерізі максимальні напруження виникають на поверхні. Орієнтовний розподіл напружень уздовж вала наведено в таблиці 1.

Таблиця 1 – Розподіл еквівалентних напружень уздовж довжини вала

Координата x , мм	Еквівалентні напруження σ_{eq} , МПа
0 (закріплення)	85
125	70
250	55
375	40
500 (вільний край)	25

Отримані результати узгоджуються з теоретичними залежностями та фізичною моделлю роботи вала при вигині та крученні. Значення максимальних напружень не перевищують допустимі для Сталі 45, що свідчить про достатній запас міцності конструкції.

Список літератури

1. Тимошенко С. П. Опір матеріалів. Київ : Наукова думка, 2006.
2. Білецький В. С. Теорія пружності. Харків : Харківський національний університет ім. В. Н. Каразіна, 2012.
3. SolidWorks Simulation User Guide. Dassault Systèmes, 2023.

ВИКОРИСТАННЯ ЯВИЩА ФЛАТЕРА ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ШВИДКОСТІ ПОТОКУ

*Капанайко В. С., студ. гр. ОМ.м-51; Павленко І. В., проф. каф. КМ
ім. В. Марцинковського, Сумський державний університет, м. Суми*

Флатер – це явище втрати стійкості під час згинально-крутильних коливань [1]. В інженерній практиці це явище розглядається як небезпечне, оскільки воно призводить до руйнування гнучких конструкцій. У цій роботі запропоновано використовувати явище гідроаеропружної нестійкості як основу для розроблення автономного датчика швидкості потоку. Такий підхід дозволяє створити енергонезалежний пристрій, здатний працювати в умовах, де застосування традиційної електроніки ускладнене або неможливе.

Робочим елементом запропонованого датчика є консольно закріплена пластина, спрямована уздовж потоку газу. При досягненні потоком критичної швидкості флатера, деформація пластини призведе до того, що п'єзоелектричний датчик на поверхні пластини спричинить електричний сигнал, що дозволить зафіксувати характеристики коливань.

Критична швидкість флатера залежить від геометрії, матеріалу пластини, параметрів потоку. У роботі здійснюється розрахунок масиву із 11 пластин з різною геометрією, які послідовно втрачають стійкість. Зокрема, для діапазону від 10 до 60 м/с із кроком 5 м/с кожна наступна пластина генерує сигнал при збільшенні швидкості потоку на наступник крок.

Таким чином, у роботі обґрунтовано концепцію дискретного автономного датчика швидкості потоку, що базується на масиві п'єзоелектричних консольних пластин. Використання явища гідроаеропружної нестійкості дозволяє відмовитись від зовнішніх джерел живлення. Подальшим етапом дослідження є проведення чисельного моделювання для оптимізації геометричних параметрів пластин та раціонального вибору матеріалу, здатного забезпечити необхідний ресурс роботи датчика при циклічних навантаженнях.

Список літератури

1. Карінцев І. Б., Павленко І. В. Гідроаеропружність : підручник. Суми Сумський державний університет, 2025. 230 с.
2. Писаренко Г. С. Опір матеріалів : підручник / Г. С. Писаренко, О. Л. Квітка, Е. С. Уманський ; за ред. Г. С. Писаренка. – 2-ге вид., доп. і переробл. – Київ : Вища школа, 2004. – 655 с.

ІНТЕГРАЦІЯ 3D-СКАНУВАННЯ ТА КОМП'ЮТЕРНОЇ МЕХАНІКИ У ЦИФРОВЕ ЗБЕРЕЖЕННЯ АРХІТЕКТУРНОГО СЕРЕДОВИЩА

*Титаренко І. В., асп. каф. містобудування Харківського національного
університету міського господарства ім. О. М. Бекетова, м. Харків*

Сучасні умови воєнного часу в Україні актуалізують проблему збереження історичного архітектурно-містобудівного середовища міст, зокрема їх центральних частин, що зазнають ризиків пошкодження або повної втрати. У цьому контексті цифровізація виступає як інструмент фіксації існуючого стану об'єктів та є засобом віртуальної реконструкції, аналізу та подальшого відтворення.

Об'єктом дослідження є історичний центр міста Суми, який поєднує збережені та втрачені елементи архітектурної забудови. Предметом виступають цифрові методи моделювання, аналізу та відтворення просторової структури міського середовища.

Основна увага зосереджена на інтеграції фотограмметрії, 3D-моделювання та інструментів комп'ютерної механіки для формування цілісного цифрового середовища.

Методологічною основою дослідження є поєднання польових обстежень, фотограмметричного сканування існуючих об'єктів та віртуального моделювання втраченої архітектури на основі архівних джерел (креслень, фотофіксації, історичних описів).

Фотограмметрія використовується для створення високоточних тривимірних моделей існуючих будівель, що дозволяє зафіксувати їх геометрію, конструктивні особливості та наявні пошкодження. Втрачені об'єкти відтворюються шляхом аналітичного моделювання із застосуванням принципів геометричної узгодженості та історичної достовірності. У межах секції комп'ютерної механіки особливого значення набуває інтерпретація цифрових моделей як аналітичних систем, придатних для подальшого інженерного аналізу.

Створені 3D-моделі (рис. 1) можуть використовуватися для впровадження в BIM-системи, дослідження стану конструкцій, оцінки стійкості історичних будівель до динамічних навантажень, зокрема вибухових впливів в містобудівному просторі міста, збору аналітичних даних стану та збереженості архітектури а також моделювання сценаріїв їх пошкодження та руйнування. Це дозволяє перейти від суто візуальної реконструкції до формування цифрових двійників архітектурних об'єктів, що інтегрують геометричні, матеріальні та фізико-механічні характеристики.



Рисунок 1 – Хмара точок, одержана під час реалізації фотограмметричного сканування забудов центральної частини м. Суми

Результати дослідження демонструють, що поєднання фотограмметрії, лазерного сканування та методів комп'ютерної механіки дозволяє створити багаторівневу цифрову модель історичного середовища, яка містить:

- точну геометричну фіксацію існуючих об'єктів;
- реконструкцію втраченої забудови;
- аналітичні моделі для інженерних розрахунків.

Такий підхід забезпечує можливість комплексного аналізу міського простору, включаючи оцінку його вразливості до зовнішніх впливів та обґрунтування рішень щодо збереження та подальшого відновлення.

Практичне значення роботи полягає у формуванні цифрової бази даних історичного центру міста Суми, яка може бути використана у процесах реставрації, реконструкції та післявоєнного відновлення.

Крім того, створені моделі можуть інтегруватися у BIM- та GIS-системи, використовуватися для наукових досліджень, освітніх цілей і формування віртуальних середовищ.

Результати одержані у межах виконання НДР «Наукові основи віртуальної реконструкції знищених об'єктів культурної спадщини для стратегії відновлення України» (ДР № 0125U000440)

ПОПІКСЕЛЬНА СЕМАНТИЧНА СЕГМЕНТАЦІЯ ЦИФРОВОГО ЗОБРАЖЕННЯ ПРИРОДНОЇ ЗАПОВІДНОЇ ЗОНИ

*Мироненко М. І., асистент кафедри комп'ютерних наук; Ковалевський С. О.,
аспірант, Сумський державний університет, м. Суми*

Охорона та збереження природно-архітектурних пам'яток регулюється законодавством України. Застосування безпілотних літальних апаратів (БПЛА) дозволяє автоматизувати процес картографування території заповідної зони і підвищити оперативність виявлення несанкціонованих порушень. Основним недоліком відомих методів семантичної сегментації є необхідність формування великої кількості зразків зображень наземних природних та інфраструктурних об'єктів, що пов'язано з значними матеріальними та часовими витратами.

Розглянемо результати семантичної сегментації цифрового зображення природо-архітектурного заповідника с. Зелений Гай Сумської обл., отримані при інформаційно-екстремальному машинному навчанні автономного БПЛА. Основна перевага цього методу полягає в тому, що він розробляється в рамках функціонального підходу до моделювання природного інтелекту, що наділяє його властивостями гнучкості та інтерпретованості.

Оскільки на зображенні заповідника розпізнавалося сім природних та інфраструктурних об'єктів, то машинне навчання здійснювалося за ієрархічною структурою даних у вигляді декурсивного бінарного дерева. Така структура даних дозволяє багатокласове машинне навчання звести до двохкласового для кожної страти декурсивного дерева. Водночас для кожної страти було реалізовано інформаційно-екстремальне машинне навчання з другим рівнем глибини. На першому рівні глибини оптимізувалися геометричні параметри гіперсферичних контейнерів класів розпізнавання, а на другому – контрольні допуски на ознаки розпізнавання. Машинне навчання здійснювалося за ітераційною процедурою пошуку глобального максимуму інформаційного критерію в допустимій області визначення його функції:

$$\delta^* = \operatorname{argmax}_{G_\delta} \{ \max_{G_E \cap G_d} \bar{E}(d) \}, \quad (1)$$

де $\bar{E}(d)$ – середнє значення інформаційного критерію, обчислене при поточному радіусі d контейнера класу розпізнавання X_m^o ; G_δ – область допустимих значень контрольних допусків на ознаки розпізнавання; G_E – область допустимих значень інформаційного критерію; G_d – область допустимих значень радіусів контейнерів класів розпізнавання.

Як критерій оптимізації параметрів машинного навчання розглядалася модифікована інформаційна міра Кульбака [1]. Водночас, запропоновано до типових вирішувальних правил додавати квантор, що дозволило підвищити точність сегментації цифрового зображення.

Результат попіксельної семантичної сегментації цифрового зображення території заповідника с. Зелений Гай Сумської обл. представлено на рис. 1.

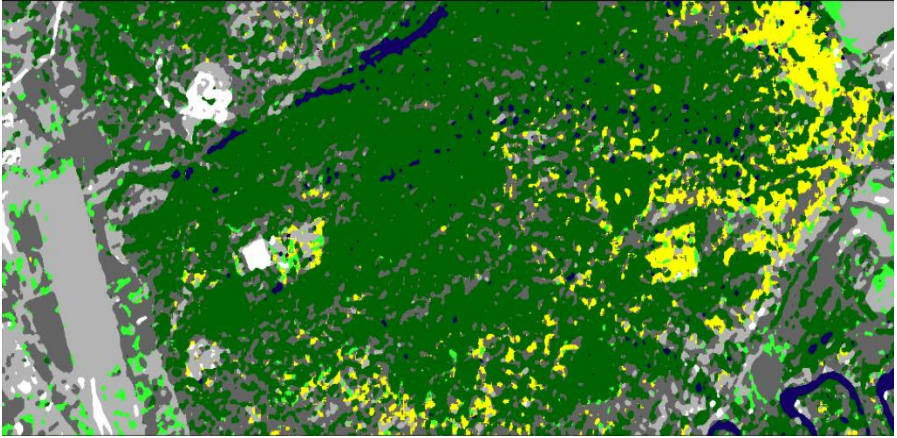


Рисунок 1 – Карта регіону спостереження

На рис. 1 зеленим кольором позначено хвойні породи лісу, а жовтим кольором – листвяні. Отже, візуальний аналіз показує високу подільну здатність розробленого методу попіксельної семантичної сегментації цифрового зображення регіону спостереження.

Список літератури

1. Довбиш А. С. Інтелектуальні інформаційні технології в електронному навчанні / А. С. Довбиш, А. В. Васильєв, В. О. Любчак. – Суми : Видавництво СумДУ, 2013. – 178 с.

Основні результати одержано у межах виконання науково-дослідної роботи «Наукові основи віртуальної реконструкції знищених об'єктів культурної спадщини для стратегії відновлення України» (держреєстрація № 0125U000440).

ФОРМУВАННЯ НАЦІОНАЛЬНО СВІДОМОГО ІНЖЕНЕРА В УМОВАХ ТРАНСФОРМАЦІЙНОГО РОЗВИТКУ УКРАЇНИ: ІНЖЕНЕРНО-ПЕДАГОГІЧНИЙ ПІДХІД

*Титаренко А. В., старший викладач, ВСП «Машинобудівний фаховий коледж
Сумського державного університету», м. Суми*

У сучасних умовах трансформації українського суспільства, що відбуваються під впливом глобалізаційних процесів, цифровізації та воєнних викликів, особливого значення набуває проблема формування національно свідомого інженера [1]. Інженер сьогодні виступає не лише висококваліфікованим фахівцем, а й активним суб'єктом соціальних змін, носієм цінностей, відповідальності та громадянської позиції.

Інженерна діяльність безпосередньо пов'язана з обороноздатністю країни, відновленням інфраструктури, енергетичною безпекою та технологічною незалежністю. У цьому контексті відчуття своєї національної ідентичності виступає не лише моральною категорією, а й професійною компетентністю, що визначає якість рішень і відповідальність за їх наслідки.

Філософський аспект національно-патріотичного виховання інженера полягає у гармонізації технократичного мислення із гуманістичними цінностями. Йдеться про формування цілісного світогляду, в якому професійна діяльність розглядається як служіння суспільству та державі. Національна ідентичність, культурна пам'ять і соціальна відповідальність стають ключовими складниками підготовки сучасного інженера.

У попередньому навчальному році було проведено соціологічне дослідження серед студентів ВСП «Машинобудівний фаховий коледж Сумського державного університету», присвячене визначенню рівня патріотизму майбутніх інженерів. Дослідження показало, що питання підвищення національно-патріотичної свідомості молоді є актуальним, особливо в умовах російсько-української війни, коли Україна захищає свою територіальну цілісність, незалежність та українську ідентичність [2].

Інженерна педагогіка ставить завдання навчання, виховання та розвитку майбутніх фахівців інженерного профілю. Формування професійно-технічних компетентностей майбутнього інженера в контексті національно-патріотичного виховання постає як системно організований педагогічний процес, спрямований на інтеграцію спеціальних знань (основ інженерної діяльності, стандартів безпеки, принципів сталого розвитку, історії та сучасного стану національної інженерної науки), практичних умінь (проекткування технічних рішень з урахуванням суспільних потреб, аналізу ризиків, забезпечення якості та надійності систем, участі у відновлювальних і інфраструктурних проєктах) та ключових компетентностей (інженерного

мислення, соціальної відповідальності, громадянської свідомості, етичної рефлексії та здатності до прийняття рішень в умовах невизначеності), що забезпечують готовність майбутнього фахівця реалізовувати професійну діяльність в інтересах держави та суспільства.

Серед викликів сьогодення також варто виокремити вплив глобалізаційних процесів, що часто нівелюють національні цінності, інформаційні загрози та маніпуляції, недостатню гуманітаризацію технічної освіти, а також домінування утилітарного підходу до підготовки фахівців. Усе це зумовлює необхідність перегляду освітніх стратегій і посилення виховного компоненту.

Практична реалізація ідей національно-патріотичного виховання інженерів передбачає впровадження міждисциплінарного підходу, зокрема, інтеграцію гуманітарних дисциплін (філософії, історії, етики) у професійну підготовку [3, 4], а також використання кейс-методів, що моделюють реальні ситуації морального вибору, залучення студентів до соціально значущих проєктів, наукову діяльність та співробітництво із дружніми до України державами та фахівцями, розвиток академічної доброчесності як прояву громадянської відповідальності тощо.

Важливим є також формування культури інженерної діяльності, що передбачає дотримання етичних норм, усвідомлення наслідків технічних рішень, орієнтацію на сталий розвиток. Значну роль відіграє приклад викладача як носія цінностей та організатора виховного середовища.

Таким чином, національно-патріотичне виховання інженера є необхідною умовою підготовки конкурентоспроможного, відповідального та соціально орієнтованого фахівця. Його реалізація сприяє зміцненню державності, розвитку інноваційного потенціалу країни та формуванню активного громадянського суспільства [5, 6].

Список літератури

1. Концепція національно-патріотичного виховання в системі освіти України: затв. наказом МОН України від 16.06.2015 № 641.
2. Титаренко А. Національно-патріотична свідомість сучасної молоді: результати соціологічного дослідження // Національна безпека України в освітній сфері: виклики, цінності, досвід: матеріали III Всеукр. наук.-практ. онлайн-конф. / за заг. ред. С. В. Драновської. Суми, 2025. 184 с.
2. Бех І. Д. Виховання особистості: підручник. Київ: Либідь, 2008. 848 с.
4. Андрущенко В. П. Філософія освіти XXI століття: пошук пріоритетів: монографія. Київ: Знання України, 2005. 320 с.
5. Закон України «Про освіту»: Закон України від 05.09.2017 № 2145-VIII.
6. Кремень В. Г. Філософія людиноцентризму в освітньому просторі: монографія. 2-ге вид. Київ: Т-во «Знання» України, 2011. 520 с.

КРИЗА ГНОСЕОЛОГІЇ У КОНТЕКСТІ РОЗВИТКУ СИСТЕМ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ

*Павленко І. В., професор кафедри комп'ютерної механіки
ім. В. Марцінковського, Сумський державний університет, м. Суми*

Стрімкий розвиток технологій штучного інтелекту (ШІ) трансформує сучасні підходи до отримання, інтерпретації та верифікації наукових знань [1]. Інженерна діяльність, яка традиційно спирається на достовірність даних, відтворюваність результатів і строгість доказової бази, опиняється перед новими викликами, пов'язаними з використанням інтелектуальних систем, що здатні генерувати правдоподібні, але не завжди достовірні результати. У цьому контексті особливо гостро постає проблема розмежування знання, отриманого шляхом фізичного експерименту, та даних, згенерованих ШІ.

Гносеологічний вимір цієї проблеми полягає у переосмисленні природи знання в умовах, коли джерелом інформації дедалі частіше виступають системи, позбавлені власного досвіду взаємодії з реальним світом, надаючи *ілюзії системності*. Це ставить під сумнів традиційні критерії надійності знань (емпірична перевірка, логічна узгодженість, відтворюваність результатів), що використовуються в інженерній практиці. Тому метою роботи є аналіз сучасних гносеологічних викликів, зумовлених розвитком ШІ, та окреслення можливих напрямів подолання *кризи достовірності наукових знань* під час досліджень технологічних систем.

У межах гносеологічного дискурсу наукове знання виникає з емпіричної взаємодії суб'єкта зі світом через дію, тоді як моделі ШІ залишаються на рівні вторинного знання, одержаного шляхом імітаційних моделювань, позбавленого власного досвіду, цілей та механізмів перевірки істинності. Це підтверджується багаторічним практичним досвідом застосування ШІ [2, 3].

У філософському сенсі ШІ не створює нове наукове знання, а межі між знаннями, моделюванням та статистичною перевіркою розмиваються. Як результат виникає *криза гносеології* – дестабілізація стандартів підтвердження достовірності знань за рахунок застосування систем штучного інтелекту. Це явище виникає тоді, коли існуючі інституції (наука, історія, право та ін.), які покладаються на об'єктивні докази, виявляють, що їхні стандарти спотворені результатами ШІ. Як результат, синтетично створені дані не відрізняються від емпіричних, і навіть архаїчний конструкт «*Credo quia video*» втрачає свою переконливість.

Вищезазначена проблема постає не лише у контексті теорії пізнання та філософії науки [4], а й у контексті забезпечення надійності даних та їх верифікації у межах цифрових моделей робочих процесів технологічних систем [5].

Наприклад, у матеріалознавстві ШІ може прогнозувати нові сплави, покриття, композиційні матеріали тощо; водночас, оскільки ШІ не виробляє власного досвіду, одержаний результат потребує обґрунтування й узагальнення шляхом емпіричної перевірки та пояснення відповідних механізмів. У машинобудуванні прогноз вібраційного стану машини потребує вирішення питання щодо можливості підтвердження достовірності одержуваних результатів без додаткових випробувань. У автономних технологічних системах на основі моделей ШІ необхідно обґрунтовувати оптимальність та, що не менш важливо, безпечність Artificial Decision-Making.

Таким чином, сучасним науковцям необхідно зважати на виклики сьогодення, пов'язані з некоректністю оброблення даних експериментальних досліджень та підміною причинно-наслідкової ланки «математична модель – експеримент – повторюваність» статистичними патернами (небезпека заміни верифікації правдоподібністю), що спричиняє *гносеологічний релятивізм та редуцію наукового пізнання*.

Одними із можливих шляхів для часткового, хоча і тимчасового, подолання вищезазначених проблем можуть бути *ревізія гносеологічної парадигми*, коли поряд із зовнішньою формою доказу надається підтвержене джерело та способи перевірки походження первинних FAIR-даних з верифікацією криптографічними методами блокчейну, гібридизація стандартів моделювань та оцінювання результатів при впровадженні кіберфізичних систем.

Список літератури

1. Bostrom, N. (2014). *Superintelligence: Paths, dangers, strategies*. Oxford University Press, UK.
2. Sutton R., Barto A. G. (2014). *Reinforcement learning: An introduction*. The MIT Press, UK.
3. Pavlenko I. et al. (2019). Parameter identification of hydro-mechanical processes using artificial intelligence systems. *International Journal of Mechatronics and Applied Mechanics*, Vol. 5, pp. 19–26.
4. Chalmers, A. F. (2013). *What is this thing called science?* Open University Press, UK.
5. Floridi, L. (2011). *The philosophy of information*. Oxford University Press, UK.

Доповідь зроблена у межах наукового напрямку «Нова парадигма розроблення інтелектуальних систем параметричної ідентифікації технологічних процесів».

**СЕКЦІЯ «ГІДРАВЛІЧНІ МАШИНИ
І ГІДРОПНЕВМОАГРЕГАТИ»**

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВІЛЬНОВИХРОВОГО НАСОСА

*Панченко В. О., доц. каф. прикладної гідроаеромеханіки;
Петренко С. С., аспірант; Ігнатенко С. О., студент,
Сумський державний університет, м. Суми*

Широко відомі конструкції вільновихрових насосів, що здатні перекачувати рідинні суміші, які містять у своєму складі великі за розміром тверді та довгі волокнисті домішки. Проте такі насоси мають й суттєвий недолік – низьке значення коефіцієнту корисної дії.

В основу дослідження поставлена задача створення насосу, який забезпечує здатність перекачування рідин, що містять великі за розміром або довгі волокнисті домішки, за умови збереження високого рівня ефективності (ККД насоса) шляхом удосконалення конструкції насоса, а саме – підвідного патрубку.

У запропонованій конструкції вільновихрового насоса потік рідини набуває кутової швидкості обертання ω_r за рахунок взаємодії як з робочим колесом, так і з спіральними каналами у підвідному патрубку. Тобто ω_r такого насоса буде більшою, ніж у насоса без напрямних лопатей у підвідному патрубку, а отже більшим буде й рівень його ефективності (ККД насоса).

Пропонований вільновихровий динамічний насос (рис. 1) містить корпус 1 із вихровою камерою 2, вхідним 3 та вихідним 4 патрубками, встановлене на валу 5 робоче колесо 6. На внутрішній поверхні вхідного патрубку 3 виконані спіральні канали 7.

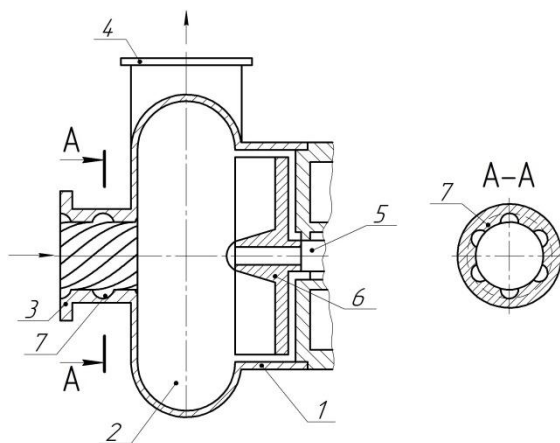


Рисунок 1 – Вільновихровий насос

ВІДЦЕНТРОВИЙ НАСОС З МЕХАТРОННИМ ПРИСТРОЄМ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ ПОДАЧІ

*Панченко В. О., доц. каф. прикладної гідроаеромеханіки;
Лисенко Д. Р., аспірант; Ядаменко А. О., студентка;
Сумський державний університет, м. Суми*

Відомий спіральний відвід відцентрового насоса, що містить спіральну камеру та дифузор, виконані у литих частинах корпусу насоса, який оснащений додатковою камерою, виконаною в корпусі, яка відокремлена від спіральної камери гнучкою мембраною, герметично з'єднаною з корпусом, та має патрубок для заповнення її технічною рідиною для підтримання необхідного тиску (патент України 113477, опубл. 25.01.2017, бюл. № 2).

Недоліком даної конструкції є відсутність механізму автоматичного регулювання необхідного значення витрати насоса.

В основу дослідження поставлена задача створення конструкції відцентрового насоса, яка забезпечує здатність автоматичного регулювання з метою підтримання заданого значення подачі насоса.

Поставлена задача вирішується тим, що у описаному вище відцентровому насоса, патрубок для заповнення додаткової камери технічною рідиною з'єднаний трубопроводом з мехатронним пристроєм, до складу якого входять витратомір, блок обробки і керування, лінійний сервопривод, гідроциліндр з поршнем, з'єднаним з лінійним сервоприводом за допомогою штоку.

Завдяки тому, що у запропонованій конструкції відцентрового насоса додатково встановлений мехатронний пристрій з'явилася можливість попередньо встановити необхідне значення подачі насоса, а потім під час роботи насоса вимірювати фактичне значення його подачі та за необхідності (у разі відмінності виміряного та встановленого значень подачі насоса) коригувати режим роботи насоса шляхом зміни геометрії спірального відводу.

Відцентровий насос містить обертовий вал 1 з відцентровим робочим колесом 2, спіральний відвід 3 з вихідним патрубком 4, кришку 5 з вхідним патрубком 6. Спіральний відвід 3 містить спіральну камеру 7 та дифузор 8, камеру 9, у яку через патрубок 10 подається технічна рідина. Камера 9 відокремлена від спіральної камери 7 гнучкою мембраною 11, яка одночасно є стінкою спіральної камери 7. Патрубок 10 з'єднаний трубопроводом 19 з мехатронним пристроєм 12, до складу якого входять витратомір 13, блок 14 обробки і керування, лінійний сервопривод 15, гідроциліндр 16 з поршнем 17, з'єднаним з лінійним сервоприводом 15 за допомогою штоку 18.

Відцентровий насос працює наступним чином.

Під час роботи відцентрового насоса перекачувана рідина потрапляє у насос через вхідний патрубок 4. За рахунок силової взаємодії потоку рідини з робочим колесом 2, потік рідини отримує додаткову енергію і під дією відцентрової сили виштовхується у спіральну камеру 7, де відбувається

зменшення моменту швидкості потоку, а потім у дифузор 8, де відбувається перетворення кінетичної енергії потоку у енергію тиску, і далі рухається у напірний трубопровід. Витратомір 13 вимірює значення витрати рідини, яка виходить з насоса і передає інформацію до блока обробки і керування 14. Блок керування 14 опрацьовує отриману інформацію і за необхідності (якщо виміряне значення витрати рідини відрізняється від попередньо встановленого значення) передає сигнал керування на лінійний сервопривод 15, який через шток 18 переміщує поршень 17, створюючи необхідний тиск у гідроциліндрі 16. Через трубопровід 19 і патрубок 10 тиск з гідроциліндру передається у камеру 9, який і змушує гнучку мембрану 11 зайняти положення, позначене штриховою лінією. При цьому пропускна здатність відводу змінюється і відповідно до нього змінюється витрата рідини перекачуваної насосом.

Оскільки за рахунок зміни геометрії проточної частини відводу оптимум ККД зміщується, регулювання подачі не призводить до зменшення рівня ККД.

Запропонована конструкція відцентрового насоса забезпечує автоматичне регулювання подачі насоса зі збереженням рівня його економічності.

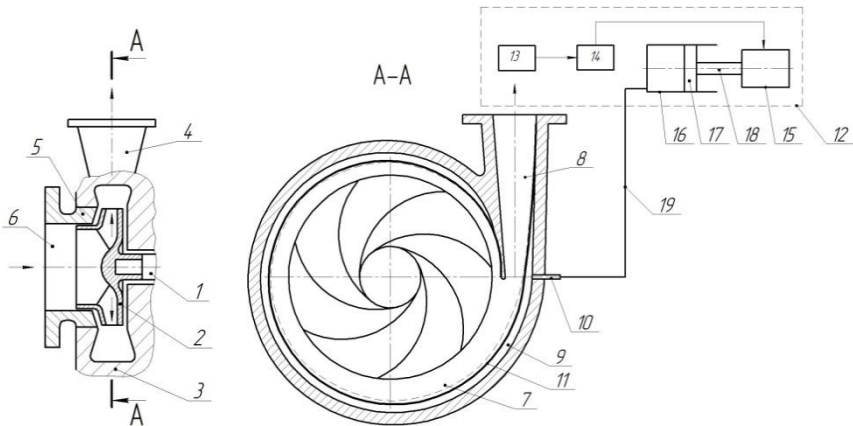


Рисунок 1 – Відцентровий насос з мехатронним пристроєм автоматичного регулювання подачі

ПРОБЛЕМИ ПЕРЕКАЧУВАННЯ ГАЗОРІДИННИХ СУМІШЕЙ ВІДЦЕНТРОВИМИ НАСОСАМИ

*Зеленський П. І., студ. гр. ІМ-21/Ігм; Колісниченко Е. В., доц. каф. ПГМ;
Обравіт С. Ю., студ. гр. ІМ-21/Ігм, Сумський державний
університет, м. Суми*

В сучасному світі багато машинобудівних галузей (енергетична, нафтовидобувна, хімічна та інш.) стикаються з проблемою транспортування рідин, насичених повітрям або газами. Річ у тому, що транспортування таких рідин відбувається, як правило, відцентровими насосами, які є дуже чутливими до об'ємної долі газової складової в таких рідинах, що також називаються гідросумішами. Наявність газової складової в гідросуміші призводить до значного зниження параметрів відцентрових насосів, що перекачують цю гідросуміш.

Наявність газової складової в гідросуміші призводить до погіршення гідродинамічних характеристик насоса. Збільшення об'ємної долі газової фракції в гідросуміші призводить до зниження її густини, суцільності потоку порушується, в результаті чого робота насоса відбувається на нестійкому режимі, його параметри починають «коливатися» у широкому діапазоні.

Подальше збільшення газової складової призводить до повного розриву суцільності потоку внаслідок утворення газової бульби, що повністю перекриває прохідні канали проточної частини насоса і блокує подальший рух рідини.

Падіння тиску в проточній частині насоса є також наслідком збільшення газової складової рідини, що перекачується. В результаті падіння тиску виникає ще одне негативне явище – кавітація, яке викликає критичні руйнування робочих поверхонь проточної частини насоса з подальшим зниженням надійності і довговічності його роботи.

Через те, що газові та рідинні фракції під час роботи насосу розподіляються нерівномірно (через різницю їх густин), виникають дисбалансні та вібраційні явища, які, в свою чергу, призводять до різкого зростання навантаження на опори ротора насоса та його ущільнення. В подальшому це може стати причиною аварійної зупинки насоса.

З метою боротьби з негативними явищами, що виникають під час роботи відцентрових насосів на газорідинних сумішах інженери та дослідники намагаються знайти оригінальні технічні рішення, починаючи з встановлення перед насосами дегазаторів і, закінчуючи модернізацією його проточних частин.

Науковцями кафедри ПГМ СумДУ пропонується використання робочих коліс зі зменшеною кількістю їх лопатей. Така конструкція дозволить збільшити об'ємну долю газової складової у гідросуміші до 40% за рахунок збільшення об'єму проточної частини робочого колеса.

ENHANCING CANTILEVER PUMP PERFORMANCE THROUGH INCREASED ROTATIONAL FREQUENCY

Bondarenko O. O., Ph.D. student, group A-35/MB, Sumy State University, Sumy

The progressive reduction in the cost of electronic variable frequency drives for industrial electric motors allows for the improvement of the technical and economic characteristics of various pump types. This is achieved not only through energy-efficient regulation, which has already become widespread, but also by increasing the rotational speed beyond 3000 rpm – a limit previously imposed by the mains power frequency during direct-on-line motor starting.

The following advantages of increasing the rotational speed for centrifugal pump units should be highlighted:

1. Reduction in dimensions and weight, which, in turn, leads to lower manufacturing costs.
2. For multistage pumps – a reduction in the number of stages.
3. For pumps with a low specific speed n_s – the opportunity to increase efficiency by optimizing n_s .
4. For single-stage pumps – expansion of the parametric ranges toward significantly higher heads.

One effective direction could be the expansion of the product lines of simple and low-cost single-stage cantilever pump units, including close-coupled (monoblock) designs, by increasing the rotational speed up to 6000 rpm. This would allow for the partial replacement of more complex and expensive multistage machines. For example, with typical specific speed values for K-type pumps around 70 (which ensures sufficient efficiency), it is possible to achieve Q/H parameters of 12.5/50, 25/80, or 50/125. These values partially overlap with the performance field of double-bearing multistage sectional centrifugal pumps.

Among the disadvantages of high-speed pumps, the following should be noted:

1. Deterioration of cavitation characteristics – in some cases, this makes increasing the speed impossible.
2. Increased erosive wear in the flow passage and seals – this is mitigated by reducing diameters and, consequently, the relative velocities of the surfaces.
3. Challenges with bearing and thrust units – these primarily concern large-scale units.
4. Rotor and unit dynamic stability issues – solved in most cases through structural design measures.
5. Lack of mass-produced electric motors at competitive prices.

Regarding high-speed electric motors for budget-friendly pumps, reference is made to study [1], which proves the operability of the active part of mass-produced asynchronous motors of the AIR series (Ukrainian manufacture) without a significant increase in electromagnetic losses up to a frequency of 100 Hz, corresponding to a synchronous speed of 6000 rpm for a two-pole motor.

Study [2] demonstrates the feasibility of long-term operation of such a motor with a nominal power of $P = 7.5\text{kW}$ at $n = 3000$ rpm, reaching $n = 6000$ rpm and $P = 13\text{kW}$ by switching the windings from “star” to “delta” configuration, installing high-quality bearings, re-balancing the rotor, and replacing the external fan. Thus, the problem of a budget high-speed drive can be solved in cooperation with domestic motor developers and manufacturers.

Study [2] also proves the possibility of ensuring dynamic stability and vibrational reliability of cantilever pumps at rotational speeds up to 9000 rpm through simple structural improvements, mainly concerning the pump’s flow passage seals. For close-coupled pumps, no vibration issues are predicted.

The development of standardized size ranges is proposed in accordance with ISO 2858 and ISO 5199 standards, maximizing the use of components and structural elements from existing pump units.

List of references

1. Voytekh, O. A., Popovych, O. M. (2003). Vybir ta adaptatsiia seriinykh asynkhronnykh dvyhuniv dlia roboty vid dzherel rehuliuiei moi chastoty [Selection and adaptation of serial induction motors for operation from adjustable frequency sources]. Pratsi Instytutu elektrodynamiky NAN Ukrainy [Proceedings of the Institute of Electrodynamics of the NAS of Ukraine, Vol. 3, pp. 34-39.

2. Zubakhin, O. M. (2011). Using hydrodynamic effects in gap seals to increase the technical level of centrifugal pumps. CSc. Thesis. Sumy State University, Sumy, Ukraine.

ОБҐРУНТУВАННЯ ВИБОРУ МЕТОДУ Й АПАРАТУРНОГО ОФОРМЛЕННЯ ПЕРШОГО КОНТУРУ ОХОЛОДЖЕННЯ МАЛОГО МОДУЛЬНОГО РЕАКТОРА

*Ратушний О. В., доц. каф. ПГМ; Хованський С. О., доц. каф. ПГМ;
Ляпоценко О. О., проф. каф. XI; Острога Р. О., зав. каф. XI, Сумський
державний університет, м. Суми; Сімейко К. В., п. н. с., Інститут проблем
безпеки АЕС НАН України, м. Київ; Сотник М. І., зав. каф. ПГМ;
Рибальченко В. М, інженер, Маренок В. М., інженер,
Сумський державний університет, м. Суми*

Розвиток малих модульних реакторів (Small Modular Reactors, SMR) є одним із перспективних напрямів сучасної ядерної енергетики, що зумовлено потребою у підвищенні гнучкості, безпеки та енергонезалежності енергосистем. Для SMR номінальної електричної потужності 55 МВт (номінальна теплова потужність реактора 180 МВт) прийнято двоконтурну (двопетлеву) схему. На даному етапі досліджень основними задачами є обґрунтування вибору методу й апаратурного оформлення першого контуру охолодження реакторного блоку, який виконує функцію відведення тепла від активної зони реактора та передачі його до парогенератора. Основними вимогами до системи є забезпечення високої надійності обладнання та відповідність вимогам ядерної безпеки. Тому в якості базового методу тепловідведення обрано однофазний теплоносій (вода під тиском) у замкненому контурі з примусовою циркуляцією. Такий підхід є найбільш апробованим у світовій практиці для SMR типу PWR (Pressurized Water Reactor) і забезпечує відсутність кипіння в активній зоні, що суттєво підвищує безпеку експлуатації. Вибір примусової циркуляції обумовлений необхідністю забезпечення стабільної витрати теплоносія та ефективного керування тепловими режимами реактора. Апаратурне оформлення першого контуру включає систему охолодження реактора, головні циркуляційні насоси (ГЦН), парогенератори та систему трубопроводів. Конструкція парогенератора пропонується вертикальна з U-подібними трубами та природною циркуляцією у вторинному контурі. На підставі результатів попередніх теплотехнічних та гідравлічних розрахунків орієнтовно визначено і обґрунтовано вибір основних проєктних режимних параметрів контуру.

Таким чином, обрані рішення для першого контуру SMR типу PWR забезпечують належний рівень безпеки, енергоефективності та надійності й відповідають сучасним тенденціям розвитку ядерної енергетики, з можливістю застосування в перспективних малих модульних реакторах.

Робота виконана за підтримки МОН України проєкту прикладного дослідження ДР № 0126U000865 «Розроблення головного циркуляційного насосу і парогенератора для малого модульного реактора (SMR)».

СУЧАСНІ КОНСТРУКТИВНІ РІШЕННЯ ТА НАПРЯМИ ВДОСКОНАЛЕННЯ ВІЛЬНОВИХРОВИХ НАСОСІВ (ЗА РЕЗУЛЬТАТАМИ ПАТЕНТНОГО ОГЛЯДУ)

*Муштай М. В., аспірант; Кондусь В. Ю., доц. каф. ПГМ; Куліков О. А., м. н. с. НДЧ; Андрусак В. О., м. н. с. НДЧ; Твердохлеб А. С., аспірант;
Сумський державний університет, м. Суми*

Вільновихрові насоси (рис. 1) належать до класу лопатевих гідравлічних машин, робочий процес яких базується на взаємодії основного потоку рідини з циркуляційними вихровими структурами у робочій камері. На відміну від класичних відцентрових насосів, передача енергії рідині у таких агрегатах відбувається не лише за рахунок безпосереднього контакту потоку з лопатями робочого колеса, а й через формування інтенсивної циркуляції у периферійній зоні камери. Така схема забезпечує високу пропускну здатність щодо забруднених середовищ і знижує ризик засмічення проточної частини.

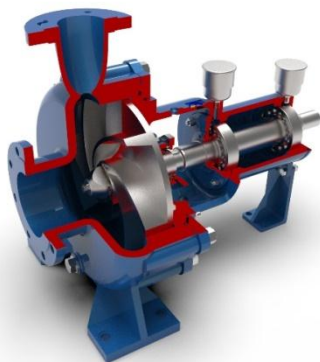


Рисунок 1 – Конструктивна схема вільновихрового насоса типу «TURO»

Завдяки наявності безлопатевої порожнини між робочим колесом і корпусом значна частина потоку проходить через насос без прямого контакту з лопатями. Це дозволяє ефективно транспортувати рідини з твердими включеннями, абразивними частинками та довгими волокнами. Саме тому вільновихрові насоси широко застосовуються у системах водовідведення, каналізаційних установках, гірничій та харчовій промисловості. Водночас така організація течії супроводжується підвищеними гідравлічними втратами, що обмежує коефіцієнт корисної дії і стимулює пошук нових конструктивних рішень.

У роботі виконано узагальнений аналіз сучасних інженерних підходів до вдосконалення вільновихрових насосів на основі патентних джерел. Проведений огляд показує, що більшість технічних рішень спрямована на оптимізацію геометрії робочого колеса та проточної частини з метою

стабілізації вихрової структури потоку. Значна увага приділяється профілю лопатей, їх кількості та взаємному розташуванню. У низці конструкцій застосовується поєднання лопатей різної довжини, що дозволяє зменшити локальні зони рециркуляції та підвищити рівномірність енергетичного обміну між колесом і потоком.

Окрему групу розробок становлять рішення, спрямовані на підвищення здатності насосів працювати з абразивними або волокнистими середовищами. У таких конструкціях використовуються спеціальні геометричні форми лопатей, проміжні робочі елементи або додаткові подрібнювальні пристрої на вході. Подібні технічні рішення зменшують ймовірність намотування волокон та сприяють безпечному транспортуванню твердих включень через робочу камеру.

Важливим напрямом удосконалення є зменшення гідродинамічних пульсацій і стабілізація режимів роботи агрегату. Для цього застосовуються модифіковані елементи спіральної камери, спеціальні конструкції язичка корпусу та додаткові лопаті на тильній поверхні робочого колеса, які знижують осьове навантаження на вал і підвищують надійність роботи насоса.

Аналіз патентних матеріалів дозволив виділити кілька основних груп конструктивних рішень. До них належать геометрична оптимізація робочого колеса, удосконалення проточної частини корпусу, впровадження допоміжних елементів для роботи зі складними середовищами, а також технологічні рішення, пов'язані з удосконаленням способів виготовлення коліс. Узагальнення отриманих результатів свідчить, що подальший розвиток вільновихрових насосів пов'язаний із поєднанням експериментальних і чисельних досліджень структури потоку, а також із використанням сучасних методів оптимізації геометрії проточної частини.

Важливим напрямом сучасних досліджень є застосування чисельного моделювання для аналізу структури потоку у вільновихрових насосах. Використання методів обчислювальної гідродинаміки дозволяє дослідити розподіл швидкостей і тиску у робочій камері, визначити зони рециркуляції та оцінити втрати енергії при різних режимах роботи. Результати таких досліджень свідчать, що ефективність насоса значною мірою визначається співвідношенням між геометрією робочого колеса, об'ємом вихрової камери та положенням колеса відносно корпусу. Чисельні моделі дозволяють оцінити вплив цих параметрів ще на етапі проектування і зменшити обсяг експериментальних випробувань.

Отримані результати можуть бути використані при розробленні нових конструкцій вільновихрових насосів та при формуванні рекомендацій щодо вибору геометричних параметрів робочих органів залежно від умов експлуатації.

Робота виконана в рамках держбюджетної НДР (№ 0126U000718).

АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ШЛЯХИ ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ВІЛЬНОВИХРОВИХ НАСОСІВ

Твердохлеб А. С., аспірант; Кондусь В. Ю., доц. каф. ПГМ; Куліков О. А., м. н. с. НДЧ; Андрусяк В. О., м. н. с. НДЧ; Муштай М. В., аспірант, Сумський державний університет, м. Суми

Огляд сучасної науково-технічної літератури свідчить про стабільний інтерес до використання вільновихрових насосів (СВН) у різних галузях промисловості та комунального господарства завдяки високій надійності при перекачуванні забруднених і багатозадачних середовищ. Проте, аналіз останніх публікацій виявляє суттєву наукову проблему: незважаючи на широке застосування такого обладнання, його загальний коефіцієнт корисної дії залишається недостатньо високим, а фізика передачі енергії у вихровому потоці вивчена не повною мірою.

Формування цілісного уявлення про поточний стан вивчення гідравлічних процесів у СВН дозволяє визначити ключові прогалини знань. Зокрема, у світовій практиці бракує універсальних та достовірних математичних моделей, які б адекватно описували згаданий механізм обміну енергією в широкому діапазоні коефіцієнтів швидкохідності ($n_s = 30-220$). Більшість праць зосереджена на вузьких емпіричних випробуваннях окремих конструкцій, ускладнюючи проектування ефективних проточних частин.

Вирішення цієї проблеми вимагає переходу від локальних експериментів до розробки та верифікації інноваційних способів прогнозування характеристик СВН шляхом їх комплексного аналізу. Впровадження надійних інтерполяційних алгоритмів розрахунку дасть змогу подолати існуючі теоретичні обмеження.

Додатково, сучасні тенденції розвитку цифрових технологій та обчислювальної гідродинаміки створюють нові можливості для підвищення точності моделювання вихрових потоків у СВН. Використання методів чисельного моделювання дозволяє інтегрувати великі обсяги експериментальних даних, оптимізувати параметри конструкцій і передбачати поведінку насоса в умовах змінних експлуатаційних навантажень. Такий підхід відкриває перспективи для прискореного створення енергоефективних та універсальних насосів нового покоління.

Як показує оцінка тенденцій розвитку насособудування, усунення виявлених наукових прогалин створює основу для формування сучасних параметричних рядів агрегатів, адаптованих до різних умов експлуатації. Розробка нового покоління енергоефективних гідравлічних машин є ключовим завданням для промисловості України у процесі повоєнного відновлення та впровадження екологічно безпечних і енергоощадних технологій.

Робота виконана в рамках держбюджетної НДР (№ 0126U000718).

ЕНЕРГЕТИЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ТА НАДІЙНІСТЬ ВІДЦЕНТРОВОГО НАСОСА ПРИ ЗМІНІ ЧАСТОТИ ОБЕРТАННЯ РОТОРА

Глянько В. С., аспірант, Сумський державний університет, м. Суми

Підвищення енергоефективності насосного обладнання є одним із ключових напрямів модернізації систем водопостачання, теплопостачання та промислових гідравлічних систем. Значна частка енергоспоживання в цих системах припадає саме на відцентрові насоси. Одним із ефективних способів оптимізації їх роботи є регулювання продуктивності шляхом зміни частоти обертання ротора за допомогою частотних перетворювачів. У тезах розглянуто вплив зміни частоти обертання ротора на енергетичні характеристики та надійність роботи відцентрового насоса [1].

Робота відцентрового насоса описується законами подібності: подача пропорційна частоті обертання робочого колеса, напір – квадрату частоти, а споживана потужність – її кубу. Зменшення швидкості обертання дозволяє знизити енергоспоживання та втрати енергії в системах зі змінним гідравлічним навантаженням.

Застосування частотно-регульованого електропривода забезпечує гнучке керування режимами роботи насосного агрегату та підтримання оптимальної робочої точки насоса поблизу області максимального коефіцієнта корисної дії. Це дозволяє знизити витрати електроенергії, гідравлічні втрати та підвищити енергетичну ефективність системи. Крім того, зміна частоти обертання ротора підвищує надійність обладнання: плавний пуск і зупинка зменшують механічні навантаження, а зниження швидкості обертання зменшує вібрації, гідравлічні удари та кавітацію [2].

Водночас значне зниження частоти обертання може погіршувати охолодження електродвигуна, знижувати коефіцієнт корисної дії та зміщувати робочу точку насоса в область нестійких режимів, тому діапазон регулювання частоти слід визначати з урахуванням характеристик насосного агрегату та гідравлічної системи [1].

Отже, регулювання продуктивності відцентрових насосів шляхом зміни частоти обертання ротора є ефективним засобом підвищення енергоефективності та надійності насосного обладнання, що дозволяє оптимізувати режими роботи насосних установок та зменшити енергоспоживання.

Список літератури

1. Bordeasu D., Dragan F., Filip I. et al. Estimation of Centrifugal Pump Efficiency at Variable Frequency for Irrigation Systems. Sustainability. 2024. № 16(10), 4134. <https://doi.org/10.3390/su16104134>
2. Moshnoriz M., Tkachuk A., Moshnoriz M., Gribovskij O. Efficiency of electric drive of a centrifugal pump unit. Machinery and Energetics. 2024. № 15 (4). P. 94–105. <https://doi.org/10.31548/machinery/4.2024.94>

МЕТОДИ РЕГУЛЮВАННЯ АКСІАЛЬНО-ПОРШНЕВИХ НАСОСІВ У РЕЖИМІ СТАЛОЇ ПОТУЖНОСТІ

*Титаренко Е. С., студ. гр. ІМ-21/Ізм; Кулініч С. П., доц. каф. ПГМ,
Сумський державний університет, м. Суми*

Гідравлічний привід забезпечує передачу енергії від привідного двигуна до робочого органу машини за допомогою рідини під тиском. Він має найкращі масо-габаритні характеристики виконавчих механізмів, забезпечує плавне регулювання швидкості робочого органу машини, високу точність позиціонування та захист від перевантажень [1].

Більшість машин, які використовують гідравлічний привід працюють в умовах змінного навантаження та швидкості руху виконавчих механізмів. Ідеальною є характеристика, яка при будь-якій зміні режимів роботи механізму забезпечує роботу привідного двигуна при сталій потужності ($N_{дв} = const$). Для насосів ця умова має вигляд

$$pQ = const, \tag{1}$$

де p – тиск; Q – подача насоса.

На рис. 1 а наведені характеристики насосу з регулятором потужності.

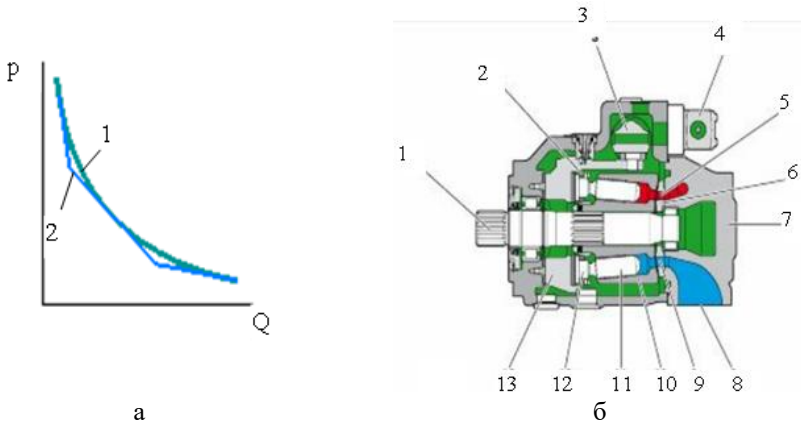


Рисунок 1 – Аксиально-поршневий насос: а – характеристики (1 – ідеальна; 2 – реальна з 3 –пружинним регулятором); б – конструкція (1 – ведучий вал; 2 – притискає пластина; 3 – поршень регулятора потужності; 4 – пропорційний розподільник; 5 – лінія високого тиску; 6 – торцевий розподільник; 7 – кришка задня; 8 – канал підвідний; 9 – лінія всмоктування; 10 – блок циліндрів; 11 – поршень; 12 – башмак; 13 – диск поворотний)

Подача насосу залежить від частоти обертання n валу насоса та його робочого об'єму V :

$$Q = Vn. \tag{2}$$

З формул (1) і (2) отримуємо

$$V = \frac{const}{p}.$$

Аксіально-поршневі насоси з похилим диском (рис. 1 б) це насоси, у яких регулювання подачі (регулювання робочого об'єму) відбувається за рахунок зміни кута нахилу диску.

Механізми регулювання кута нахилу поворотного диску використовують такі методи керування; механічний, гідравлічний, електронний. Для механічного регулювання кута нахилу диску використовують двох- або трьохпружинні блоки, які дозволяють апроксимувати ідеальну характеристику 1 (рис. 1 а) відрізками прямих – характеристика 2.

Механізм з гідравлічним керуванням кутом нахилу поворотного диску аксіально-поршневого насоса являє собою гідравлічний привід [2]. Робота такого регулятора також забезпечує апроксимовану характеристику. Це зумовлено тим, що чутливим елементом є плунжер золотникового розподільника, навантажений пружинами.

Регулювання кута нахилу диску пропорційним електрогідравлічним розподільником (рис. 1 б) дозволяє досить точно відтворити ідеальну характеристику аксіально-поршневого насоса з похилим диском [3]. Це зумовлено використанням датчиків для визначення поточних умов роботи (тиску, кута нахилу диска). Застосування пропорційного електрогідравлічного розподільника забезпечує високу точність, швидкість реакції, можливість автоматизації, гнучкість налаштувань режимів роботи насоса.

Список літератури

1. Гречко С. Аналіз механізмів регулювання подачі регульованих аксіально-поршневих насосів Вісник Хмельницького національного університету, № 5, 2024 (341). С. 177–181.

2. Аврунін Г. А. Аналіз характеристик аксіально-поршневих гідромашин для приводів засобів аеродромно-технічного забезпечення. Вісник ХНАДУ. 2021. № 95. С. 15–25.

3. Буренніков Ю. А. Аналіз переваг та недоліків існуючих регуляторів подачі та потужності в системі керування аксіально поршневого регульованого насоса. Вісник Вінницького політехнічного інституту. 2012. № 5. С. 107–113.

МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ У ЕЛЕКТРОГІДРАВЛІЧНИХ НАСОСНИХ СИСТЕМАХ З УРАХУВАННЯМ ВПЛИВУ СИЛ ТЕРТЯ

*Коробова С. А., аспірантка, Сумський державний університет, м. Суми;
Голенко С. О., аспірант, Національний технічний університет «Харківський
політехнічний інститут»; Хованський С. О., доцент кафедри прикладної
гідроаеромеханіки, Сумський державний університет, м. Суми;
Гречка І. П., Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут», м. Харків*

Сучасне машинобудування вимагає підвищення точності, енергоефективності та ресурсу машин, що зумовлює необхідність оптимізації гідроприводів і зниження втрат у складних режимах навантаження [1]. Основні напрямки підвищення ефективності гідравлічних і електрогідравлічних систем включають оптимізацію структури керування, зменшення втрат у каналах і впровадження енергоощадних конфігурацій приводів. У нафтогазовидобувній галузі, особливо на завершальних стадіях експлуатації свердловин із низьким дебітом, перевагу мають насоси об'ємного принципу дії, зокрема штангові глибинні установки [2]. Традиційні штангові приводи ефективні переважно для вертикальних свердловин, тоді як похиле або складнопрофільне розташування спричиняє тертя, знос та зниження ККД обладнання. Розробка свердловинних електрогідроприводних насосних агрегатів дозволяє уникнути розміщення приводів на поверхні та забезпечує енергоефективну роботу в нахилених свердловинах. Локалізовані джерела енергії та сучасні алгоритми керування знижують споживання енергії та підвищують адаптивність системи [3]. Використання насосів об'ємного принципу з електрогідроприводом є технічно доцільним і економічно обґрунтованим для стабільного видобування нафти.

Метою роботи є підвищення ефективності та надійності видобування нафти через обґрунтування конструктивних і експлуатаційних параметрів таких агрегатів. Наукова новизна полягає в комплексному аналізі факторів, що впливають на роботу агрегату, та впровадженні технічних рішень для зниження тертя, підвищення енергоефективності й ресурсу насосної установки у свердловинах складної орієнтації.

Розрахунок динаміки свердловинного електрогідроприводного насосного агрегату дозволяє оптимізувати параметри перемикаючих гідророзподільників у кришках гідроциліндра, які разом із командним виконують роль гальмівних пристроїв поршня для безударної зупинки.

На основі проведених розрахунків побудовано графік залежності переміщення поршня виконавчого гідроциліндра від часу (рис. 1). Аналіз показує, що для забезпечення безударної роботи механізму тривалість гальмування має бути більш ніж удвічі довшою за час розгону. При цьому

максимальна швидкість поршня досягає 0,68 м/с, а середня швидкість руху становить 0,231 м/с. Графіки перехідних процесів у системі гідроприводу наведені на рис. 3.

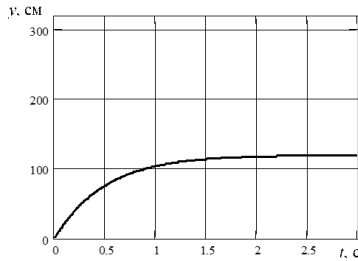


Рисунок 1 – Зміна шляху гідроциліндра від часу

На рис. 2 представлені графіки перехідних процесів гідроприводу, які демонструють зміну витрати через клапан та коливання тиску в системі.

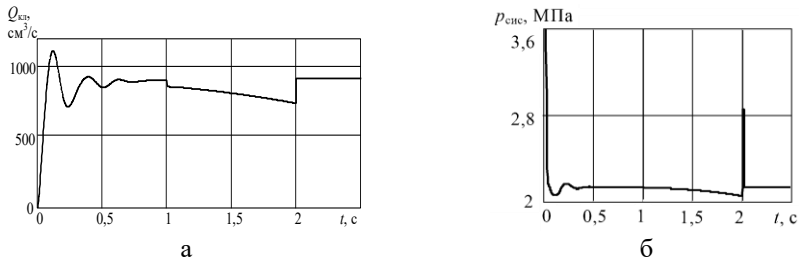


Рисунок 2 – Графіки перехідних процесів у системі гідроприводу: а – зміна витрати через клапан; б – зміна тиску в системі

У результаті досліджень обґрунтовано доцільність використання свердловинних електрогідроприводних насосів у складнопрофільних свердловинах, де традиційні системи мають значні енерговтрати та знос. Встановлено, що динаміка гідроприводу з рухомими золотниками не має аналітичного розв’язку, тому застосовуються чисельні методи. Доведено, що безударний режим роботи забезпечується, коли час гальмування більш ніж удвічі перевищує час розгону.

Список літератури

1. Stryczek J., Warzyńska U. (eds.). Advances in hydraulic and pneumatic drives and control 2020. Cham : Springer, 2021. 454 p.
2. Stryczek J., Warzyńska U. (eds.). Advances in hydraulic and pneumatic drives and control 2023. Cham : Springer, 2024. 328 p.
3. Abdullah A. M., Ali H. H., Al-Qassar A. A. Experimental and theoretical study of a novel hydraulic fluid flow control method // International Journal of Heat and Technology. 2024. Vol. 42, No. 3. P. 965–972.

**СЕКЦІЯ «ПРИКЛАДНА
ГІДРОАЕРОМЕХАНІКА»**

МОДЕЛЬ ВТРАТ У КОМБІНОВАНОМУ ВІДВОДІ З БОКОВОЮ КАМЕРОЮ

*Луговий О. Л., асп. гр. А-45/МБ; Гусак О. Г., декан факультету ТеСЕТ,
Сумський державний університет, м. Суми*

Важливим кроком при аналізі робочого процесу комбінованого відводу є оцінка гідравлічних втрат. В цілому оцінку втрат в статорному елементі проточної частини відцентрового насоса можна виконати за виразом [1]:

$$\Delta h = \zeta \frac{V^2}{2g}, \quad (1)$$

де ζ – коефіцієнт втрат; V – швидкість потоку у характерному перерізі відводу.

Враховуючи те, що структура течії в елементах комбінованого відводу не однакова, для оцінки втрат розділимо проточну частину на характерні ділянки. Тоді сумарні втрати в комбінованому відводі складаються із суми втрат на характерних ділянках: у спіральній частині напрямного апарата (Δh_c), у дифузorzних каналах ($\Delta h_{дк}$), в кільцевій камері ($\Delta h_{кам}$), в напірному патрубку ($\Delta h_{нп}$):

$$\sum \Delta h = \Delta h_c + \Delta h_{дк} + \Delta h_{кам} + \Delta h_{нп} \quad (2)$$

Коефіцієнт втрат напору в спіральній частині і в дифузorzних каналах напрямного апарата можна визначити за рівняннями, наведеними у [0]:

$$\zeta_c = -0,0114K_c^2 + 0,1985K_c + 0,0568 \quad (3)$$

$$\zeta_{дк} = (\zeta_{дк})_{min} + 0,2[(K_c)_{min} - K_c]^2 \quad (4)$$

де K_c – коефіцієнт косоого зрізу напрямного апарата.

Найбільш складним є визначення втрат у кільцевій камері і у напірному патрубку. Для можливості створення математичної моделі втрат на цих ділянках необхідно дослідити особливості течії на цих ділянках. Розглянемо картину течії в кільцевій камері. Потік, який виходить з j -го каналу напрямного апарата q_j зливається з через $i-1$ переріз з потоком в кільцевій камері. При змішуванні потоків відбувається зміна моменту кількості руху рідини внаслідок зміни швидкості і напрямку течії, а також внаслідок тертя, що супроводжується гідравлічними втратами. Втрати напору Dh_j (між вихідним перерізом каналу напрямного апарата j до перерізу i в кільцевому відводі) і втрати Dh_{i-1} (від перерізу $i-1$ кільцевої камери до перерізу i) згідно рівнянню Бернуллі можна записати наступним чином:

$$\Delta h_j = H_j - H_i + \chi_j \frac{V_j^2}{2g} - \chi_i \frac{V_i^2}{2g}; \quad (5)$$

$$\Delta h_{i-1} = H_{i-1} - H_i + \chi_{i-1} \frac{V_{i-1}^2}{2g} - \chi_i \frac{V_i^2}{2g}. \quad (6)$$

Для отримання величини різниці статичних тисків $(H_j - H_i)$ і $(H_{i-1} - H_i)$, запишемо теорему о зміні моменту кількості руху для перерізів j , $i-1$ та i , з урахуванням якої рівняння в проекції на напрямок коллової швидкості має вигляд:

$$\begin{aligned} -\frac{\beta_j V_j^2}{g} \gamma F_j \cos \varphi r_j - \frac{\beta_{i-1} V_{i-1}^2}{g} \gamma F_{i-1} r_{i-1} + \frac{\beta_i V_i^2}{g} \gamma F_i r_i = \\ = H_{i-1} \gamma F_{i-1} r_{i-1} + H_j \gamma F_j \cos \varphi r_j - H_i \gamma F_i r_i + T_s R'' \end{aligned} \quad (7)$$

Виконав певні перетворення, прийняв що витрата через кожний канал напрямного апарату є однаковою і спростивши рівняння шляхом заміни, отримаємо вирази для визначення коефіцієнтів опору ζ_j і ζ_{i-1} бокового відхилення при злитті потоків, а також коефіцієнта опору тертя $\zeta_{тер i}$, віднесених до швидкості у j -му каналі напрямного апарата:

$$\zeta_j = 1 + 4b^2(c + i) - (i + c)^2 b^2 - 2b^2 - kb^2; \quad (8)$$

$$\zeta_{i-1} = 2b^2(c - i) - b^2 - kb; \quad (9)$$

$$\zeta_{тер i} = A(c + i)^2 b^2. \quad (10)$$

Коефіцієнт опору на вході в патрубкок, віднесений до швидкості в каналах апарату може бути визначений як коефіцієнт опору на боковий отвір при розділенні потоків:

$$\zeta_{нп} = b^2(Z_{на} + c)^2 + Z_{на}^2 b^2 D^2 - 2\cos\alpha(Z_{на} + c)Z_{на} D b^2. \quad (11)$$

Таким чином отримуємо коефіцієнт опору кільцевої камери і напірного патрубкка:

$$\begin{aligned} \zeta_{кв} = 1 + \frac{b^2}{6}(Z_{на} + 1)(2Z_{на} + 1) + \frac{b^2(Z_{на} + 1)}{2} - \frac{kb(Z_{на} + 1)}{2} + 2b^2c - c^2b^2 + \\ + \frac{b^2}{4}Z_{на}(Z_{на} + 1)A + \frac{b^2}{3}Ac(Z_{на} + 1)(2Z_{на} + 1) + b^2(Z_{на} + c) + \\ + b^2Z_{на}^2 D^2 - 2\cos\alpha(Z_{на} + c)Z_{на} D b^2. \end{aligned} \quad (12)$$

Результати розрахунку втрат у комбінованому відводі за даною моделлю були порівняні з результатами чисельного експерименту. На рисунку 1 наведено порівняння результатів.

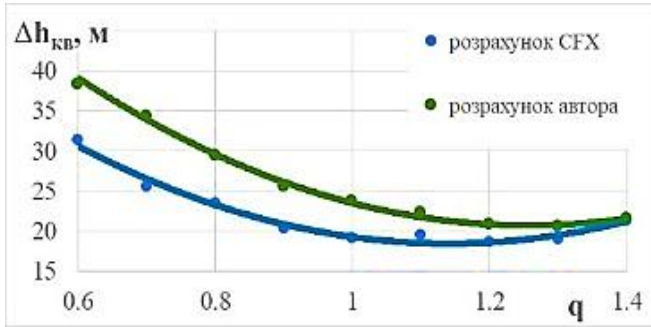


Рисунок 1 – Порівняння результатів розрахунку

Список літератури

1. Gulich J. F. Centrifugal Pumps / J.F.Gulich. – 4th edition. – Springer Nature Switzerland AG, 2020 – 1264 p.
2. Lugova S. O. (2009). Hydrodynamic features of designing replaceable flow parts when creating a unified series of centrifugal pumps. Ph.D Thesis. – Sumy State University, Sumy, Ukraine, 2009. – 20 p.

МЕТОДИКА АНАЛІЗУ ЗАСТОСУВАННЯ КОГЕНЕРАЦІЙНОЇ СТАНЦІЇ В СИСТЕМУ ЦЕНТРАЛІЗОВАНОГО ТЕПЛО- ТА ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ

*Антоненко С. С., доц. каф. ПГМ; Коваленко В. М., студ. гр. ЕІ.М-51,
Сумський державний університет, м. Суми*

На теперішній час стратегічним напрямом у розвитку енергетики щодо використання альтернативних технологій з тепло- та електрогенерації є когенерація. Підвищення ефективності роботи систем з малою одиничною потужністю за допомогою когенераційних станцій в умовах порушення роботи централізованих систем енергопостачання є важливою науково-практичною задачею, оскільки, дозволяє запобігти техногенним катастрофам різного масштабу в енергосистемах країни.

Внаслідок масштабних пошкоджень із-за військових атак централізованої енергосистеми міст, країна потребує рішення з їх децентралізації зі здатністю одночасно виробляти електроенергію та тепло. Когенераційні установки, що працюють переважно на природному газі, дозволяють виробляти електрику та теплову енергію з високим коефіцієнтом корисної дії, що робить альтернативою традиційним ТЕЦ.

Виходячи з існуючої ситуації, актуалізується мета щодо розроблення методики техніко-економічного обґрунтування з запровадження когенераційних станцій в мережах централізованого тепло- та електропостачання. До теперішнього часу для створення методики з техніко-економічного аналізу умов щодо впровадження когенераційних станцій, для конкретно визначеного споживача або групи споживачів приділялося недостатньо уваги.

Таким чином, наукова новизна у розробці зазначеної методики полягає у аналітичному визначенні всіх передумов для застосування технології когенерації енергії, які базуються на основах електротехніки, теплотехніки та статистичного дослідження особливостей електрогенерації та теплогенерації в дійсних умовах роботи окремої централізованої системи енергопостачання.

Для досягнення поставленої мети використовуються статистичні дані про енергоспоживання систем централізованого тепло- та електропостачання. Проводиться техніко-економічний аналіз ефективності роботи когенераційної станції для певного типу та групи споживачів. Розроблена методика з впровадження технології когенерації енергії з метою забезпечення тепловою та електричною енергією, ґрунтується на виборі варіантів режимів роботи децентралізованої системи таких як – «Енергетичний острів» та «Мережева станція».

Практичне значення отриманих за розробленою методикою результатів, полягає у застосуванні їх для техніко-економічного обґрунтування щодо впровадження когенераційних станцій, як елемента розподіленої системи генерації енергії.

РЕКОМЕНДАЦІЇ ЩОДО УТОЧНЕННЯ МЕТОДИКИ ОБРАХУНКУ ОБСЯГІВ ТЕПЛОСПОЖИВАННЯ АБОНЕНТАМИ СИСТЕМИ ЦЕНТРАЛІЗОВАНОГО ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ

*Антоненко С. С., доц. каф. ПГМ; Оніпа В. О., студ. гр. І-21/Іем,
Сумський державний університет, м. Суми*

Підвищення тарифів за комунальні послуги виявило гостру проблему справедливого нарахування обсягів за теплоспоживання абонентами системи централізованого теплопостачання. Для таких об'єктів громадського обслуговування як: заклади торгівлі, лікарняні заклади, школи, дитячі садочки, адміністративні будівлі тощо – витрати на теплоспоживання є значними і безпосередньо впливають на використання власних або бюджетних коштів.

У процесі експлуатації будівель, впливовим фактором є різні додаткові джерела теплонадходжень, які не враховуються під час стандартного розрахунку споживання теплової енергії. Це такі як: альтернативна теплогенерація; робочі процеси, що виділяють тепло; тепловіддача від електрообладнання; проведена термомодернізація огорожувальних конструкцій тощо. Неврахування цих факторів призводить до завищеної переплати, адже фактичне теплоспоживання абонентами від централізованої системи значно менше, ніж тарифний розрахунок.

Існуюча система сплати за тепло використовує лише показники загальнобудинкових лічильників або нормативні розрахунки. Такий метод не враховує: різницю між фактичним і нормативним споживанням; додаткові джерела теплонадходження; запроваджені заходи з енергозбереження. У результаті абоненти, які інвестують у власні заходи енергозбереження, не мають економічної вигоди, бо продовжують сплачувати за тепло за завищеними тарифами.

Для об'єктивної сплати за обсяги теплоспоживання рекомендується у методики розрахунку внести корективи, які враховуватимуть наступне:

- використання даних індивідуальних приладів обліку;
- врахування даних про власні джерела теплонадходження ;
- врахування частки тепла з альтернативних джерел теплогенерації;
- коригування платежів до фактичного режиму споживання.

Такий підхід у об'єктивному обліку теплоспоживання дозволить:

- зменшити власні та бюджетні витрати;
- стимулювати використання енергозберіжливих технологій;
- забезпечити об'єктивний фінансовий розподіл між споживачами.

Врахування власних джерел теплонадходження та запроваджених енергозберіжливих технологій є ключовим фактором до об'єктивної сплати за тепло. Зазначені рекомендації сприятимуть розвитку енергоефективності, та раціональному використанню власних та бюджетних коштів.

ТЕПЛОВІ ВТРАТИ У ТЕПЛОМЕРЕЖАХ ТА АЛГОРИТМ ЇХ АВТОМАТИЗОВАНОГО ВИЗНАЧЕННЯ

*Грабовой О., студ. гр. І-21/Іем; Сотник М. І., зав. каф. ПГМ,
Сумський державний університет, м. Суми*

У централізованих системах опалення з якісним регулюванням теплового навантаження та потужності теплового генератора функціонування системи «генератор – тепла мережа – споживач» за будь-якої температури t_j повітря навколишнього середовища зміна теплового навантаження мережі, зміна теплової потужності генератора, зміна потужності теплових втрат у мережах буде прямо пропорційна зміні Δt_{ji} температурного графіка подачі теплоносія, яка є різницею температур прямого та зворотного теплоносія. При зміні температури повітря навколишнього середовища можна для розрахунку вказаних змінних величин у автоматичному алгоритмі застосовувати тепловий коефіцієнт $k_{\text{тми}}$, який характеризує зміну теплового навантаження системи та дає можливість кількісно оцінити зміну потужності теплових втрат за будь-якої температури t_j відносно вибраної «базової» Q_0 .

Сумарна загальна потужність теплових втрат у теплових мережах буде визначатися сумою теплових потужностей теплових втрат теплотрас, які групуються за своїми конструктивними особливостями. Тобто, провівши таке групування ми можемо визначити однотипні групи трубопроводів, які будуть відрізнятися діаметром, способом «залягання» / розташування у навколишньому середовищі, конструкцією теплоізоляції та її станом.

Така градація дозволить проводити «машинні» розрахунки, користуючись формулою, яка визначає загальні теплові втрати $Q_{\text{втрат}}$ за будь-який період часу t_j : $\sum Q_{\text{втрат}} = (\sum_{i=1}^n Q_{\text{втрат}} + \sum_{i=1}^n Q_{\text{втрат.пов.}}) \cdot \tau_j$, де перша сума визначає сумарні теплові втрати у підземних теплотрасах, а друга – у надземних. Знаючи протяжність періоду t_j у якому температура навколишнього середовища була сталою можна в автоматичному режимі оцінювати обсяги теплових втрат та порівнювати їх з обсягами спожитої теплової енергії.

Запропонований алгоритм визначення показників теплових втрат може стати елементом алгоритмів побудови автоматизованих інформаційних систем у системах енергетичного менеджменту підприємств, органів місцевого самоврядування, державного управління, які полегшують управління даними, аналіз поточного стану теплових мереж, прийняття обґрунтованих рішень щодо їх поточної експлуатації та подальшої модернізації.

ПРОПОЗИЦІЇ ДО МЕТОДИКИ ВИЗНАЧЕННЯ «БАЗОВИХ» ПОКАЗНИКІВ ТЕПЛОВИХ ВТРАТ У ТЕПЛОМЕРЕЖАХ

*Гудименко С., студ. гр. І-31/Іем; Сотник М. І., зав. каф. ПГМ,
Сумський державний університет, м. Суми*

Отримання вихідних даних щодо функціонування системи централізованого теплозабезпечення споживачів, необхідних для створення автоматизованої системи прогнозування потужності споживання теплової енергії споживачами, прогнозування потужності та обсягів теплових втрат у теплових мережах, прогнозування параметрів функціонування теплового генератора є наразі нагальною потребою. Визначення «базових» показників потужності теплових втрат у певних ділянках теплових мереж, розроблення методичного та інформаційно-аналітичного забезпечення автоматизованих систем моніторингу для визначення поточних теплових втрат у теплових мережах у залежності від температури повітря навколишнього середовища є необхідною умовою та основою подальшого створення і функціонування алгоритмів автоматизованих систем прогнозування та моніторингу навантажень теплогенерації та теплоспоживання.

Пропонується «прив'язати» методику розрахунку теплових втрат у мережах до методики розрахунку теплового балансу системи централізованого опалення при визначенні показників температурного графіку подачі теплоносія споживачам. Теплове навантаження мережі та теплові втрати у ній пропорційні температурі повітря зовнішнього середовища. Їх зміну можна оцінити, використовуючи температурний коефіцієнт, який показує зміну споживання теплової енергії (потужності споживання та втрат у мережі) відносно наперед визначеного енергетичним аудитом значення в усьому діапазоні зміни температури повітря навколишнього середовища.

Запропонована методика визначення потужності поточних теплових втрат базується на використанні питомих розрахункових та фактичних показників функціонування систем централізованого теплозабезпечення. Пропонується за базовий показник прийняти потужність втрат при температурі повітря зовнішнього середовища 0 °С з її наступною корекцією, яка враховує зміну температури повітря навколишнього середовища.

Практична цінність результатів досліджень полягає у подальшому застосуванні запропонованих базових показників теплових втрат у мережах та теплових коефіцієнтів для спрощення алгоритмів побудови автоматизованих систем прогнозування і моніторингу функціонування централізованих систем теплозабезпечення об'єктів.

ПІДХОДИ ДО ОПИСУ ГІДРОДИНАМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ У ПРИКІЛЬЦЕВІЙ ОБЛАСТІ ВІДЦЕНТРОВИХ КОНТРРОТОРНИХ МАШИН

*Ратушний О. В., доц. каф. ПГМ; Вареник М. О., студ. гр. ІМ-21/Ізм,
Сумський державний університет, м. Суми*

Теоретичні основи гідродинамічних процесів у прикільцевій області відцентрових контрроторних машин

Відцентрові контрроторні машини (ВКМ) представляють перспективний клас гідромашин, у яких два робочі органи – лопатева решітка робочого колеса та лопатева решітка контрроторного диска – обертаються назустріч один одному. Основними особливостями прикільцевої області (ПрО) є відсутність решіток, вихровий та квазіусталений характер течії, обумовлений різкою зміною напрямку руху рідини через зворотне обертання. Ці особливості створюють внутрішнє протиріччя, яке потребує поєднання теорії решіток і механіки вихрового руху.

Аналіз робочого процесу ВКМ дозволяє поділити його на дві частини: безпосереднє забезпечення потрібних параметрів напору та досягнення максимально можливого коефіцієнта корисної дії (ККД). У радіальних контрроторних решітках спостерігається взаємодія сильно закрученої течії з лопатями другого ротора, що рухаються назустріч потоку. Це призводить до швидкої зміни моменту імпульсу і зростання інтенсивності енергопередачі.

Гіпотеза вихрового руху становить ключову теоретичну основу. Взаємодія двох решіток створює нову системну якість – вихрову структуру в ПрО ВКМ. Лопатеві робочі органи забезпечують високий ККД за рахунок профілювання лопатевих систем, тоді як вихрова структура головним чином відповідає за створення високого напору. У центральній частині прикільцевої зони виникає квазістаціонарна вихрова структура, яка формується через перетворення кінцевих вихорів, що сходять з лопатей робочого колеса, у стабільне вихрове утворення. Обертаючись, воно забезпечує поворот основного потоку і генерує додатковий напір, подібно до тороїдального вихору у вихрових вакуумних насосах.

На підставі гіпотези виведено рівняння теоретичного напору ВКМ, яке складається з трьох компонент: напору, створюваного робочим колесом; напору від контрротора та компоненти, зумовленої вихровим процесом у прикільцевій області. Це рівняння має загальний характер і зберігає справедливість навіть при заміні лопатевих решіток іншими способами енергопередачі (тертя, вихроутворення).

Безвихрові підходи до опису руху рідини в ПрО розглядаються як перший етап накопичення інформації. Вони базуються на основному рівнянні робочого процесу лопатевих машин з урахуванням контрроторного ефекту як від'ємної циркуляції. При рівних за модулем, але протилежних кутових швидкостях загальний теоретичний напір визначається сумою напорів обох

решіток. Аналіз кінематики течії через дві контрроторні решітки показує, що на вході в другу решітку потік має значний момент імпульсу (закрутку), створений першою решіткою, напрям якої протилежний обертанню контрротора.

Розглянуто варіанти з умовами безциркуляційного входу (нульова циркуляція на вході) та з збереженням циркуляції. Безвихрові моделі дозволяють врахувати взаємний вплив решіток, але мають суттєві внутрішні протиріччя. Вони не можуть адекватно описати особливості течії в ПрО, зокрема швидку зміну напрямку потоку в тонкій кільцевій зоні. Забезпечення високого напору за таких моделей вимагає неприйнятної збільшення радіальних розмірів, що погіршує масо-габаритні характеристики ВКМ. Крім того, безвихровий рух в'язкої рідини не задовольняє умовам прилипання, тому в реальній течії обов'язково виникають вихори.

Динамічна теорема Кельвіна підтверджує, що кінетична енергія (динамічний напір) безвихрового руху має мінімальне значення порівняно з вихровим рухом. Це обґрунтовує перевагу вихрової моделі для опису процесів у ПрО ВКМ. Складнощі аналітичного вивчення в'язкої рідини стимулюють застосування спрощених математичних моделей, серед яких вихровий підхід є безальтернативним.

Таким чином, сутність сумісної роботи відцентрової контрроторної машини полягає у зміні моментів імпульсу в кожній решітці та вихровому гідродинамічному процесі в прикільцевій області між ними. Запропонована гіпотеза вихрового руху дозволяє розв'язати протиріччя, окреслені в теорії, забезпечує повноту охоплення явищ і несуперечність сучасній науковій реальності. Вона розвиває уявлення теорії динамічних насосних технічних систем і відкриває шляхи для подальшого вдосконалення ВКМ з високим напором і ККД.

Висновки свідчать, що саме гідродинамічні процеси в прикільцевій області принципово визначають напірні та енергетичні характеристики ВКМ. Подальші дослідження повинні бути спрямовані на детальне моделювання вихрової структури, експериментальну верифікацію гіпотези та оптимізацію геометрії робочих органів для практичного впровадження контрроторних технологій у насособудуванні.

Подальше теоретичне і експериментальне вивчення вихрових процесів у прикільцевій області дозволить створити повноцінну математичну модель енергопередачі у відцентрових контрроторних машинах, що стане надійною основою для розробки високоефективних ВКМ нового покоління. Це відкриє перспективи широкого промислового застосування контрроторних технологій у різних галузях техніки, де потрібні компактні насоси з високим напором і оптимальним ККД.

Робота виконана у межах науково-дослідної роботи «Дослідження перспективних шляхів розвитку систем, що передають енергію рідині» (держреєстрація № 0121U113201).

ГАРМОНІЗАЦІЯ НОРМАТИВНОЇ БАЗИ УКРАЇНИ З МІЖНАРОДНИМИ ТА ЄВРОПЕЙСЬКИМИ СТАНДАРТАМИ ДЛЯ ВПРОВАДЖЕННЯ МАЛИХ МОДУЛЬНИХ РЕАКТОРІВ (ММР) У КОНТЕКСТІ ЄВРОІНТЕГРАЦІЇ ТА ПІСЛЯВОЄННОГО ВІДНОВЛЕННЯ ЕНЕРГЕТИКИ

Ратушний О. В., доц. каф. ПГМ; Рибальченко В. М., інж. ЦККНО «Pump Studio»; Бондаренко Д. С., студ. гр. ІМ-21/Ігм-3, Сумський державний університет, м. Суми

Галузь малих модульних реакторів (ММР) перебуває на етапі активного формування нормативної бази, яка поєднує класичні ядерні стандарти з новими підходами, адаптованими до особливостей модульності, пасивної безпеки та спрощених конструкцій. Згідно з класифікацією МАГАТЕ та Агентства з ядерної енергії ОЕСР (OECD/NEA), ММР – це атомні електростанції з електричною потужністю до 300 МВт. Для енергетичної системи України вони є одним із ключових напрямків розвитку ядерної енергетики та важливим елементом післявоєнного відновлення.

Ключовими завданнями та перевагами ММР є: якнайшвидше застосування в посткризових і постконфліктних ситуаціях; виробництво електричної та теплової енергії для військової та критичної інфраструктури; забезпечення потреб післявоєнного відновлення населених пунктів і промисловості; реконструкція та модернізація існуючих ТЕЦ і ТЕС; децентралізоване розгортання енергетичних потужностей; поетапне введення потужності без порушення існуючої інфраструктури; підвищення стійкості енергосистеми країни в цілому; гнучке керування з можливістю покриття власних і зовнішніх навантажень, резервування потужностей ТЕЦ/ТЕС у разі їх пошкодження, виробництва «зеленого водню» методом електролізу в періоди низького навантаження, а також роботи в гібридних режимах спільно з сонячною та вітровою генерацією.

Нормативне регулювання ММР в Україні базується на гармонізації національного законодавства з міжнародними та європейськими стандартами. На глобальному рівні ключовим регулятором є МАГАТЕ, яка адаптує чинні норми під специфіку ММР. Основні документи включають серію Safety Standards Series, зокрема фундаментальний стандарт SSR-2/1. «Безпека АЕС: Проектування», положення якого переглядаються та адаптуються для легководних і високотемпературних ММР. Доповнюють їх технічні звіти (TECDOC), присвячені розробці, техніко-економічному обґрунтуванню та безпеці ММР.

Важливими міжнародними ініціативами є Nuclear Harmonization and Standardization Initiative (NHSI), спрямована на гармонізацію регуляторних підходів для спрощення ліцензування серійних модулів, та SMR Regulators' Forum – платформа для розробки консенсусних позицій щодо технічних викликів. Інженерні стандарти представлені ASME Boiler and Pressure Vessel Code (BPVC) Section III (правила проектування ядерних компонентів),

стандартами ІЕС 61513 для систем контролю та управління, а також Декларацією EU SMR 2030, яка наголошує на принципах «3S» (Safety, Security, Safeguards).

На національному рівні базовими документами є Закон України «Про використання ядерної енергії та радіаційну безпеку», положення якого адаптуються під малу потужність і модульну конструкцію, та Закон «Про технічні регламенти та оцінку відповідності». Ключовим кроком став законопроект № 14164 «Про внесення змін до деяких законодавчих актів України щодо засад впровадження малих модульних реакторів в Україні», зареєстрований 29 жовтня 2025 року. Документ вводить офіційне визначення терміну «малий модульний реактор», спрощує процедури ліцензування, вибору майданчиків і дозволяє участь приватних інвесторів. Станом на початок 2026 року законопроект перебуває на стадії розгляду в комітетах Верховної Ради (енергетичному, екологічному, бюджетному), отримав зауваження та готується до першого читання.

ДІЯРУ розробляє спеціалізовані норми та правила: НП 306.2.245-2024 (Загальні положення безпеки атомних станцій), Норми радіаційної безпеки України (НРБУ-97), правила ядерної безпеки реакторних установок, а також регуляторні настанови, зокрема посібник «Положення про передліцензійний розгляд проекту ядерної установки» (2023). Активно застосовуються технічні регламенти: безпеки машин (постанова КМУ № 62), обладнання під тиском, низьковольтного електрообладнання (постанова КМУ № 1067) та системи екологічного управління за ISO 14001.

Процес гармонізації відбувається паралельно з науково-технічним розвитком галузі. Міжвідомча робоча група при Міненерго розробляє комплексний План заходів з впровадження ММР, який охоплює міжнародний досвід, ризики, потенційні майданчики, інфраструктуру, кадрове забезпечення, науково-технічний потенціал та інвестиційні інструменти. Україна активно співпрацює з США в межах програми FIRST (проекти «Фенікс» та «Гефест») та з країнами ЄС через WENRA та ENSREG.

Аналіз нормативної документації показує, що існуюча база вже значною мірою гармонізована з європейськими та міжнародними вимогами і активно доопрацьовується під специфіку ММР: фокус на внутрішньоприямній (пасивній) безпеці, модульному виробництві та менших зонах відчуження. Це створює надійні правові та технічні передумови для безпечного, швидкого та ефективного впровадження ММР як джерела безвуглецевої енергії, що сприятиме енергетичній незалежності України, відновленню промисловості (зокрема металургійної галузі) та формуванню сталого низьковуглецевого розвитку.

«Робота виконана у межах науково-дослідної роботи «Розроблення головного циркуляційного насосу і парогенератора для малого модульного реактора (SMR)» (держреєстрація № 0126U000865)».

ПОРІВНЯННЯ ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ ЕНЕРГЕТИЧНОГО МЕНЕДЖМЕНТУ

*Сапожніков С. В., доц. каф. ПГМ; Грабовой О. В., студ. гр. І-21/Іем,
Сумський державний університет, м. Суми*

У роботі розглянуто основні типи інформаційних систем енергетичного менеджменту, проведено їх класифікацію та порівняльний аналіз. Визначено ключові переваги та недоліки сучасних підходів до управління енергоресурсами, зокрема систем на основі IoT та штучного інтелекту. Інформаційні системи енергетичного менеджменту можна класифікувати за різними ознаками: рівнем застосування, архітектурою та функціональністю.

За рівнем застосування виділяють: промислові EMS; системи управління енергоспоживанням будівель (BEMS); системи диспетчерського керування енергосистемами (SCADA/EMS); системи управління мікромережами.

За архітектурою системи поділяються на централізовані, децентралізовані та гібридні. Централізовані системи характеризуються простотою реалізації, але мають низьку гнучкість. Децентралізовані системи забезпечують підвищену надійність, проте є складнішими в реалізації. Гібридні системи поєднують переваги обох підходів.

Порівняльний аналіз показує, що традиційні EMS базуються на статичних алгоритмах і мають обмежену адаптивність. SCADA-системи забезпечують управління в реальному часі, але відзначаються високою складністю та вартістю.

Сучасні Smart EMS, що використовують технології Інтернету речей (IoT), дозволяють отримувати дані в режимі реального часу та забезпечують гнучке управління енергоспоживанням. Найбільш перспективними є системи на основі штучного інтелекту, які здатні до самонавчання та прогнозування енергоспоживання.

У результаті аналізу встановлено: Smart та AI-орієнтовані системи забезпечують найвищу ефективність управління енергією; SCADA/EMS є найбільш придатними для управління великими енергосистемами; BEMS оптимальні для будівель та комерційних об'єктів; гібридні архітектури є найбільш перспективними з точки зору надійності та масштабованості.

Список літератури

1. ДСТУ ISO 50001:2020 Системи енергетичного менеджменту. Вимоги та настанова щодо використання (ISO 50001:2018, IDT); – Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2020. – 33 с.
2. Цюцюра С. В. Управління розвитком складних систем. – 2010. – Вип. 2. – С. 60-63. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Urss_2010_2_16

АВТОМАТИЗОВАНІ ІНФОРМАЦІЙНІ СИСТЕМИ В ЕНЕРГЕТИЧНОМУ МЕНЕДЖМЕНТІ

*Сапожніков С. В., доц. каф. ПГМ; Григоренко Є. А., студ. гр. І-21/Іем,
Сумський державний університет, м. Суми*

Енергетичний менеджмент є ключовим аспектом сучасного управління підприємствами, зокрема в умовах зростаючого попиту та вартості на енергоресурси та необхідності зменшення витрат і викидів. Інформаційні системи можуть значно полегшити цей процес, забезпечуючи інструменти для збору, аналізу та управління даними про споживання енергоресурсів. Важливу роль в цьому процесі відіграють Закон України «Про енергетичну ефективність» [1] та міжнародний стандарт [2].

Основні компоненти інформаційної системи енергетичного менеджменту: автоматизований збір даних (комерційні та технічні лічильники в реальному часі, різні типи датчиків); передача даних (різні типи протоколів); зберігання (бази даних локальні та хмарні), аналіз і звітність (обробка великих даних, порівняння фактичного споживання з цільовими показниками, виявлення аномалій та прогнозування витрат і втрат); оптимізація витрат (виявлення можливостей зниження енергоспоживання, розробка енергоефективних рішень); інтерфейс користувача (створення дашбордів та графіків, звіти, мобільні додатки, системи оповіщення). Переваги впровадження автоматизованих інформаційних систем: зниження витрат на енергоносії (до 10–30%); підвищення енергоефективності використання енергоносіїв, відповідність стандартам, (ISO 50001), контроль і прозорість процесів, зменшення викидів CO₂, покращення операційного контролю.

Сучасні тенденції розвитку інформаційних систем енергетичного менеджменту: використання штучного інтелекту, розвиток IoT (інтернет речей), цифрові двійники, інтеграція з відновлюваними джерелами енергії. Отже, інформаційні системи енергетичного менеджменту є важливим інструментом підвищення ефективності використання енергоресурсів. Їх впровадження дозволяє не лише економити кошти, але й сприяє екологічній безпеці та сталому розвитку. Одним із прикладів впроваджених інформаційних систем енергетичного менеджменту є Сумська міська система моніторингу теплоспоживання будівель, яка розроблена на кафедрі прикладної гідроаеромеханіки СумДУ. На теперішній час до Системи підключено 73 закладах освіти та охорони здоров'я міста Суми.

Список літератури

1. Закон України «Про енергетичну ефективність » від 21.10.2022 р. № 1818–ІХ, зі змінами та доповненнями // Відомості Верховної Ради України. – 2022. – № 2. – С. 24.
2. ДСТУ ISO 50001:2020 Системи енергетичного менеджменту. – Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2020. – 33 с.

АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ СОНЯЧНИХ КОЛЕКТОРІВ У СИСТЕМАХ ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ

*Пушкар В. Ю., студ. гр. І-21/Іем; Хованський С. О., доц. каф. ПГМ,
Сумський державний університет, м. Суми*

Сучасний розвиток енергетики характеризується активним переходом до використання відновлюваних джерел енергії. Одним із найбільш перспективних напрямів є сонячна енергетика, яка базується на використанні невичерпного енергетичного потенціалу сонячної енергії, що значно перевищує існуючі запаси традиційних енергоресурсів, що робить її стратегічно важливою для сталого розвитку енергетичних систем.

Сонячне випромінювання, яке досягає поверхні Землі, поділяється на пряме та розсіяне, пряме випромінювання залежить від географічного положення, часу доби та стану атмосфери, тоді як розсіяне формується внаслідок відбиття та розсіювання сонячних променів у атмосфері.

Україна належить до регіонів із середнім рівнем сонячної інсоляції. Середньорічне надходження сонячної радіації становить від 1070 до 1400 кВт·год/м², що створює сприятливі умови для використання сонячної енергії. Найбільш ефективне застосування геліосистем спостерігається у південних регіонах, однак їх використання є доцільним на всій території країни. Термін ефективної роботи теплових сонячних установок становить 5–7 місяців на рік.

Сонячні колектори є основними пристроями для перетворення сонячної енергії в теплову. Найбільш поширеними є плоскі та вакуумні колектори. Плоскі сонячні колектори характеризуються простотою конструкції, доступною вартістю та ефективною роботою в літній період. Вони складаються з абсорбера, прозорого покриття, теплоізоляції та корпусу. Основною перевагою таких систем є здатність використовувати як пряме, так і розсіяне сонячне випромінювання. Вакуумні сонячні колектори відрізняються значно вищим коефіцієнтом корисної дії, який може досягати 90–95%. Їх конструкція забезпечує мінімальні теплові втрати завдяки вакуумній ізоляції. Це дозволяє ефективно використовувати їх у холодний період року та за несприятливих погодних умов. Такі системи здатні працювати навіть при низьких температурах та зменшеній інсоляції.

Окрему групу становлять термосифонні системи, які працюють за принципом природної циркуляції теплоносія без використання насосів. Вони є простими в експлуатації та економічно вигідними для забезпечення гарячого водопостачання. Також важливими є повітряні сонячні колектори, що використовуються для опалення приміщень. Їх перевагами є простота конструкції, надійність та відсутність ризику замерзання теплоносія.

Ефективність роботи сонячних колекторів визначається їх коефіцієнтом корисної дії, який залежить від ряду параметрів: коефіцієнтів пропускання та поглинання випромінювання, температури теплоносія, а також теплових втрат. Високоефективні колектори характеризуються високими значеннями коефіцієнта поглинання та низькими втратами тепла. Для підвищення ефективності застосовують селективні покриття, багатошарове скління та покращену теплоізоляцію.

У процесі дослідження було виконано тепловий розрахунок повітряного сонячного колектора. Запропонована методика ґрунтується на визначенні основних параметрів повітряного потоку, зокрема швидкості руху повітря, об'ємної та масової витрати, а також кількості теплоти, що передається теплоносію. Ключовим розрахунковим співвідношенням є залежність кількості теплоти від масової витрати повітря, його питомої теплоємності та різниці температур між вхідним і вихідним потоками в колекторі. На основі отриманих результатів побудовано графічні залежності, що відображають: зміну перепаду температур протягом доби (рис. 1); зміну кількості переданої теплоти протягом доби (рис. 2); залежність кількості теплоти від різниці температур на вході та виході колектора (рис. 3).

Аналіз графічних залежностей показує, що перепад температур у повітряному сонячному колекторі змінюється протягом доби відповідно до інтенсивності сонячного випромінювання, досягаючи максимальних значень у денні години. Кількість теплоти, що передається повітрю, має аналогічний характер зміни та зростає зі збільшенням температурного перепаду. Найвищі значення теплопродуктивності спостерігаються у період максимальної сонячної активності.

Графік залежності кількості теплоти від різниці температур підтверджує наявність прямої пропорційної залежності між цими параметрами, що узгоджується з теоретичними положеннями теплотехнічного аналізу.

Результати розрахунків показали, що температура повітря на виході з колектора досягає 52–53 °С, а різниця температур становить до 20 °С. Максимальна кількість переданої теплоти сягає близько 249 кДж/год. При цьому спостерігається чітка залежність між інтенсивністю сонячного випромінювання та ефективністю роботи колектора. Найбільша продуктивність досягається у період максимальної сонячної активності (з 13:00 до 15:00).

Отримані результати підтверджують доцільність використання повітряних сонячних колекторів як допоміжного джерела теплопостачання, які можуть ефективно застосовуватися у системах опалення та вентиляції, забезпечуючи зниження витрат традиційних енергоресурсів.

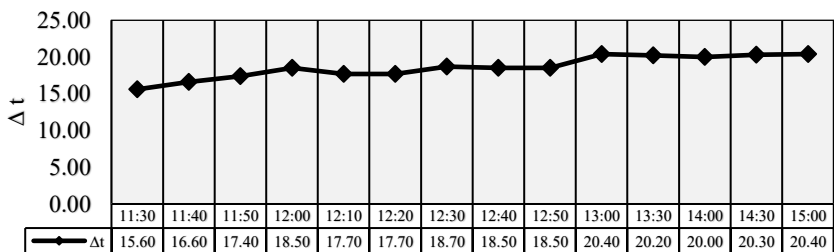


Рисунок 1 – Залежність перепаду температур впродовж доби

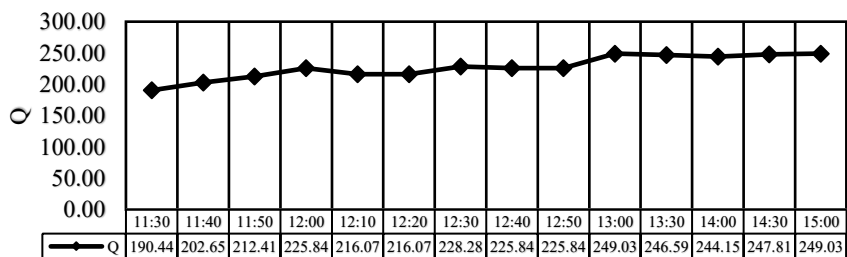


Рисунок 2 – Залежність кількості теплоти впродовж доби

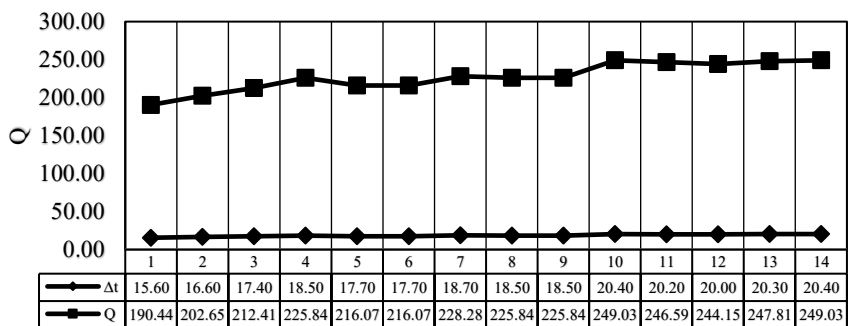


Рисунок 3 – Залежність кількості теплоти від різниці температур на вході та виході в колектор

Отже, сонячні колектори є ефективним, екологічно безпечним та економічно доцільним рішенням для використання відновлюваної енергії. Їх впровадження сприяє підвищенню енергетичної незалежності та зменшенню негативного впливу на довкілля.

ШЛЯХИ ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ПРОМИСЛОВОГО ПІДПРИЄМСТВА ХАРЧОВОЇ ГАЛУЗІ

*Осіпов Д. В., студ. гр. І-21/Іем; Хованський С. О., доц. каф. ПГМ,
Сумський державний університет, м. Суми*

Високий рівень енергоемності економіки України, який більш ніж у два рази перевищує середньосвітові показники [1], зумовлює необхідність підвищення ефективності використання паливно-енергетичних ресурсів. За таких умов енергоефективність виступає одним із ключових чинників забезпечення енергетичної безпеки держави, зниження собівартості продукції та підвищення конкурентоспроможності промислових підприємств, зокрема підприємств харчової галузі. Результати досліджень GIZ свідчать, що рентабельні заходи з енергоефективності здатні скоротити енергоспоживання української промисловості на 35 % [2]. Особливої ваги це набуває в умовах падіння обсягів виробництва (наприклад, у молочній галузі через дефіцит сировини, у хлібопекарській – через зміну культури споживання), що призводить до зростання питомого енергоспоживання на одиницю продукції через роботу обладнання у недовантажених, неоптимальних режимах.

Метою дослідження є аналіз структури енергоспоживання промислового підприємства харчового профілю та обґрунтування ефективних напрямів підвищення його енергоефективності. Для досягнення поставленої мети визначено такі завдання: аналіз структури споживання енергетичних ресурсів на підприємстві; визначення та обґрунтування напрямів підвищення енергоефективності.

Результати дослідження свідчать, що основними споживачами енергії на підприємствах харчової промисловості є технологічні лінії, електроприводи, системи вентиляції, освітлення та допоміжне обладнання. При цьому найбільша частка енергоспоживання припадає на технологічні лінії, що обумовлено специфікою виробництва харчової галузі. Узагальнену структуру споживання енергії за основними групами споживачів наведено на рис. 1.

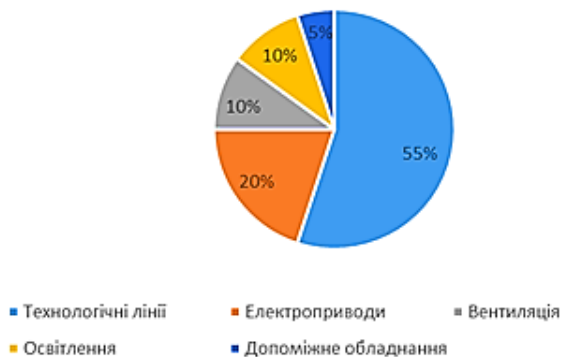


Рисунок 1 – Структура енергоспоживання

Найбільшу частку енергоспоживання формують технологічні процеси, що пояснюється високою енергоємністю виробництва харчової продукції, зокрема необхідністю термічної обробки, транспортування та зберігання сировини. Подібна структура підтверджується результатами енергоаудитів.

На ПрАТ «Монделіс Україна» вже впроваджено низку енергоефективних заходів, зокрема: систему енергоменеджменту відповідно до вимог стандарту ISO 50001, модернізовано системи освітлення із застосуванням LED-технологій, а також автоматизовано облік енергоресурсів. Впровадження зазначених рішень сприяє зниженню рівня енергоспоживання та підвищенню ефективності використання енергетичних ресурсів.

На основі проведеного енергетичного аналізу на досліджуваному об'єкті визначено пріоритетні напрями підвищення енергоефективності підприємства харчової галузі: зниження споживання теплової енергії шляхом модернізації теплотехнічного обладнання, підвищення рівня теплоізоляції та впровадження систем рекуперації тепла; оптимізація електроспоживання за рахунок використання частотних перетворювачів, оптимізації режимів роботи електродвигунів та мінімізації втрат в електричних мережах; автоматизація технологічних процесів із застосуванням сучасних систем моніторингу та керування (SCADA-систем); інтеграція відновлюваних джерел енергії, зокрема сонячної енергії та біогазу, у систему енергозабезпечення підприємства.

Комплексна реалізація зазначених заходів забезпечує суттєве скорочення споживання паливно-енергетичних ресурсів, підвищення ефективності виробничих процесів і зменшення негативного впливу на навколишнє середовище. Проведений аналіз структури енергоспоживання підприємств харчової промисловості показав, що найбільша частка витрат енергії припадає на технологічне обладнання та системи забезпечення виробничих процесів. Виявлено тенденцію до зростання споживання теплової енергії, що пояснюється особливостями технологічних процесів. Водночас впровадження сучасних систем обліку та контролю створює передумови для ефективного управління енергоспоживанням.

Встановлено, що підвищення енергоефективності підприємства досягається за рахунок комплексного підходу, який включає модернізацію обладнання, автоматизацію виробничих процесів та використання відновлюваних джерел енергії. Реалізація запропонованих заходів дозволяє знизити енергоспоживання на 30–40%, підвищити економічну ефективність діяльності підприємства та забезпечити його сталий розвиток.

Список літератури

1. International Energy Agency. Energy Efficiency 2023. Paris: IEA, 2023.
2. Проект «Консультавання підприємств щодо енергоефективності» Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH. URL: https://old.sace.gov.ua/sites/default/files/Dairy_Ukr_23.11.2020.pdf.

**СЕКЦІЯ «ЕНЕРГЕТИЧНЕ
МАШИНОБУДУВАННЯ»**

ТУРБОГЕНЕРАТОР НА БАЗІ ВИХРОВОЇ ТУРБИНИ ДЛЯ КОМУНАЛЬНИХ ПІДПРИЄМСТВ

Ванесв С. М., зав. каф. ТТФ; Иванов Г. О., студ. гр. К.м-41; Медведев Р. О., студ. гр. І-21/2хк; Сумський державний університет, м. Суми

Забезпечення стійкості об'єктів критичної інфраструктури, зокрема водозаборів, в умовах воєнної агресії вимагає створення автономних джерел електроживлення. Наявні наразі резервні джерела електроживлення в основному базуються на використанні дизель-генераторів, функціонування яких є високоартісним. Крім того, такі системи не розраховані на великий ресурс безперервної роботи і не екологічні, що обмежує можливість їх впровадження та використання. Використання енергії надлишкового тиску природного газу на газорозподільних станціях (ГРС) за допомогою турбогенераторів є перспективною альтернативою дизель-генераторам.

Метою роботи є розробка турбогенераторного агрегату потужністю 200 кВт на базі вихрової турбіни для встановлення на «ГРС-1 Суми» з метою енергозабезпечення Пришибського водозабору КП «Міськводоканал».

Для малої енергетики (до 500 кВт) вихрові турбіни є оптимальними завдяки простоті конструкції, низькій собівартості, високій надійності та можливості прямого агрегування з електрогенератором (3000 об/хв) без використання редуктора.

В результаті розрахунків при вихідних даних на ГРС (тиск газу на вході турбіни 2,6 МПа, тиск газу на виході турбіни 0,4 МПа, температура газу на вході турбіни 288 К) отримано необхідну масову витрата газу для генерації 200 кВт 2,50 кг/с.

Оптимізація проточної частини. Проведено порівняльний аналіз варіантів конструкції вихрової турбіни для узгодження з частотою обертання ротора генератора (3000 об/хв): одноканальної двопотокової та двоканальної чотирипотокової.

Для одноканальної двопотокової схеми частота обертання ротора турбіни становить 2655 об/хв при діаметрі колеса 0,743 м. Двоканальна чотирипотокова схема визнана найбільш раціональною. Оптимізований варіант із зовнішнім діаметром робочого колеса 0,606 м та діаметром сопла 0,0117 м забезпечує частоту обертання ротора турбіни 3000 об/хв, що дозволяє ефективну роботу з серійним генератором. При цьому робоче колесо може бути розташовано безпосередньо на валу електрогенератора.

Таким чином, впровадження агрегату дозволить забезпечити автономне водопостачання міста в умовах блекаутів та/або зменшити витрати на електроенергію у штатному режимі. Реалізація використання турбогенераторного агрегату на базі вихрової турбіни позитивно вплине на зменшення викидів парникових газів при заміщенні генерації електроенергії дизельними генераторами на електроенергію від агрегату.

ОСОБЛИВОСТІ КОНСТРУКЦІЇ ТА ВИКОРИСТАННЯ СТРУМИННО-РЕАКТИВНИХ РОЗШИРЮВАЛЬНИХ МАШИН

Ванєєв С. М., зав.каф. ТТФ; Бага Т. С., асист. каф. ТТФ; Мелейчук О. С., аспірант; Мірошниченко О. І., аспірантка; Ольховик М.-Л. І., студ. гр. І-21/2хк-3, Сумський державний університет, м. Суми

У роботі розглянуто особливості побудови струминно-реактивних розширювальних машин, принципи перетворення енергії потоку та можливості їх використання. Окрему увагу приділено порівнянню таких машин із традиційними турбінами та визначенню перспектив їх застосування.

Раціональне використання енергії стиснутих газів є актуальним завданням сучасної енергетики. У багатьох технологічних процесах енергія тиску знижується шляхом дроселювання, що супроводжується значними втратами. Альтернативним підходом є застосування розширювальних машин, здатних перетворювати цю енергію у механічну роботу.

У малопотужних агрегатах, у яких застосовують розширювальні машини, часто необхідно спрацьовувати великі перепади тиску (відношення тиску на вході до тиску на виході може перевищувати 10). При цьому класичні розширювальні машини виконують доцентровими або осьовими багатоступінчастими та часто парціальними. Проточна частина турбіни у цих випадках виходить конструктивно і технологічно складною і дорогою, а ККД турбіни, зазвичай, не перевищує 50 %.

Особливий інтерес становлять струминно-реактивні конструкції, які відзначаються простотою та надійністю. Робота струминно-реактивної машини базується на використанні енергії потоку, що розширюється. Стиснутий газ, проходячи через спеціально сформовані канали, набуває значної швидкості. Вихід потоку створює реактивну силу, яка і забезпечує обертання робочого валу та отримання механічної роботи. На відміну від лопатевих турбін, у цьому випадку відсутній безпосередній контакт потоку з профільованими лопатками — передача енергії відбувається інакше, що суттєво впливає на конструкцію машини.

Виконано порівняння характеристик маловитратних турбін радіального, осьового, струминно-реактивного і вихрового типів за низкою критеріальних комплексів, загальноприйнятих в теорії та практиці турбомашин (наведена окружна швидкість робочого колеса U , наведена частота обертання (коефіцієнт швидкохідності) n_s , наведений діаметр D_s , коефіцієнт витрати Φ_2 , коефіцієнт комплексної потужності $N_{\text{компл}}$) та отримані діапазони зміни критеріальних комплексів для струминно-реактивних розширювальних машин, що відповідають зонам максимального ККД: $U = 0,23-0,32$; $n_s = 0,3-1,2$; $D_s = 7-23$; $\Phi_2 = 0,005-0,042$; $N_{\text{компл}} = 0,04-2,20$. Встановлено, що за коефіцієнтом комплексної потужності та коефіцієнтом витрати струминно-

реактивні розширювальні машини однозначно є малопотужними, маловитратними турбінами.

Можливі сфери застосування струминно-реактивних розширювальних машин та агрегатів на їх основі, в яких їх застосування може бути ефективним, характеризуються такими загальними вихідними вимогами та умовами їх застосування:

- наявність робочого тіла з досить високим значенням різниці ентальпій і відношенням тисків на вході і виході машини, при цьому межа мінімальних значень відношення тисків становить 3–4, виходячи з необхідності забезпечення звукових або надзвукових швидкостей потоку газу у вихідних перерізах підвідного і тягового сопел;

- необхідність роботи у екстремальних умовах, тобто на забрудненому та/або вологому робочому тілі, у тому числі при низьких температурах; у деяких випадках наявність цієї вимоги є визначальною;

- у випадках, коли простота конструкції та технології виготовлення машини, особливо в реверсивному виконанні, переважають вимоги досягнення максимально можливого значення ККД;

- необхідність регулювання режимів роботи машини;

- надійність та тривалий термін служби;

- мінімальний термін окупності.

Найбільш доцільним є використання струминно-реактивних розширювальних машин у випадках, де важлива простота та надійність, а не максимальна ефективність.

Найбільшою мірою розглянутим вимогам та умовами відповідають галузі газової та нафтової промисловості (створення пневмоприводів арматури та турбогенераторів у системах видобутку, транспорту та розподілу природного газу, на компресорних станціях магістральних газопроводів тощо).

Є доцільним створення аварійних турбогенераторів (автономних джерел електроживлення) на основі струминно-реактивних розширювальних машин, особливо в умовах децентралізації електрозабезпечення та воєнної агресії для забезпечення стійкості об'єктів критичної інфраструктури, у т.ч. водозаборів.

Дуже перспективним є застосування струминно-реактивних та вихрових розширювальних машин та агрегатів на їх основі на енерговузлах промислових підприємств.

Проведений аналіз показує, що струминно-реактивні розширювальні машини займають окрему нішу серед енергетичного обладнання. Їх конструкція є значно простішою порівняно з традиційними турбінами, що забезпечує високу надійність і знижує вартість експлуатації. Разом із тим, підвищення ефективності таких машин залишається актуальним науковим завданням, вирішення якого пов'язане з удосконаленням геометрії проточної частини, зокрема сопел, та оптимізацією параметрів потоку.

Робота виконана в межах науково-дослідницької роботи № 0126U000876, що виконується на замовлення МОН України.

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ПЛОЩІ РОБОЧОГО КАНАЛУ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ВИХРОВОГО КОМПРЕСОРА

*Сітало В. С., аспірант; Ванєєв С. М., зав. каф. ТТФ; Карцев О. С., студ.
гр. І-21/2хк-3, Сумський державний університет, м. Суми*

Вихровий компресор характеризується складною структурою течії, що відповідає регенеративному механізму передачі енергії. Робоче середовище надходить через всмоктувальний патрубок у робочий канал корпусу та далі – у міжлопаткові канали робочого колеса, де відбувається перетворення механічної енергії у кінетичну та потенційну енергію потоку. Під дією відцентрових сил газ викидається у робочий канал, де кінетична енергія частково перетворюється в енергію тиску. У подальшому, внаслідок зменшення тангенціальної швидкості, частинки газу знову потрапляють у міжлопаткові канали. Таким чином, рух робочого середовища відбувається по складній спіралеподібній траєкторії, а передача енергії здійснюється багаторазово, що забезпечує формування високого напору.

Зона змішування потоків у робочому каналі є сильно турбулентною та складною для аналітичного опису, що унеможливує застосування класичних методик розрахунку, характерних для відцентрових і осьових компресорів. У зв'язку з цим для дослідження використано методи обчислювальної гідродинаміки (CFD) з використанням програмного комплексу Ansys CFX, що дозволяє детально аналізувати розподіл швидкостей, тиску та енергетичних характеристик потоку.

Параметри робочого каналу – висота, форма поперечного перерізу, довжина та кривизна – безпосередньо впливають на інтенсивність циркуляції робочого тіла, рівень газодинамічних втрат і, як наслідок, на продуктивність та ізоентропний (адіабатний) ККД компресора.

Метою даного дослідження є оцінка впливу площі робочого каналу на характеристики вихрового компресора.

Для цього розглядається одноступінчастий вихровий компресор із периферійно-боковим каналом та криволінійним профілем проточної частини. Така конструкція забезпечує реалізацію регенеративного принципу передачі енергії та формування складної циркуляційної структури потоку в робочому каналі.

Робоче колесо компресора має зовнішній діаметр 250 мм і оснащено прямолінійними лопатками. Геометрія робочого колеса в межах даного дослідження залишалася незмінною, що дозволило виключити вплив його параметрів на результати та зосередити увагу виключно на характеристиках робочого каналу.

Основною змінною геометричною характеристикою є площа поперечного перерізу робочого каналу, яка варіювалася за рахунок одночасної зміни його ширини та висоти, при цьому радіуси каналу змінювалися пропорційно. Було розглянуто три варіанти геометрії каналу: 25×25 мм, 27×27 мм та 29×29 мм.

Таким чином, дослідження охоплює діапазон зміни розмірів каналу від 25 до 29 мм із кроком 2 мм.

Інші геометричні параметри компресора, зокрема форма каналу, його довжина, а також конструкція вхідного та вихідного патрубків, залишилися незмінними. Це забезпечує коректність порівняння результатів і дозволяє оцінити виключно вплив площі робочого каналу на характеристики компресора.

Аналіз отриманих характеристик (рис. 1) показав суттєвий вплив площі робочого каналу на коефіцієнт корисної дії вихрового компресора. Для варіанту зі зменшеною площею каналу (25×25 мм) спостерігається підвищення максимального значення ККД до 0,50, що перевищує базовий варіант (27×27 мм), для якого максимальний ККД становить близько 0,47. Водночас зона ефективної роботи зміщується в область менших витрат.

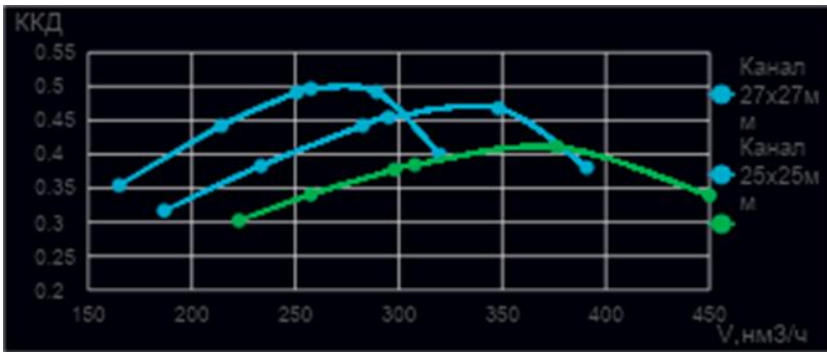


Рисунок 1 – Характеристика компресора при зміні площі робочого каналу

Для варіанту зі збільшеною площею каналу (29×29 мм) максимальне значення ККД зменшується до 0,41, однак робочий діапазон зміщується в область більших витрат. При цьому крива ККД має більш пологий характер, що свідчить про зниження інтенсивності енергетичного обміну між робочим колесом і потоком.

Отримані результати свідчать про те, що зменшення площі робочого каналу сприяє інтенсифікації циркуляційних процесів і підвищенню ефективності, однак обмежує пропускну здатність компресора. Збільшення площі каналу, навпаки, забезпечує більшу витрату, але супроводжується зростанням витрат і зниженням ККД.

Таким чином, площа робочого каналу є критичним параметром, що визначає компроміс між продуктивністю та ефективністю вихрового компресора. Зменшення площі дозволяє досягти вищих значень ККД за рахунок інтенсифікації енергетичного обміну, тоді як її збільшення забезпечує розширення робочого діапазону за витратою. Отримані результати можуть бути використані для вибору раціональних геометричних параметрів залежно від режиму роботи компресора та вихідних даних.

ДОСЛІДЖЕННЯ МОЖЛИВСТЕЙ ВИКОРИСТАННЯ ТУРБОГЕНЕРАТОРІВ НА ОСНОВІ ВИХРОВИХ РОЗШИРЮВАЛЬНИХ МАШИН ДЛЯ ГАЗОРОЗПОДІЛЬНИХ СТАНЦІЙ У РАМКАХ «ВОДНЕВОЇ ЕНЕРГЕТИКИ»

Ванєєв С. М., зав. каф. ТТФ; Ніколаєнко Д. Р., аспірант, Сумський державний університет, м. Суми; Галелюк А. З., викладач, Дрогобицький коледж нафти і газу, м. Дрогобич

Глобальний вектор на декарбонізацію енергетичного сектору та імплементація водневих технологій вимагають глибокої модернізації існуючої інфраструктури транспортування енергоносіїв. Згідно з європейськими ініціативами, розширення потужностей з генерації екологічно чистого водню передбачає не лише його експорт, а й масштабну інтеграцію у внутрішні мережі [1]. Враховуючи високу капіталоємність будівництва нових спеціалізованих трубопроводів, найбільш раціональним технічним рішенням на перехідний період є блендинг – транспортування метано-водневих сумішей через наявну газотранспортну систему [2]. Європейський досвід уже демонструє успішну експлуатацію мереж із часткою водню у суміші до 10%.

Традиційна схема редукування тиску на газорозподільних станціях (ГРС) здійснюється за допомогою дросельних пристроїв, що призводить до втрати потенціальної енергії стисненого потоку без виконання корисної роботи. Заміна пасивних регуляторів тиску на активні детандер-генераторні комплекси дозволяє частково утилізувати ексергію потоку шляхом перетворення різниці тисків на вході та виході агрегату на електричну енергію, яку можливо використовувати для власних потреб станції та/або видавати у зовнішню мережу.

При переході на водневмісні суміші термодинамічні параметри процесу суттєво змінюються. На відміну від чистого природного газу, для якого характерне зниження температури при ізентальпійному розширенні, робочі параметри ГРС перевищують температуру інверсії для водню. Це означає, що коефіцієнт Джоуля-Томпсона знаходиться в діапазоні від'ємних значень і процес дроселювання супроводжуватиметься нагріванням робочого тіла.

Режими роботи ГРС характеризується відносно невеликими об'ємними витратами та значними перепадами тиску. Використання класичних осьових або радіально-осьових турбін у таких умовах є технічно недоцільним через значну парціальність підводу газу до робочого колеса та високу частоту обертання ротора, що вимагає встановлення понижувальних редукторів.

Дослідження просторової структури потоку в проточній частині турбомашини, зокрема аналіз полів швидкостей, тиску та характеру течії в міжлопаткових каналах, доцільно виконувати із застосуванням методів обчислювальної гідрогазодинаміки. Найбільш поширеним інструментом для розв'язання подібних задач є програмний комплекс ANSYS Fluent, який забезпечує можливість моделювання тривимірних турбулентних течій із

врахуванням складної геометрії проточного каналу та реальних фізичних властивостей робочого тіла.

Чисельне моделювання дозволяє отримати детальну інформацію про локальні особливості течії, зокрема про формування вихрових структур, зони рециркуляції, втрати повного тиску та нерівномірність розподілу швидкостей. Це, у свою чергу, створює підґрунтя для кількісної оцінки енергетичних характеристик турбіни, включаючи коефіцієнт корисної дії, втрати в проточному тракті та ефективність перетворення енергії [4].

Важливу роль відіграє вибір адекватної моделі турбулентності, оскільки саме вона визначає точність відтворення структури потоку. Використання сучасних двопараметричних моделей (наприклад, $k-\varepsilon$, $k-\omega$ SST) або більш складних підходів, таких як LES чи DES, дозволяє з достатньою достовірністю описати анізотропію турбулентності, відриви потоку та взаємодію струменів у міжлопаткових каналах [5].

При переході від метану до водневмісних газових сумішей значення такого моделювання суттєво зростає. Зменшення молярної маси призводить до суттєвої трансформації структури течії, зокрема до зміни числа Маха, характеру розширення та інтенсивності втрат.

Для дослідження впливу фізико-хімічних властивостей водню на ефективність перетворення енергії було проведено комплексний розрахунок вихрового турбогенератора номінальною потужністю 10 кВт для власних потреб ГРС. Оскільки зменшення молярної маси робочого тіла безпосередньо впливає на газодинаміку потоку, оптимізація проточної частини є важливою [3]. Виконані розрахунки турбогенератора при роботі його на природному газі, водні та газоводневій суміші. Отримані термогазодинамічні і геометричні параметри турбогенераторів, проведено їх порівняння та аналіз.

Список літератури

1. Vivanco-Martín, B., Iranzo, A. (2023). Analysis of the European strategy for hydrogen: a comprehensive review. *Energies*, 16(9), 3866.
2. Topolski, K., Reznicek, E., Erdener, B. C., San Marchi, C., Ronevich, J. A., Fring, L., et al. (2022). Hydrogen blending into natural gas pipeline infrastructure: Review of the state of technology (p. 82477). Golden, CO, USA: National Renewable Energy Laboratory.
3. Vaneev S. M., Martsynkovskyy V. S., Kulikov A., et al. Investigation of a Turbogenerator Based on the Vortex Expansion Machine with a Peripheral Side Channel dynamometer // *Journal of Engineering Sciences*. – 2021 – Vol. 8(1) (2021). – P. F11–F18.
4. San Andrés, L. (2023). A review of turbine and compressor aerodynamic forces in turbomachinery. *Lubricants*, 11(1), 26.
5. Gorman, J., Bhattacharyya, S., Cheng, L., Abraham, J. P. (2021). Turbulence models commonly used in CFD. *Applications of Computational Fluid Dynamics Simulation and Modeling*.

ЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧІ ТУРБОГЕНЕРАТОРНІ АГРЕГАТИ НА БАЗІ СТРУМИННО-РЕАКТИВНИХ ТУРБІН

*Вансєв С. М., зав. каф. ТТФ; Дмитрієв В. О., студ. гр. К.м-41;
Мєдведєв Р. О., студ. гр. І-21/2хк; Карцев О. С., студ. гр. І-21/2хк-3,
Сумський державний університет, м. Суми*

З аналізу застосування утилізаційних турбогенераторних агрегатів встановлено, що існує велика потреба в турбогенераторних установках малої потужності (до 500 кВт) та проблема створення їх недорогими, надійними, з малим терміном окупності.

Перспективним є створення утилізаційних турбодетандерних установок на базі струминно-реактивних і вихрових турбін, переваги яких дозволяють отримати турбопривід або турбогенератор максимально простий та надійний, з терміном окупності 1–2 роки.

В існуючих турбогенераторних установках використовуються як швидкохідні турбодетандери, що з'єднуються з генератором через редуктор, так і турбодетандери, ротор яких безпосередньо з'єднаний з електрогенератором.

Потужність діючих утилізаційних турбогенераторних установок на базі осьових і доцентрових турбін, як правило, більше 1 МВт, хоча основна частина газорозподільних станцій, газорегулюючих пунктів і котельнь має корисну потужність менше 1 МВт. Потрібні конструктивно прості, надійні в експлуатації детандер-генераторні установки та агрегати малої потужності, у тому числі і для забезпечення власних потреб ГРС, ГРП та різних котельнь.

З розгляду опису конструкцій працюючих утилізаційних детандер-генераторних агрегатів, в основному, на основі осьових і доцентрових турбін видно, що в порівнянні з регулюючими пристроями, що використовуються на газорозподільних станціях і газорегулюючих пунктах вони являють собою складні енергетичні об'єкти, незважаючи на спеціальні підходи до їх конструювання і проектування.

Виконані дослідження струминно-реактивної турбіни (СРТ) для турбогенератора потужністю 200 кВт при тиску газу на вході СРТ 2,6 МПа, тиску газу на виході СРТ 0,4 МПа, температурі газу на вході СРТ 288 К.

Отримані параметри і характеристики струминно-реактивної турбіни у вигляді залежностей моменту, потужності і ККД на валу машини від частоти обертання ротора. Встановлено, що потужність турбогенератора 200 кВт, досягається при частоті обертання ротора струминно-реактивної турбіни близької до 20 000 об/хв.

Конструктивно робоче колесо струминно-реактивної турбіни може бути розташовано на валу високочастотного електрогенератора, або в конструкції турбогенератора треба мати зубчасту передачу.

Робота виконана в межах науково-дослідницької роботи № 0126U000876, що виконується на замовлення МОН України.

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧИХ ТУРБОГЕНЕРАТОРНИХ АГРЕГАТІВ НА БАЗІ СТРУМИННО-РЕАКТИВНИХ ТУРБІН

*Мелейчук О. С., аспірант; Ванєєв С. М., зав. каф. ТТФ,
Сумський державний університет, м. Суми*

Загострення міжнародних конфліктів та постійне підвищення цін на енергоносії посилюють інтерес світової спільноти, та особливо України, до трансформації/модернізації енергетичних систем з метою підвищення їхньої ефективності, надійності та екологічності. Ключову роль у цій трансформації відіграє децентралізація виробництва енергії [1] та інтеграція відновлюваних та/або інноваційних джерел енергії на підприємствах та в міську інфраструктуру [2].

Потенційним рішенням в децентралізації енергосистеми та підвищенні енергоефективності наявного обладнання є використання турбінного обладнання на основі струминно-реактивних турбін (СРТ) або вихрових турбін потужністю до 500 кВт. Турбогенераторні агрегати на основі СРТ дозволяють перетворювати потенційну енергію стиснених газів або пари на електроенергію для потреб хімічної, газової промисловості та комунальних установ.

Метою роботи є підвищення енергоефективності струминно-реактивних розширювальних машин та уточнення методики розрахунку їхніх основних параметрів та характеристик.

В роботі [3] представлено експериментальні дані про роботу парового турбогенераторного агрегату потужністю до 475 кВт на основі СРТ каналного типу та проведено перевірку обчислювальної моделі гідродинаміки (CFD) на відповідність отриманим результатам. Під час експериментальних випробувань установка досягнула вихідної електричної потужності 404 кВт при швидкості обертання ротора турбіни 25 000 об/хв. На основі цих даних виконано чисельне моделювання течії пари у проточній частині СРТ за допомогою програмного забезпечення ANSYS CFX. Представлено результати порівняння експериментальних даних з результатами чисельного моделювання. Зокрема, отримано, що розбіжність визначення потужності та моменту на валу СРТ за результатами чисельних досліджень і за результатами натурних випробувань складає 1,6 %; розбіжність визначення масової витрати пари на вході в турбіну – 1,34%. Результати дослідження [3] підтвердили правильність вибору параметричної моделі та чисельного моделювання, засвідчивши високу точність прогнозованих параметрів роботи агрегату.

Іншим перспективним напрямком для впровадження турбогенераторів на базі СРТ, для підвищення ефективності існуючого обладнання, є газорозподільні станції (ГРС). У цій роботі проведено чисельні дослідження СРТ, що працює на природному газі, з подальшою оптимізацією геометрії її

проточної частини, для підвищення її ефективності. Фундаментом для даного дослідження є результати чисельного моделювання СРТ, котрі отримані та верифіковані для водяної пари як робочого тіла. За результатами моделювання були отримані основні характеристики в діапазоні частоти обертання ротора СРТ від 0 об/хв до 25 000 об/хв включно, такі як: крутний момент на валу СРТ; потужність; ККД; масові витрати. Також встановлено, що максимальна потужність агрегату становить 204,06 кВт та максимальний ККД сягає 0,486 при частоті обертання 25000 об/хв.

Оптимізаційні дослідження були спрямовані на визначення впливу на ККД таких параметрів:

- відношення площі критичного перерізу підвідного сопла до площі критичного перерізу тягового сопла;
- відношення діаметра критичного перерізу підвідного сопла до діаметра входу в підвідне сопло;
- відношення діаметра входу в роторну частину проточної частини до діаметра критичного перерізу підвідного сопла.

За результатами оптимізації визначено раціональні геометричні співвідношення, що дозволило підвищити потужність на 45,5 кВт (19,2%) та збільшити ККД на 1,8%.

В даній роботі вперше виконано моделювання та дослідження СРТ каналного типу за допомогою програмного комплексу ANSYS CFX і проведено верифікацію отриманих результатів. Створено параметричну модель і проведено оптимізаційні дослідження, що дозволяють досліджувати вплив геометричних і газодинамічних параметрів на їх ефективність і характеристики. Отримані результати підтверджують доцільність використання СРТ як автономних джерел живлення для об'єктів газової та хімічної промисловості, що забезпечує низьку собівартість генерації, підвищує національну енергетичну безпеку, відповідає цілям сталого розвитку.

Список літератури

1. Hiremath R. B., Shikha S., Ravindranath N. H. Decentralized energy planning; modeling and application - a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2007. Vol. 11, No. 5. P. 729-752.
2. Adil A. M., Ko Y. Socio-technical evolution of Decentralized Energy Systems: A critical review and implications for urban planning and policy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2016. Vol. 57. P. 1025-1037.
3. Meleychuk O., Vaneev S., Koroliov S., Miroshnichenko O., Pavlenko I., Ochowiak M., Włodarczak S., Krupińska A., Kruszelnicka I. CFD analysis of steam jet-reactive turbines for sustainable energy: The critical role of boundary conditions. *Journal of Engineering Sciences*. 2025. Vol. 12(2). P. F22–F31.

Робота виконана в межах науково-дослідницької роботи № 0126U000876, що виконується на замовлення МОН України.

ВИДИ ТУРБІННОГО ОБЛАДНАННЯ ТА ЙОГО РОЛЬ У ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННІ

*Кіхтенко П. О., уч. кл. 11-А, КУ «Сумська ЗОШ № 20», м. Суми;
Бага Т. С., асист. каф. ТТФ, Сумський державний університет, м. Суми*

У сучасних умовах розвитку енергетичного сектору та промислового виробництва дедалі більшої актуальності набуває проблема раціонального використання енергетичних ресурсів. Постійне зростання попиту на енергію, обмеженість природних запасів палива, а також необхідність зменшення техногенного навантаження на довкілля зумовлюють потребу у впровадженні ефективних енергозберігаючих технологій. У цьому контексті особливу роль відіграє застосування турбінного обладнання як одного з ключових засобів підвищення енергоефективності.

Турбіни являють собою енергетичні машини, призначені для перетворення енергії рухомого робочого середовища – пари, газу або води – у механічну енергію обертання вала. Отримана енергія може бути використана для приводу електрогенераторів, компресорів, насосів та інших технічних пристроїв. Завдяки своїй універсальності та високій ефективності турбіни знайшли широке застосування в енергетиці, промислових установках, транспортних системах та інших галузях.

Залежно від типу робочого середовища та конструктивних особливостей розрізняють кілька основних видів турбін. Найбільш поширеними є парові, газові та гідравлічні турбіни. Парові турбіни традиційно використовуються на теплових електростанціях, де енергія перегрітої пари перетворюється на механічну роботу. Газові турбіни широко застосовуються в енергетичних установках і авіаційній техніці, працюючи на продуктах згорання палива. Гідравлічні турбіни, у свою чергу, використовують кінетичну та потенціальну енергію водних потоків і є основним елементом гідроелектростанцій.

Застосування турбінного обладнання відіграє важливу роль у підвищенні ефективності енергетичних систем. Сучасні турбіни забезпечують високий коефіцієнт корисної дії та дозволяють максимально ефективно перетворювати енергію робочих потоків у корисну механічну або електричну енергію. Крім того, вони можуть використовуватися для утилізації вторинних енергетичних ресурсів, таких як теплота відпрацьованих газів, надлишковий тиск або залишкова енергія технологічних процесів.

Особливої уваги заслуговує використання турбін у когенераційних та комбінованих енергетичних установках, де одночасно виробляються електрична і теплова енергія. Такий підхід дозволяє суттєво підвищити загальну ефективність використання палива порівняно з традиційними методами роздільного виробництва енергії. У результаті досягається зниження витрат енергоресурсів і мінімізація теплових втрат.

Додатковою перевагою сучасних турбін є можливість їх інтеграції в існуючі виробничі системи без значних змін технологічного процесу. Це забезпечує гнучкість у використанні обладнання та сприяє швидкій адаптації підприємств до нових вимог енергоефективності. Водночас розвиток цифрових технологій і систем автоматизованого керування дозволяє оптимізувати режими роботи турбін, підвищуючи їх надійність і довговічність.

Не менш важливим є екологічний аспект застосування турбінного обладнання. Завдяки більш повному використанню енергії палива зменшується обсяг шкідливих викидів у атмосферу, що сприяє покращенню екологічної ситуації. Крім того, використання відновлюваних джерел енергії, таких як гідроенергетика, у поєднанні з турбінами відкриває додаткові можливості для зниження впливу на навколишнє середовище.

Отже, використання різних типів турбінного обладнання є одним із ключових факторів підвищення ефективності сучасної енергетики. Подальший розвиток турбінних технологій, удосконалення їх конструкцій та впровадження інноваційних рішень сприятимуть більш раціональному використанню енергетичних ресурсів, зниженню витрат та забезпеченню екологічної безпеки.

Таким чином, турбінні установки відіграють важливу роль у формуванні енергоефективної та екологічно орієнтованої енергетичної системи, що відповідає сучасним вимогам сталого розвитку. Їх впровадження дозволяє не лише підвищити ефективність використання паливно-енергетичних ресурсів, але й забезпечити стабільність та надійність енергопостачання в умовах зростаючих навантажень. Крім того, застосування турбінних технологій сприяє модернізації промислових підприємств і переходу до більш інноваційних та ресурсозберігаючих виробничих процесів. У перспективі подальший розвиток таких систем стане важливим чинником зміцнення енергетичної безпеки та конкурентоспроможності економіки.

Список літератури

1. Закон України «Про комбіноване виробництво теплової та електричної енергії (когенерацію) та використання скидного енергопотенціалу».
2. Кудря С. О. Нетрадиційні та відновлювані джерела енергії : підручник. – Київ : НТУУ «КПІ», 2012.
3. Денисюк С. П. Енергоефективність та енергозбереження : навчальний посібник. – Київ : НТУУ «КПІ», 2015.
4. Барановський М. І. Енергетичні установки та турбіни : навчальний посібник. – Харків, 2018.
5. Коваленко Г. В. Сучасні турбінні установки та їх ефективність // Технічні науки. – 2020.

АКТУАЛЬНІСТЬ ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ: ВИКОРИСТАННЯ ВТОРИННИХ ЕНЕРГОРЕСУРСІВ І ТУРБІННОГО ОБЛАДНАННЯ

*Кіхтенко П. О., уч. кл. 11-А; КУ «Сумська ЗОШ № 20», м. Суми;
Бага Т. С., асист. каф. ТТФ, Сумський державний університет, м. Суми*

Сьогодні питання енергозбереження набуває особливої ваги через глобальні виклики, пов'язані з вичерпністю традиційних джерел енергії, постійним зростанням її споживання в промисловому секторі та потребою підвищення загальної енергоефективності економіки. Ефективне та ощадливе використання енергетичних ресурсів, а також мінімізація втрат енергії є важливими чинниками забезпечення сталого розвитку країни, її енергетичної незалежності та екологічної стабільності.

Під енергозбереженням розуміють сукупність організаційних, технічних і економічних рішень, спрямованих на більш раціональне використання паливно-енергетичних ресурсів. Особливо актуально це для галузей із високою енергоємністю, де значні обсяги енергії втрачаються у вигляді тепла, відхідних газів або надлишкового тиску в технологічних процесах.

Перспективним напрямом підвищення ефективності є залучення вторинних енергетичних ресурсів — енергії, що виникає як побічний результат виробництва та часто не використовується повторно. До таких ресурсів належать гарячі відпрацьовані гази, надлишковий тиск пари чи газів, а також теплота систем охолодження. Їх раціональне використання дозволяє суттєво скоротити споживання первинних енергоресурсів.

Одним із дієвих способів утилізації цієї енергії є використання турбінного обладнання. Парові та газові турбіни здатні перетворювати теплову або потенціальну енергію потоків у механічну, яка згодом трансформується в електричну. Застосування таких установок у когенераційних або комбінованих схемах дає змогу підвищити загальний коефіцієнт корисної дії енергосистем до 70–85 %, що значно перевищує ефективність традиційного окремого виробництва теплової та електричної енергії.

Додатковою перевагою турбінних систем є можливість їх інтеграції в існуючі виробничі процеси без значних змін у технологічному циклі. Це сприяє швидкій окупності вкладених коштів за рахунок економії енергоресурсів і зменшення витрат на електроенергію. Крім того, зниження споживання палива позитивно впливає на екологічну ситуацію, зменшуючи обсяги викидів парникових газів та інших забруднювачів.

З огляду на сучасні енергетичні виклики та необхідність зміцнення енергетичної стійкості підприємств, використання вторинних ресурсів із залученням турбінного обладнання є не лише технічно обґрунтованим, а й стратегічно важливим напрямом розвитку.

Впровадження турбінних установок для використання вторинної енергії є ефективним засобом підвищення енергоефективності, зниження витрат і забезпечення екологічної безпеки промислових об'єктів.

АКТУАЛЬНІСТЬ ВИКОРИСТАННЯ ТЕПЛОБМІННИХ АПАРАТІВ У ПРОМИСЛОВОСТІ

*Маценко М. О., студ. гр. 210, ВСП «Машинобудівний фаховий коледж
СумДУ», м. Суми; Бага Т. С., асист. каф. ТТФ, Сумський
державний університет, м. Суми*

Сучасна промисловість характеризується стрімким зростанням споживання енергетичних ресурсів. У зв'язку з цим дедалі більшої важливості набуває підвищення енергоефективності технологічних процесів. Одним із ключових напрямів раціонального використання енергії є впровадження теплообмінних апаратів, які забезпечують передачу теплової енергії між різними середовищами, сприяючи її ефективному використанню.

Теплообмінне обладнання активно застосовується в багатьох галузях промисловості, зокрема в енергетиці, хімічній, харчовій та нафтопереробній сферах. Його головна функція полягає у передачі тепла від більш нагрітого середовища до холоднішого без змішування потоків. Це дозволяє реалізовувати такі процеси, як нагрівання, охолодження, конденсація та випаровування, що є невід'ємними складовими багатьох технологічних операцій.

Застосування теплообмінників сприяє істотному зниженню теплових втрат і підвищенню загальної ефективності виробництва. Зокрема, теплова енергія відпрацьованих газів або гарячих потоків може бути повторно використана для підігріву води, повітря чи інших робочих середовищ. Це дає змогу скоротити витрати палива, зменшити енергоспоживання та підвищити коефіцієнт корисної дії енергетичних систем.

Важливу роль відіграють сучасні типи теплообмінних апаратів, такі як кожухотрубні, пластинчасті та спіральні. Вони відзначаються високою інтенсивністю теплопередачі, компактністю та надійністю під час експлуатації. Удосконалення їх конструкції дозволяє підвищувати ефективність теплообміну, зменшувати розміри обладнання та оптимізувати роботу технологічних процесів.

Окрім економічних переваг, використання теплообмінних апаратів має значний екологічний ефект. Раціональне використання теплової енергії сприяє зменшенню споживання паливно-енергетичних ресурсів і, відповідно, скороченню шкідливих викидів у довкілля.

Отже, теплообмінні апарати є важливою складовою сучасних енергоефективних технологій. Подальші наукові дослідження в цій галузі мають бути спрямовані на вдосконалення їх конструкцій, підвищення ефективності роботи та розширення сфер застосування в промисловості.

Таким чином, розвиток і впровадження сучасного теплообмінного обладнання сприяє підвищенню енергоефективності виробництва та забезпеченню екологічної безпеки підприємств.

ВИКОРИСТАННЯ ПІСКОСТРУМИННОГО ОБЛАДНАННЯ У ПРОМИСЛОВОСТІ

Щербак Д. В., студ. гр. ДІ-1; Сумський фаховий коледж будівництва та архітектури, м. Суми; Бага В. М., доц. каф. ТТФ; Бага Т. С., асист. каф. ТТФ, Сумський державний університет, м. Суми

У сучасних умовах розвитку промислового виробництва важливим завданням є забезпечення належної якості обробки поверхонь різноманітних матеріалів і конструкцій. Це питання є особливо актуальним для таких галузей, як машинобудування, будівництво та енергетика, де стан поверхні безпосередньо впливає на надійність, зносостійкість і тривалість експлуатації обладнання. Одним із найбільш ефективних способів очищення та підготовки поверхонь є застосування піскоструминних технологій.

Піскоструминна обробка являє собою процес, у якому очищення матеріалу здійснюється за допомогою потоку абразивних частинок, що подаються під тиском стисненого повітря. Такий підхід дає змогу швидко й ефективно видаляти корозію, залишки старих покриттів, окалину, пил та інші забруднення з поверхонь металу, бетону чи каменю.

Піскоструминне обладнання широко використовується в різних сферах промисловості. Його застосовують для підготовки поверхонь перед фарбуванням або нанесенням антикорозійних покриттів, очищення деталей машин і механізмів, відновлення металоконструкцій, а також для декоративної обробки скла та інших матеріалів. Завдяки цьому покращується якість наступних технологічних операцій і суттєво збільшується термін служби виробів.

Сучасні установки для піскоструминної обробки характеризуються високою продуктивністю та ефективністю роботи. Вони здатні використовувати різні типи абразивів, зокрема кварцовий пісок, металевий дріб, корунд і скляні кульки. Застосування новітніх технологічних рішень дозволяє досягати більшої точності обробки, знижувати витрати енергоресурсів і підвищувати економічну доцільність використання обладнання.

Окреме значення піскоструминні технології мають у сфері ремонтних і відновлювальних робіт, що особливо важливо в умовах підвищених навантажень на інфраструктуру. Якісне очищення поверхонь від іржі та забруднень забезпечує кращу адгезію захисних матеріалів, що, у свою чергу, підвищує довговічність конструкцій і знижує витрати на їх подальше обслуговування.

Важливим напрямом удосконалення піскоструминного обладнання є підвищення рівня безпеки праці та екологічності процесів. Сучасні системи оснащуються ефективними установками пиловловлювання, вентиляції та повторного використання абразивів, що дозволяє зменшити негативний вплив на навколишнє середовище та здоров'я працівників. Крім того,

впровадження автоматизованих систем керування сприяє оптимізації процесу обробки, підвищенню його стабільності та якості.

Важливою перевагою піскоструминної обробки є її універсальність та можливість застосування для різних типів матеріалів і поверхонь. Технологія дозволяє працювати як із великими металоконструкціями, так і з дрібними деталями складної форми, забезпечуючи рівномірне очищення навіть у важкодоступних місцях. Це робить піскоструминне обладнання незамінним у багатьох виробничих процесах.

Крім того, розвиток сучасних технологій сприяв появі нових різновидів піскоструминної обробки, таких як гідроабразивна або вакуумна обробка. Вони дозволяють зменшити утворення пилу, підвищити безпеку роботи та покращити контроль за процесом очищення. Це особливо важливо при роботі в закритих приміщеннях або в умовах підвищених вимог до екологічності.

Не менш значущим є економічний аспект використання піскоструминних установок. Хоча первинні витрати на обладнання можуть бути значними, у довгостроковій перспективі вони компенсуються за рахунок підвищення якості обробки, зменшення витрат на ремонт і продовження терміну експлуатації виробів. Таким чином, використання таких технологій є економічно обґрунтованим рішенням.

Слід також зазначити, що автоматизація піскоструминних процесів відкриває нові можливості для підвищення продуктивності праці. Використання роботизованих систем дозволяє мінімізувати вплив людського фактора, забезпечити стабільність якості обробки та підвищити безпеку персоналу. Це особливо актуально для великих промислових підприємств.

Отже, застосування піскоструминного обладнання є невід'ємною складовою сучасних виробничих процесів. Подальше вдосконалення таких технологій сприятиме підвищенню якості обробки поверхонь, зниженню витрат матеріалів і ресурсів, а також загальному зростанню ефективності промислового виробництва.

Список літератури

1. Енергетична стратегія України на період до 2030 року: схвалено розпорядженням від 15 березня 2006 р. / Кабінет Міністрів України. – К. : Парлам. вид-во, 2006. – 129 с.
2. Кузнецов В. Г. Технології очищення поверхонь у промисловості. – Київ : Техніка, 2015.
3. Сидоренко О. В. Сучасні методи абразивної обробки матеріалів. – Харків : ХНУ, 2018.

Робота виконана у межах науково-дослідної роботи «Розробка мобільної ежекторно-очисної установки для відновлення будівель, споруд та техніки після пожеж у військовий період» (держреєстрація № 0124U000636)».

ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОЧИХ ХАРАКТЕРИСТИК СОПЛА ВЕНТУРИ

*Бага В. М., доц. каф. ТТФ; Чернетський В. Ю., студ. гр. К.м.-41;
Дяченко С. С., студ. гр. І-21/2хк, Сумський державний університет, м. Суми*

У роботі проведено дослідження наявних конструктивних рішень та матеріалів, що застосовуються у виробництві комерційних зразків сопел для абразивоструминної обробки з використанням повітря як компонента робочого тіла. Розглянуто методику комп'ютерного моделювання процесів за допомогою програмного комплексу Ansys. Представлено детальні пояснення та рекомендації щодо налаштування вхідних параметрів, що спрямовані на оптимальне використання обчислювальних ресурсів під час вирішення заданих задач. Виконано чисельне моделювання фізичних процесів, які відбуваються всередині сопла та в зоні перед ним під час роботи в різних режимах, а також при зміні геометричних параметрів сопла. Дослідження проводилося на прикладі конструкції сопла моделі UDC32-450 із використанням програмного забезпечення ANSYS версії 2024 R2.

Проведено аналіз отриманих результатів моделювання, на основі якого сформовано перелік рекомендацій щодо оптимальних режимів експлуатації сопла цієї конструкції для виконання абразивоструминної обробки поверхонь. Також запропоновано напрями для подальших досліджень, спрямовані на вдосконалення характеристик даної конструкції сопла.

Виконано практичне моделювання фізичних процесів у соплах різної конфігурації при протіканні потоків із одно- та двофазним середовищем. Виконано аналіз результатів моделювання, на основі якого сформовані висновки щодо впливу геометрії проточної частини сопел, рівня подачі фракції піску, залежності вихідних параметрів від вхідного тиску тощо. Виявлено тенденцію до зростання коефіцієнта витрати повітряно-абразивної суміші та її витратної швидкості зі збільшенням внутрішнього діаметра сопла за сталих умов тиску на вході.

У процесі моделювання отримано розподіл швидкостей у робочих соплах абразивоструминної установки. Встановлено, що максимальний градієнт швидкості зосереджений у зоні розгону.

Список літератури

1. Venturi Flow Meter Manufacturers [Electronic resource] // Primary Flow Signal. – 2025. <https://www.primaryflowsignal.com/products/venturi-flow-meters>
2. Abrasive Blasting Nozzle Market Size, 2024–2032 Trends // Global Market Insights. – 2024. <https://www.gminsights.com/industry-analysis/abrasive-blasting-nozzle-market>

Робота виконана у межах науково-дослідної роботи «Розробка мобільно ежекторно-очисної установки для відновлення будівель, споруд та техніки після пожеж у військовий період» (держреєстрація № 0124U000636)».

**СЕКЦІЯ «ТЕХНІЧНА
ТЕПЛОФІЗИКА»**

ОПТИМІЗАЦІЯ РЕЖИМУ РОБОТИ БІВАЛЕНТНИХ ТЕПЛОВИХ НАСОСІВ ДЛЯ СИСТЕМИ ОПАЛЕННЯ В ЗАЛЕЖНОСТІ ВІД ВНУТРІШНІХ ТА ЗОВНІШНІХ ТЕМПЕРАТУРНИХ ФАКТОРІВ

Лабаш О. С., студ. гр. ХК.з-21с; Баран В. В., викладач, Дрогобицький фаховий коледж нафти і газу, м. Дрогобич; Мелейчук С. С., доц. каф. ТТФ, Сумський державний університет, м. Суми

Теплові насоси типу «повітря-вода» є перспективним рішенням для систем опалення приміщень завдяки використанню низькопотенційної енергії зовнішнього повітря, однак їх ефективність істотно залежить від температурних умов експлуатації. Зі зниженням зовнішньої температури зменшується коефіцієнт перетворення теплового насоса (COP), а тому в реальних умовах такі установки доцільно використовувати не в моновалентному, а в бівалентному режимі. Бівалентний режим роботи досягається за рахунок покриття частини теплового навантаження за допомогою додаткового джерела тепла, наприклад, електронагрівача або теплогенератора на газоподібному чи твердому паливі.

Актуальність дослідження полягає у необхідності вибору раціонального режиму взаємодії теплового насоса та резервного теплогенератора залежно від зміни температури навколишнього середовища і поточного теплового навантаження приміщення. Правильно обраний температурний режим роботи теплового насоса у моновалентному режимі, вчасний перехід на бівалентний режим роботи, дозволяє зменшити експлуатаційні витрати та підвищити ефективність системи. Тому визначення оптимальної точки бівалентності є важливим завданням під час проектування сучасних енергоефективних систем теплопостачання.

Аналіз режиму роботи теплового насоса типу «повітря-вода» показав, що найбільш раціональним діапазоном дослідження з точки зору рівня COP за зовнішньою температурою повітря є необхідність переходу на бівалентний режим роботи при зниженні температури нижче 5 °С, а також ввімкнення додаткового теплогенеруючого пристрою для системи опалення при температурі теплоносія вище за 45–50 °С.

Практичне значення даної роботи полягає у можливості обґрунтування рекомендацій щодо вибору температурної межі переходу на бівалентний режим роботи, за якої установка забезпечує мінімальне енергоспоживання при максимальному COP та необхідний рівень компенсації тепловтрат через огорожі для підтримки комфорту в приміщенні. Отримані результати можуть бути використані при проектуванні автономних систем опалення житлових і громадських будівель, де важливими є як енергоефективність, так і надійність роботи обладнання впродовж усього опалювального сезону. Очікується, що оптимізація режимів роботи теплового насоса у бівалентному режимі дозволить знизити експлуатаційні витрати та підвищити загальну ефективність теплопостачання порівняно з традиційними схемами.

МІНІМІЗАЦІЯ ЕКСЕРГЕТИЧНИХ ВТРАТ У ТРАНСКРИТИЧНИХ CO₂-СИСТЕМАХ ШЛЯХОМ МОДИФІКАЦІЇ ПРОТОЧНОЇ ЧАСТИНИ СТРУМИННИХ ЕЖЕКТОРІВ

*Карпцов А. С., асп. гр. А-35/МБ; Назаренко М. В, студ. гр. К.м-41;
Мерзляков Ю. С., доц. каф. ТТФ, Сумський державний університет, м. Суми*

Сучасна холодильна індустрія перебуває на етапі глобальної трансформації, зумовленої необхідністю повної відмови від синтетичних холодоагентів із високим потенціалом глобального потепління (GWP). У цьому контексті використання діоксиду вуглецю (R744) як природного, нетоксичного та пожегобезпечного робочого тіла є одним із найбільш перспективних рішень для теплових насосів та холодильних установок [1].

Однак специфіка термofізичних властивостей CO₂ вимагає роботи системи в транскритичному режимі, де відведення теплоти відбувається за надкритичного тиску без фазового переходу. Найбільш критичним недоліком такого циклу є значні незворотні втрати енергії (ексергетичні втрати) у процесі дроселювання холодоагенту від високого тиску в газоохолоджувачі до низького тиску у випарнику. У традиційних системах ця енергія розсіюється, що суттєво знижує загальну енергоефективність установки.

Використання струминних ежекторів замість класичних дросельних пристроїв дозволяє частково рекуперувати енергію розширення потоку. В ежекторі потік високого тиску (активний) прискорюється в соплі, створюючи зону розрідження, яка всмоктує потік низького тиску (пасивний) з випарника. Це призводить до підвищення тиску на вході в компресор, що безпосередньо зменшує його роботу стиснення та дозволяє значно підвищити холодильний коефіцієнт (COP) системи [2].

Ключовою перешкодою для впровадження цієї технології є складність процесів, що відбуваються всередині проточної частини пристрою. Існуючі моделі часто демонструють низьку термодинамічну ефективність через нерівномірний профіль швидкостей у камері змішування та виникнення ударних хвиль (стрибків ущільнення), які спричиняють втрати тиску. Крім того, конструкції мають обмежену адаптивність до динамічних умов експлуатації: навіть незначні коливання температури навколишнього середовища змінюють параметри газу на вході, що виводить ежектор з оптимального режиму роботи. Відсутність гнучкого регулювання критичного перерізу сопла та положення виходу сопла (NXP) призводить до суттєвого падіння ККД при часткових навантаженнях [3].

Для детального вивчення структури потоку та проведення геометричної оптимізації застосовуються методи обчислювальної гідродинаміки (CFD). Основним інструментом розрахунку є програмний комплекс ANSYS CFX, який дозволяє моделювати надзвукові потоки CO₂ з урахуванням реальних властивостей газу та можливої конденсації. В межах дослідження виконується серія чисельних експериментів для визначення впливу кутів

розкриття дифузора, конфігурації камери змішування та геометрії сопла Лавалю на інтегральні характеристики пристрою. Такий підхід дозволяє візуалізувати зони турбулентної дисипації енергії та знайти оптимальне співвідношення площ перерізів для максимального коефіцієнта інжекції [4].

Аналіз технічних рішень провідних компаній, таких як Danfoss, свідчить, що інтеграція багатосоплових блоків або ежекторів із регульованою голкою дозволяє стабілізувати роботу транскритичних систем у широкому діапазоні робочих параметрів. Оптимізація форми камери змішування забезпечує ефективніше передавання імпульсу від активного потоку до пасивного, що мінімізує гідравлічний опір. Модифікація геометрії дифузора сприяє плавному перетворенню кінетичної енергії в потенційну енергію тиску. За попередніми даними CFD-моделювання, усунення застійних зон та відривів потоку дозволяє підвищити енергоефективність циклу на 15–22% залежно від режиму.

Вдосконалення конструктивних параметрів струминних ежекторів є необхідним кроком для повноцінного впровадження транскритичних CO₂-технологій, особливо в системах, де використання складних сопел Лавалю обмежене технологічними чи економічними чинниками. Застосування сучасних засобів чисельного аналізу (ANSYS CFX) дає можливість проектувати апарати з високим ступенем адаптивності, що забезпечує стабільну та економічну роботу промислового холодильного обладнання навіть за умови використання спрощеної геометрії сопла.

Відмова від розширювальної частини сопла (дифузора сопла) зміщує фокус дослідження на зону безпосередньо за критичним перерізом, де відбувається інтенсивне розширення надкритичного CO₂ та формування структури недорозширеного струменя. У такому випадку ключовим завданням оптимізації стає точне визначення відстані від зрізу сопла до входу в камеру змішування (NXP), оскільки саме тут виникають найбільш інтенсивні хвилі розрідження та стрибки ущільнення [5].

Список літератури

1. Danfoss. Ejector Technology for Transcritical CO₂ Refrigeration Systems. Technical Report, 2022.
2. Gullo, P., et al. Advanced ejector-based CO₂ refrigeration systems: A review on state-of-the-art and future trends. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2022.
3. Zhang, J., Liu, H. Numerical Simulation and Optimization of Ejectors in CO₂ Refrigeration Systems. *Applied Thermal Engineering*, 2019.
4. Elbel, S. Historical and present developments of ejector technology in refrigeration applications. *International Journal of Refrigeration*, 2021.
5. Radermacher, R., Kairouani, L. Ejector Systems for Refrigeration and Air Conditioning Applications. *ASHRAE Transactions*, 2020.

НАУКОВО-ПРАКТИЧНІ ЗАСАДИ ДОСЛІДЖЕННЯ ФІЗИЧНИХ ПРОЦЕСІВ У РІДИННО-ПАРОВИХ СТРУМИННИХ АПАРАТАХ

*Чех О. Ю., аспірант; Мерзляков Ю. С., доц. каф. ТТФ; Арсеньєв В. М.,
проф. каф. ТТФ, Сумський державний університет, м. Суми*

Сучасні тенденції в галузі струминних апаратів спрямовані на значне підвищення їхньої енергетичної ефективності, екологічності та розширення сфер застосування через використання нових фізичних принципів та методів проектування. Замість традиційних пароструминних ежекторів, які мають обмежений ступінь підвищення тиску та низький ККД (2–10%), дедалі частіше розробляються рідинно-парові струминні апарати (РПСА), що працюють за принципом струминної термокомпресії [1]. У РПСА робоча пара генерується безпосередньо в соплі активного потоку внаслідок закипання недогрітої до насичення рідини, що дозволяє утилізувати низькопотенційне тепло замість витрат механічної енергії на привід компресорного обладнання [2, 3]. Такі пристрої все ширше впроваджуються в:

- ежекторні холодильні та теплонасосні установки;
- системи утилізації тепла котельних установок;
- вакуумні випарні установки харчової промисловості (наприклад, для згущення молока), що дозволяє спростити конструкцію та знизити споживання пари у 2,25–4,1 рази;
- конденсаційні установки парових турбін для відкачування пароповітряної суміші, де вони підвищують ефективність у 2,3 рази порівняно з традиційними схемами.

Щодо питання математичного моделювання процесів у таких апаратах, то у роботі [4] запропоновано нову методику визначення максимально досяжного тиску рідинно-парового струминного ежектора (РПСЕ) з використанням комп'ютерних (електронних) термодинамічних h, s -діаграм. У представленій новій методиці h, s -діаграми (ентальпійно-ентропійні діаграми) використовуються як основний інструмент для точного визначення термодинамічних параметрів робочої речовини в усіх ключових точках циклу роботи рідинно-парового струминного ежектора. На основі отриманих термодинамічних даних ця методика дає змогу розрахувати основні геометричні розміри та експлуатаційні характеристики РПСЕ для різних робочих режимів. Запропонований авторами підхід дозволяє проводити оцінку максимально досяжного тиску в апараті, що допомагає визначити доцільність проектування ежектора під задані параметри. Важливою особливістю методу є його застосовність до різних робочих речовин та широкого діапазону початкових параметрів, що робить його гнучким та універсальним інструментом для інженерних розрахунків. Як зазначено у статті – створена методика забезпечує вищу точність прогнозування параметрів порівняно зі спрощеними одновимірними моделями, які використовувалися раніше.

Практичне значення результатів дослідження полягає у можливості вдосконалення проектування РПСЕ для енергетичних установок, що сприятиме підвищенню їхньої ефективності та надійності.

У той самий час, сучасне проектування струминних апаратів неможливо уявити без використання методів обчислювальної гідрогазодинаміки (CFD), що дозволяє візуалізувати структуру потоку (структуру факела розпилення та точки відриву потоку від стінок), виявити зони зворотньо-циркуляційних течій та ударних хвиль, візуалізувати поля тиску, швидкості та концентрації фаз, що складно здійснити лише шляхом лабораторних експериментів. Це суттєво скорочує витрати на натурні експерименти та дозволяє точніше налаштувати струминний апарат під конкретні робочі режими. В основі методів CFD лежить чисельне розв'язання фундаментальних рівнянь механіки суцільних середовищ: рівняння Нав'є–Стокса, рівняння Ейлера, рівняння збереження та рівняння стану [5].

За допомогою сучасних потужних обчислювальних програмних комплексів (наприклад, ANSYS Fluent або ANSYS CFX) застосовуючи розширену базу даних реальних властивостей речовин NIST REFPROP можна досліджувати широкий спектр робочих речовин, включаючи воду, водяну пару, синтетичні та природні холодильні агенти, гідрофторолефіни, а також зеотропні та азеотропні суміші, що перебувають у різних агрегатних станах з урахуванням процесів фазових переходів (випаровування та конденсації). З високою точністю досліджувати термодинамічні процеси в енергетичних установках на органічних циклах Ренкіна, системах охолодження, апаратах харчової промисловості тощо.

Список літератури

1. Chekh O., Sharapov S., Arsenyev V. Adiabated flowing streams in nozzles: influence of regular characteristics on relaxation steam formation. *Refrigeration engineering and technology*. 2019. Vol. 55(1). P. 10–14.
2. Flow modeling in a vortex chamber of a liquid–steam jet apparatus / I. Merzliakov та ін. *Processes*. 2022. Vol. 10(5). 984.
3. Increasing boiling fluid flowing efficiency from motive nozzles of two-phase ejectors / S. Sharapov та ін. *IOP conference series: materials science and engineering*. 2021. Vol. 1180(1). 012059.
4. Method of calculating the maximum achievable pressure of a liquid-vapor jet ejector using thermodynamic diagrams / S. Vanieiev et al. *Technical Sciences and Technologies*. 2025. Vol. 2(40). P. 32–40.
5. Theoretical substantiation of mathematical models of oil filtration through a porous medium / I. Ablicieva et al. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*. 2021. P. 571–581.

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИЙ СТЕНД ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛОЕЛЕКТРОГЕНЕРУЮЧОГО АГРЕГАТУ НА БАЗІ РІДИННО-ПАРОВОГО СТРУМИННОГО АПАРАТУ

*Шарапов С. О., доц. каф. ТТФ; Вербицький А. Р., аспірант; Євтушенко С. О.,
інж. I кат., Сумський державний університет, м. Суми*

Створення високоефективних теплоелектрогенеруючих агрегатів є пріоритетним напрямом розвитку української енергетики в даний час. Існуючі схемні рішення мають ряд суттєвих недоліків, що стримують їх впровадження в системи тепло- та електрозабезпечення як промислових, так і комунальних споживачів. Одним зі шляхів вирішення проблеми створення високоефективних когенераційних установок є створення теплоелектрогенеруючих агрегатів (ТЕГА) на базі рідинно-парових струминних апаратів. Для визначення оптимальних режимів роботи ТЕГА в системах тепло- та електрозабезпечення, автори вважають необхідним провести його експериментальне дослідження. Для цього в лабораторії технічної теплофізики Сумського державного університету було створено експериментальний стенд для дослідження термодинамічних та режимних параметрів теплоелектрогенеруючого агрегату на базі рідинно-парового струминного апарату.

Метою даного дослідження є визначення оптимальних режимних параметрів контурів генерації тепла та електроенергії для забезпечення максимальної ефективності агрегату. Об'єктом дослідження є термодинамічні та режимні параметри робочого струменя в циклі ТЕГА. Предметом дослідження є показники ефективності системи тепло- та електропостачання на базі ТЕГА.

Для досягнення поставленої мети, були сформульовані та потребують вирішення наступні завдання:

1. Створення експериментального стенду ТЕГА на базі рідинно-парового струминного апарату.
2. Експериментальне дослідження термодинамічних та режимних параметрів в контурі теплопостачання ТЕГА на базі рідинно-парового струминного апарату.
3. Експериментальне дослідження термодинамічних та режимних параметрів в контурі електрогенерації ТЕГА.
4. Аналіз факторів, які впливають на показники ефективності роботи ТЕГА на базі рідинно-парового струминного апарату з подальшою кореляцією математичної моделі.
5. Перевірка достовірності отриманих результатів шляхом порівняння результатів розрахунків та експериментальних досліджень.

Таким чином, проведення експериментальних досліджень ТЕГА на базі рідинно-парового струминного апарату дасть змогу стверджувати про доцільність його застосування в системах тепло- та електропостачання.

КОГЕНЕРАЦІЙНІ УСТАНОВКИ НА БАЗІ ДВОФАЗНИХ СТРУМИННИХ АПАРАТІВ ДЛЯ СИСТЕМ РОЗПОДІЛЕНОЇ ГЕНЕРАЦІЇ

Шарапов С. О., доц. каф. ТТФ; Вербицький А. Р., аспірант; Ткаченко Б. О., аспірант, Сумський державний університет, м. Суми

Комбіноване виробництво теплової та електричної енергії (англ. СНР – Combined Heat & Power) набуває широкого розповсюдження у воєнний час, що пов'язано, в першу чергу, з необхідністю забезпечити об'єкти критичної інфраструктури від постійних атак ворога. Також дуже важливим є питання безперебійного забезпечення енергоносіями як виробничих, так і побутових споживачів. Це питання є дуже важливим і вирішується на загальнодержавному рівні завдяки реалізації Стратегії розвитку розподіленої генерації на період до 2035 року. Згідно з положеннями цієї Стратегії в Україні має бути створено систему пунктів генерації тепла і електроенергії, щоб забезпечити споживачів від постійних атак на об'єкти критичної інфраструктури в умовах воєнного стану. Такий підхід має сприяти підвищенню рівня енергетичної безпеки, зменшенню залежності від централізованих джерел енергії та стимулюванню впровадження відновлюваних джерел енергії.

Серед існуючих міні-ТЕЦ можна виділити основні схемні рішення, серед яких міні-ТЕЦ:

- паротурбінні, на базі турбіни з протитиском і відпуском споживачам тепла всієї кількості відпрацьованої пари або її частини;
- паротурбінні, на базі конденсаційної турбіни з теплофікаційним відбором для відпуску пари споживачам тепла;
- газотурбінні, з використанням тепла вихлопних газів в котлі-утилізаторі або в регенеративному теплообміннику;
- дизельні, з виробництвом високопотенційного тепла з енергії вихлопних газів і низькопотенційного тепла, що генерується в контурі охолодження двигуна внутрішнього згорання;
- парогазові, з використанням тепла вихлопних газів для виробництва пари, що спрямовується в парову турбіну.

В умовах воєнного стану широкої популярності набувають міні-ТЕЦ малої потужності. Такі установки можуть бути інтегровані в існуючу систему без внесення значних змін в їх конструкцію. Їх ефективність значно зростає за умов утилізації низькопотенційного тепла, яке у традиційних установках втрачається. Найбільш ефективним на даний час є схемне рішення на базі струминного термокомпресорного модуля, основним апаратом якого є струминний термокомпресор, що працює за принципом струминної термокомпресії. Тому автори пропонують вдосконалити існуючу схему міні-ТЕЦ на його базі, провести її енергетичний та термoeкономічний аналізи та визначити оптимальні режими її роботи.

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ТЕПЛОЕЛЕКТРОГЕНЕРУЮЧИХ АГРЕГАТІВ НА БАЗІ РІДИННО-ПАРОВИХ СТРУМИННИХ АПАРАТІВ

Шарапов С. О., доц. каф. ТТФ; Вербицький А. Р., аспірант; Арсеньєв В. М., проф. каф. ТТФ, Сумський державний університет, м. Суми

Спроби створити децентралізовану систему енергозабезпечення, як побутових, так і промислових споживачів, з'явилися ще в середині ХХ ст. Перші міні-ТЕЦ були обладнані двигунами внутрішнього згоряння в поєднанні з турбінами, сумарна ефективність яких не перевищувала 15-20%. Спроби підвищити їх ефективність йдуть двома шляхами: зміна конструктивної схеми міні-ТЕЦ та регулювання режимних параметрів з метою досягнення максимальної продуктивності турбіни та конденсаторів. Модернізація міні-ТЕЦ шляхом впровадження пароструминних компресорів дала змогу підвищивши ефективність установки на 2-3%. Однак, невирішеним залишилося питання генерації робочої пари, яка необхідна для роботи пароструминного компресора. Підбір робочих параметрів пари перед турбіною дає змогу досить точно визначити діапазон ефективної роботи турбіни і збільшити кількість електроенергії, яку вона здатна виробити. Однак тоді невирішеним залишається питання вибору оптимальних параметрів компресора, який у запропонованих схемах знаходиться на одному валу з турбіною і напряму впливає на її ефективність.

Одним зі шляхів вирішення цих проблем, який би сприяв створенню децентралізованої системи тепло- та електропостачання може бути впровадження теплоелектрогенеруючих агрегатів (ТЕГА) на базі рідинно-парових струминних апаратів (РПСА). Широкий діапазон режимних параметрів РПСА дає змогу створити ТЕГА, які здатні забезпечити теплом, гарячою водою та електроенергією навіть окремо взятій будинку. Це майже знівелює втрати на об'єктах енергомережі у воєнний час.

Існуючі на даний час станції та установки, не дають змоги визначити яке схемне рішення є оптимальним для реалізації розподіленої генерації та створення енергоефективних агрегатів для цього. Тому автори провели дослідження схемних рішень на базі міні-ТЕЦ, теплонасосної установки та комбінованої схеми та оцінили доцільність їх впровадження в установки розподіленої генерації.

В результаті проведеного авторами дослідження, було визначено, що найбільш ефективною є комбінована схема ТЕГА, оскільки має найвищий COP. Він на 4,5% вище ніж у схеми на базі міні-ТЕЦ та на 9,75% вище ніж у теплонасосної схеми. Також найвища у комбінованої схеми найвища ексергетична ефективність. Вона складає 0,353, що на 12% вище ніж у схеми на базі міні-ТЕЦ та на 23% вище ніж у теплонасосної схеми. В результаті термoeкономічного аналізу розраховано тарифи на тепло, гарячу воду та електроенергію для пропонованих схем. Найнижчі тарифи для комбінованої схеми. Також слід відзначити, що для всіх пропонованих схем тарифи є нижчими за загальнодержавні.

ТЕПЛОВИЙ ПУНКТ ДЛЯ СИСТЕМИ ІНДИВІДУАЛЬНОГО ОПАЛЕННЯ НА БАЗІ ВОДОСТРУМИННОГО ЕЖЕКТОРА

Шаранов С. О., доц. каф. ТТФ; Ковнір С. В., студент; Щербак Я. В., студ. гр. К.м-41, Сумський державний університет, м. Суми

В умовах російсько-Української війни перехід до децентралізованих систем опалення є пріоритетним напрямом розвитку енергетики, що задекларований на державному рівні Стратегією розвитку розподіленої генерації на період до 2035 року. Вона розроблена відповідно до вимог Directive (EU) 2019/944 of the European Parliament and of the Council of 5 June 2019 on common rules for the internal market for electricity and amending Directive 2012/27/EU (recast). Згідно з цією Стратегією, для повноцінного функціонування мережі децентралізованих когенераційних установок, в Україні необхідно мати більше 18 000 МВт теплової та електричної потужності.

Одним з можливих шляхів реалізації цієї Стратегії в частині тепlopостачання є створення високоефективних децентралізованих теплових пунктів на базі водоструминних ежекторів та забезпечення їх ефективної роботи. Головними перевагами теплових пунктів на базі водоструминних ежекторів є їх енергетична незалежність від перебоїв з постачанням електричної енергії, що необхідна для приводу насосів в системах індивідуального водяного опалення. Також слід відзначити простоту їх конструкції, плавність регулювання та низькі експлуатаційні витрати на обслуговування.

Для оцінювання доцільності зміни термодинамічних та режимних параметрів водоструминних ежекторів, що застосовуються в теплових пунктах необхідно було провести термодинамічний та ексергетичний аналізи. В результаті термодинамічного аналізу було визначено шляхи оптимізації теплового пункту, оснащеного водоструминним ежектором, які полягають в зміні його геометричних параметрів, а також в модернізації конструктивної схеми самого теплового пункту. В результаті ексергетичного аналізу було визначено ексергетичну ефективність базового та пропонованого теплового пунктів, що дає змогу стверджувати про доцільність проведеної модернізації та перспективність створення таких теплових пунктів для системи індивідуального опалення побутових споживачів. Проведена оптимізація дає змогу плавно регулювати роботи теплового пункту в залежності від умов навколишнього середовища, що дозволяє системі працювати з максимальною ефективністю.

Дана робота є початковим етапом модернізації теплових пунктів для системи індивідуального опалення побутових споживачів. В подальшому планується проведення термoeкономічного аналізу, що дасть змогу оцінити економічний ефект від проведеної модернізації за рахунок економії витрати теплоносія та визначити тариф, з яким споживач буде одержувати теплову енергію та наскільки він буде відрізнятись від загальнодержавного.

РОЗРАХУНОК ТА ПРОЕКТУВАННЯ ГАЗОДИНАМІЧНОЇ МУФТИ ВІДЦЕНТРОВОГО КОМПРЕСОРА

*Бага В. М., доц. каф. ТТФ; Садовський І. Д., студ. гр. К.м.-41,
Сумський державний університет, м. Суми*

Відцентровий компресор є одним із видів турбокомпресорів, що вирізняється здатністю перекачувати великі об'єми газу при збереженні компактних розмірів. Його проста конструкція забезпечує стабільність роботи, легкість у технічному обслуговуванні та виключає ризик нафтового забруднення газу. Для цього застосовується газодинамічний метод, що базується на використанні механічної дії. Ключовою частиною компресора є робоче колесо, яке завдяки високій швидкості обертання впливає на газ, створюючи відцентрову силу. Це сприяє підвищенню тиску газу, одночасно збільшуючи його кінетичну енергію. Далі частина кінетичної енергії у каналі дифузора переходить у статичну енергію тиску, що забезпечує додаткове зростання тиску газу. Такий принцип закладено в основу роботи відцентрового компресора. Однак, при зменшенні витрати повітря на постійній частоті обертання ротора компресор може втратити стабільність роботи. У таких випадках спостерігається вібрація лопаток і всього пристрою, посилення шуму, пульсації повітря, та навіть реверс потоку через вхідний отвір компресора. Це явище відоме як помпаж. У сучасних відцентрових компресорах ступінь підвищення тиску за один ступінь може сягати до 10. Проте на практиці цей показник зазвичай обмежують до 3,5–4,0, щоб запобігти надмірним навантаженням. У разі необхідності досягнення більш високих значень часто використовують двоступінчастий наддув. Робочі колеса таких компресорів характеризуються периферійною кільцевою швидкістю понад 400 м/с, що вимагає застосування високоміцних матеріалів для забезпечення їхньої надійності.

Дослідження зосереджено на аналізі та вдосконаленні конструкції газодинамічної муфти відцентрового компресора, спрямованому на підвищення його енергоефективності та покращення експлуатаційних характеристик.

Створено високоефективну газодинамічну передачу для нагнітача природного газу ГПА-Ц-6,3. Розроблено методики розрахунку ключових параметрів потоку в газодинамічній передачі на основі одномірної схеми, а також алгоритми для визначення характеристик окремих робочих елементів. Виконано профілювання робочих органів газодинамічної передачі, а також проведено числові моделювання з використанням CFD-методів.

Основним чинником, що впливає на ефективність роботи таких муфт, є геометричні параметри їхніх робочих органів. У рамках роботи було розглянуто створення високоефективної газодинамічної передачі, здатної передавати потужність 6,3 МВт від двигуна з частотою обертання 2900 об/хв

до вала нагнітача природного газу моделі ГПА-Ц-6,3/76В-1,45. Передавальне відношення цієї газодинамічної передачі становить 2,7.

З'єднувальні муфти служать для передачі руху між валами двигунів і машин. Для повітряних та газодувок із низькою частотою обертання зазвичай використовуються муфти типу МУВП (пружні втулкові), які характеризуються простою конструкцією. Проте для швидкохідних валів необхідно застосовувати більш прогресивні конструктивні рішення. Надійність роботи валопроводу при високих швидкостях обертання ротора та тривала експлуатація компресорного агрегата значною мірою залежать від ефективності з'єднувальних муфт, які передають потужність між валами. У промислових вакуумних системах часто використовують з'єднувальні муфти з двома зубчастими зчепленнями. Вони можуть компенсувати невеликі паралельні та кутові зсуви сполучених валів, а також осьові переміщення і температурні деформації в межах 3–4 мм у загальному обсязі. Довжина проміжного вала визначається з урахуванням відстані між торцями валів, яка зазвичай становить 350–450 мм, щоб забезпечити зручний доступ для технічного обслуговування підшипників і ущільнень. В процесі експлуатації часто спостерігається розцентрування валів через їхні пружні та теплові деформації. У таких умовах муфти повинні не тільки компенсувати відхилення осей валів, але й витримувати зусилля, які виникають у системі. Ці завдання ефективно виконують зубчасті муфти завдяки їхній здатності компенсувати як осьові, так і кутові зміщення. Така компенсаційна здатність досягається завдяки спеціально закругленій формі зубців, що дозволяє усувати перекіс осей муфти та валів, забезпечуючи водночас стабільну та надійну роботу механізму.

Розроблено методики для розрахунку основних параметрів потоку в газодинамічній передачі за одномірною схемою, а також алгоритми для визначення характеристик окремих робочих органів. Окрім того, виконано профілювання цих робочих елементів з урахуванням отриманих даних.

У дослідженні представлені результати вибору та обґрунтування топології розрахункової сітки й моделі турбулентної в'язкості для моделювання течії в газодинамічній приставці. Наведено висновки за підсумками тестового завдання з моделювання потоку у газодинамічній передачі нагнітача природного газу типу ГПА-Ц-6,3. Отримані результати чисельних експериментів було зіставлено з даними натурних випробувань.

У подальших етапах досліджень для аналізу потоку в газодинамічній передачі було обрано топологію розрахункової сітки Mesh4 та модель турбулентної в'язкості SST GTT. У рамках випробувань виконано тестове завдання моделювання течії через решітку, побудовану на базі ротора STFF. Також розроблено тривимірну модель газодинамічної передачі, засновану на результатах теоретичного термогазодинамічного аналізу. У статті наведені результати варіантного моделювання та графічні залежності, які відображають розподіл робочих параметрів у досліджуваних об'єктах.

**СЕКЦІЯ «ХІМІЧНІ ТЕХНОЛОГІЇ
ТА ІНЖЕНЕРІЇ»**

МОДЕЛЮВАННЯ ГІДРОДИНАМІКИ ДВОФАЗНИХ ПОТОКІВ У ВИХРОВІЙ КАМЕРІ ТА ОБҐРУНТУВАННЯ БАГАТОЗОННОЇ КОНСТРУКЦІЇ СЕПАРАТОРА

*Єсипчук С. С. асп. гр. А-35/ХТ; Скиданенко М. С., доц. каф. ХІ;
Ляпоценко О. О., проф. каф. ХІ; Сумський державний університет, м. Суми*

Однією з ключових проблем сучасних технологій очищення та обробки багатofазних потоків є ефективне розділення твердих включень широкого діапазону розмірів. Існуючі технічні рішення, як правило, передбачають використання послідовно з'єднаних апаратів, кожен з яких орієнтований на виділення певної фракції частинок. Такий підхід ускладнює конструкцію системи, підвищує енергетичні витрати та знижує загальну ефективність процесу. У зв'язку з цим актуальним є створення апаратів, здатних забезпечити розділення частинок різного діаметра в межах єдиного конструктивного об'єму.

У роботі досліджено закономірності розподілу твердих частинок у вихровому потоці при зміні швидкісного режиму, що дозволило встановити особливості формування зон розділення всередині апарата. Показано, що при низьких швидкостях потоку процес сепарації є малоефективним і характеризується майже рівномірним розподілом частинок різного діаметра, що свідчить про недостатню інтенсивність відцентрових сил та слабо виражену структуру потоку. Із підвищенням швидкості формується стійке вихрове поле, у якому проявляється чітка залежність траєкторій частинок від їх розміру та інерційних характеристик. У таких умовах відбувається просторове розділення потоку на зони, кожна з яких характеризується переважним вмістом частинок певного діапазону діаметрів.

Отримані результати підтверджують, що в межах одного апарата можливе формування декількох функціональних зон: зони відведення дрібнодисперсної фракції, проміжної зони розділення та зони концентрації крупних частинок. При цьому межі між цими зонами визначаються гідродинамічними параметрами потоку, зокрема швидкістю та інтенсивністю закручування. Таким чином, керування режимом руху середовища дозволяє змінювати селективність процесу та адаптувати апарат до різних умов експлуатації.

Запропонований підхід до організації процесу сепарації на основі багатозонної вихрової камери дозволяє реалізувати розділення широкого спектра твердих частинок у межах одного апарата без необхідності використання складних багатоступеневих систем. Це забезпечує зниження енергетичних витрат, спрощення конструкції та підвищення ефективності роботи обладнання, що відповідає сучасним вимогам до інтенсифікації процесів розділення багатofазних середовищ.

ВИПРОБУВАННЯ МАГНІЙ ГІДРОКСИДУ/ОКСИДУ, ОТРИМАНОГО ПЕРЕРОБКОЮ БІШОФІТУ

Анацький М. С., аспірант; Харитонов Р. С., студ. гр. 23-д; Светіков О. О., ст. лаб. каф. ХБТ; Кравченко О. В., професор, Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське

Сьогоднішній день технології неорганічних речовин - створення економічних процесів виробництва хімічних продуктів з високим вмістом основної речовини та низьким вмістом домішок. Технічних продуктів, які за цими показниками наближаються до реактивів. Для отримання магній оксиду і магній гідроксиду таким процесом є осадження магнію амоніаком з розчинів бішофіту [1, 2]. Великі поклади якого є в Україні.

Важливою складовою розробки такої технології є комплексне визначення якісних і кількісних характеристик продуктів, отримуваних в експерименті. За міжнародною термінологією таке визначення називають testing, а національний еквівалент терміну - випробування. Основною якою для хімічної продукції є визначення вмісту основної речовини та домішок.

Відомі чисельні методики таких визначень, які відрізняються одна від іншої не лише обладнанням, сутністю та послідовністю процедур, але й конкретними обставинами їх застосування. Ці обставини у різних суб'єктах можуть не співпадати. Тож для випробування інноваційної продукції має використовуватись така його система, яка забезпечує однаковий результат у розробника технології, у виробника продукції та у її споживачів.

Для розробки технології виробництва магній оксиду і магній гідроксиду осадженням магнію з розчинів бішофіту амоніаком в наших дослідженнях була запроваджена система випробування, основана на стандартах ISO та EN.

Для визначення основної речовини та домішок кальцію користувались EN 12485:2011 (в Україні це ДСТУ EN 12485-2022 Хімікати для оброблення води, призначеної для споживання людиною. Карбонат кальцію, вапно з високим вмістом кальцію, напівобпалений доломіт, оксид магнію, карбонат кальцію-магнію та доломітове вапно. Методи випробування) та ISO 21869:2022 Rubber compounding ingredients — Magnesium oxide — Methods of test.

Для випробування готували досліджуваний розчин (test solution) розчиненням наважки магній оксиду чи магній гідроксиду в кислоті хлоридній. Використовували кислоту масовою часткою 10%, яка не підпадає під дію приписів Постанови КМУ №770 від 06.05.2000р.

Сумарний вміст магнію і кальцію визначали титруванням аліквоти досліджуваного розчину 0,1 н розчином динатрієвої солі етилендіамінтетраоцтової кислоти (EDTA) з додаванням амоніачно-буферного розчину в присутності індикатора еріохром чорний Т. Об'єм аліквоти вибирався так, щоб на титрування йшло приблизно 30 см³ титранту. За таких умов відносна помилка не перевищує 0,2%, а чутливість методики складає 10⁻⁶ М (моль в см³ – мінімальна кількість в досліджуваному розчині).

Вміст кальцію визначали титруванням досліджуваного розчину 0,1 н EDTA в присутності індикатора мурексид з додаванням натрій гідроксиду.

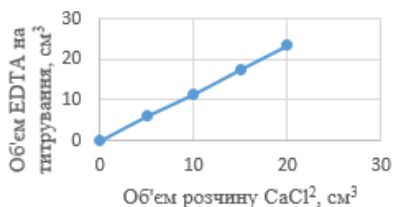


Рисунок 1 – Результати титрування суміші розчинів MgCl₂ та CaCl₂

Для перевірки цієї методики до 20 см² досліджуваного розчину додавали певні об'єми 0,1 н розчину CaCl₂ (з коефіцієнтом 1,1750) і титрували 0,1 н розчином EDTA (з фіксоналу). Результати наведені на рис 1. Вони свідчать, що при титруванні в лужному середовищі наявність Mg²⁺ не заважає визначенню Ca⁺. Але виникла помилка, коли для виготовлення досліджуваного розчину брали кислоту нітратну.

Вміст домішок визначали згідно ДСТУ ISO 6353-1:2012 Хімічні реактиви. Реактиви для хімічного аналізу. Частина 1. Загальні методи випробування. Цей стандарт регламентує порядок визначення 36 основних показників.

Вміст сульфатів за цим стандартом визначають турбідиметрично після осадження сульфатів барій хлоридом. Використовують досліджуваний розчин, приготовлений з кислотою хлоридною. Чутливість методу $8 \cdot 10^{-9}$ М.

Для визначення хлоридів готували іншій досліджуваний розчин - розчиненням наважки сполуки магнію в кислоті нітратній. Вміст хлоридів визначали турбідиметрично після їх осадження розчином аргентум нітрату. Чутливість методики $2 \cdot 10^{-8}$ М.

Вміст фосфатів згідно ISO 6353 визначали візуально-колориметричним методом з додаванням станум хлориду. Чутливість методики $2 \cdot 10^{-9}$ М.

Вміст домішки феруму визначали фотоколориметричним методом з використанням сульфосаліцилової кислоти. Чутливість методики $4 \cdot 10^{-9}$ М.

Результати випробування 2 партій магній оксиду, напрацьованих з бішофіту Затуринського родовища осадженням NH₃ і переданих замовнику:

- 1) MgO – 96,1%; CaO – відс.; сульфати – 0,31%; хлориди – 0,053%.
- 2) MgO – 97,5%; CaO – відс.; сульфати – 0,29%; хлориди – 0,053%.

Список літератури

1. Шокота М. Ю., Кравченко О. В., Гуляев В. М., Коваленко А. Л. Дослідження та вдосконалення процесу отримання магній оксиду з розчинів магній хлориду за амоніачною схемою. Вчені записки ТНУ ім. В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки, 2025, Т. 36(75), № 2.
2. Гуляев В. М., Кравченко О. В., Коваленко А. Л., Анацький М. С. Огляд способів виробництва магній оксиду. Хімічні технології та інженерія. 2025. Т. 1, № 46, С. 143–151.

МОДЕЛЮВАННЯ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ ПРОЦЕСУ ДЕГІДРАТАЦІЇ ТЕРМОЛАБІЛЬНИХ КРИСТАЛОГІДРАТІВ У СЕКЦІОНОВАНОМУ АПАРАТІ КИПЛЯЧОГО ШАРУ (НА ПРИКЛАДІ СУЛЬФАТУ ЗАЛІЗА)

*Кірний В. Л., аспірант; Юхименко М. П., доц. каф. ХІ,
Сумський державний університет, м. Суми*

Термічна дегідратація неорганічних кристалогідратів є складним фізико-хімічним процесом. Тривалий контакт термолабільного матеріалу, схильного до плавлення у власній кристалізаційній воді, з високотемпературним теплоносієм може призводити до локальних перегрівів та інтенсивної агломерації. Одним із прикладів є проблема дегідратації гептагідрату сульфату заліза (II) – відходу сульфатної технології виробництва пігментного діоксиду титану. Перероблення гептагідрату на стабільну товарну форму моногідрату вимагає жорсткого температурного контролю через низьку температуру початку такого фазового переходу (64–68 °С). Раціональним кроком для досягнення цієї мети є розробка високоефективних апаратів киплячого шару, зокрема горизонтальних багатосекційних сушарок. Така конструкція забезпечує керування локальною гідродинамікою, тепломасообмінними процесами та дає змогу реалізувати безпечно стадійне підведення теплоти.

Метою роботи є створення надійного «цифрового двійника» процесу сушіння таких матеріалів, що поєднує математичне моделювання, оптимізацію та CFD-верифікацію. На математичному рівні процес описується системою диференціальних та критеріальних рівнянь. 1D-модель враховує кінетику реакції дегідратації, термічну усадку частинок, а також зміну гранулометричного складу без залучення ресурсомістких рівнянь популяційного балансу. Чисельний розрахунок сформованої системи реалізовано в середовищі MATLAB із використанням методу `ode15s`, що забезпечує точність та обчислювальну стійкість під час моделювання фазових переходів. Розроблена модель стала основою для розв'язання задачі багатокритеріальної оптимізації. Для знаходження компромісу між інтенсифікацією продуктивності сушарки та енергоефективністю (мінімізацією питомих енерговитрат) застосовано алгоритм NSGA-II. У результаті синтезовано фронт Парето та визначено оптимальні просторові профілі керуючих змінних: параболічний профіль швидкості сушильного агента та експоненційний спад температури вздовж апарата. Для верифікації отриманих результатів і детального дослідження локальної структури багатофазних потоків застосовано методи обчислювальної гідродинаміки. На базі відкритого коду MFIX розроблено двофазну ейлер–ейлерівську модель з використанням кінетичної теорії гранулярних газів. Візуалізація результатів підтвердила ефективність аеродинамічного секціонування, давши змогу ідентифікувати зони поздовжньої та зворотної циркуляції.

Запропонована комплексна методика дозволяє проєктувати технологічно досконале, енергоефективне обладнання для дегідратації кристалогідратів та суттєво скорочує потребу у проведенні фізичних експериментів.

ВПЛИВ ТЕМПЕРАТУРИ НА В'ЯЗКІСТЬ ТА ПОШИРЕННЯ ВІБРАЦІЙ У РОЗПЛАВІ КАРБАМІДУ В КОРЗИНІ ОБЕРТОВОГО ВІБРАЦІЙНОГО ГРАНУЛЯТОРА

Нічолодін К. В., асп. гр. А-25/ХТ, Сумський державний університет, м. Суми

Отримання монодисперсних частинок розплаву рідини є одним із найважливіших завдань у сучасній хімічній промисловості, зокрема у виробництві мінеральних добрив. На сьогодні ефективним та технологічно виправданим рішенням для цього є використання обертових вібраційних грануляторів (ОВГ). Конструкція таких установок являє собою складну сукупність структурних елементів, серед яких ключову роль відіграє перфорована корзина, що приводиться в обертовий рух, та спеціальний актуатор для накладення вібрацій заданої частоти. Кожен із цих елементів безпосередньо впливає на перебіг диспергування [1]. Хоча вплив гідродинамічних властивостей струменя, швидкості витікання, а також геометричних параметрів самої корзини та грануляційної вежі (де відбувається контакт з повітрям і кристалізація) вже активно досліджувався, температурні показники процесу диспергування плаву залишалися недостатньо висвітленими як у науковій, так і в технічній літературі. Метою даного дослідження є детальне визначення впливу температури на динамічну в'язкість розплаву карбаміду та з'ясування її ролі у поширенні вібрацій через розплав у корзині ОВГ [2, 3]. Розуміння цих процесів і поліпшення технологічних показників роботи грануляційної вежі, зокрема оптимізація температурних режимів, сприятиме значному підвищенню якості продукції. Отримання гранул однакового розміру та правильної сферичної форми підвищує їхню механічну міцність, що дозволяє мінімізувати руйнування та утворення пилу при подальшому зберіганні й транспортуванні добрив. Згідно з класичною теорією нестійкості Плато-Релея, струмінь рідини без накладення вібрацій розпадається хаотично. Природний розпад струменя без зовнішнього впливу призводить до утворення крапель з широким розподілом за розмірами через випадковий характер збурень. Для отримання крапель однакового розміру необхідне накладання контрольованих вібрацій оптимальної частоти, що синхронізують процес розпаду. Максимальна швидкість наростання збурення відповідає оптимальній довжині хвилі струменя. Оскільки вібрації в ОВГ аналогічні звуковим хвилям, для аналізу їх поширення використано закон Стокса [4, 5]. Відповідно до нього, амплітуда вібрацій зменшується експоненційно, а коефіцієнт затухання у ньютонівській рідині прямо пропорційний динамічній в'язкості та квадрату частоти. Збільшення в'язкості призводить до зростання затухання, оскільки енергія витрачається на опір.

Для визначення характеристик було використано емпіричну формулу Мессена, яка дозволила розрахувати динамічну в'язкість розплаву карбаміду в робочому діапазоні температур 133–150 °С. Залежність густини розплаву від температури визначалася за лінійним рівнянням. Аналіз теплофізичних

властивостей показав, що при збільшенні температури у вузькому технологічному діапазоні від 133 °С до 140 °С в'язкість зменшується з 3.272 до 2.474 мПа·с (тобто на 24.4%). Відповідно, густина розплаву за цих умов також знижується з 1510.82 кг/м³ до 1504.1 кг/м³. Середнє значення в'язкості в цьому температурному проміжку становить 2.856 мПа·с зі стандартним відхиленням 0.272 мПа·с. На основі отриманих теплофізичних даних було розраховано коефіцієнт затухання вібрацій (за базової частоти 500 Гц та швидкості звуку в розплаві 1500 м/с). Розрахунки підтвердили його пропорційне зменшення зі зниженням в'язкості: від $4.27 \cdot 10^{-8} \text{ м}^{-1}$ при 133 °С до $3.24 \cdot 10^{-8} \text{ м}^{-1}$ при 140 °С. Розрахована довжина затухання для оптимальних робочих умов (температура 135 °С, частота 500 Гц) становить $2.54 \cdot 10^7 \text{ м}$. Це значення на багато порядків перевищує фізичні розміри будь-якого промислового гранулятора, що свідчить про передачу робочих частот вібрації через розплав карбаміду практично без втрат енергії на в'язке тертя. Для підтвердження достовірності результатів було проведено статистичний та кореляційний аналіз. Він виявив сильну негативну кореляцію між температурою та в'язкістю ($r = -0.998$), що ідеально описується розрахунковою залежністю з надзвичайно високим коефіцієнтом детермінації ($R^2 = 0.9999$). Водночас зафіксовано повну позитивну кореляцію ($r = 1.000$) між динамічною в'язкістю та коефіцієнтом затухання, що повністю узгоджується з лінійною залежністю, передбаченою законом Стокса для ньютонівських рідин [4, 5].

Таким чином, Використання вібрацій в ОВГ є необхідним для збудження нестійкості Плато–Релея. Зниження в'язкості розплаву при нагріванні зменшує затухання вібрацій. Для стабільної роботи обладнання рекомендується підтримувати температуру в межах 135–138 °С для балансу між низькою в'язкістю та стабільністю. Частоту вібрацій слід налаштувати відповідно до оптимальної довжини хвилі Релея.

Отримані результати та виявлені кореляційні залежності формують надійну теоретичну базу для подальшого поглибленого комп'ютерного моделювання процесів гранулювання, а також слугуватимуть фундаментом для проведення натурних експериментальних досліджень із подальшим порівнянням розрахункових і практичних даних.

Список літератури

1. Meessen J. H. (2012). Urea. In: Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry.
2. Rahmanian N. et al. (2015). Urea finishing process: Prilling versus Granulation.
3. Nichvolodin K., Sklabinskyi V., Yurchenko O. (2024). Determination of the temperature of mineral fertiliser granules after contact with the air in a granulation tower. Technology audit and production reserves.
4. Eggers J., Villermaux E. (2008). Physics of liquid jets.
5. Kinsler L. E. et al. (2000). Fundamentals of Acoustics.

ІНТЕНСИФІКАЦІЯ ПРОЦЕСУ СУШІННЯ СИПКИХ МАТЕРІАЛІВ У ПНЕВМАТИЧНИХ СУШАРКАХ

*Корнієнко І. М., студ. гр. МБ-21/2кі; Галун А. А., студ. гр. МБ-31/2к-4і;
Юхименко М. П., доц. каф. XI, Сумський державний університет, м. Суми*

У хімічній промисловості поширене сушіння порошкоподібних матеріалів у пневмотранспортних сушарках. Особливістю роботи пневмотранспортних сушарок чи інакше труб-сушарок є переміщення газодисперсного потоку у гідродинамічному режимі, який близький до режиму ідеального витиснення. Тобто газовий потік рухається знизу вгору по трубопроводу прямолінійно разом із твердою фазою. Тому час перебування частинки матеріалу у зоні сушіння складає всього декілька секунд. Це має позитивне значення для висушування термолабільних матеріалів та які мають значну поверхневу вологу. Але для матеріалів із іншою формою зв'язку вологи реалізація пневмотранспортного режиму із прямолінійним направленням газодисперсного потоку не підходить, тому що частинки за такий короткий час не можуть висушитися до необхідної кінцевої вологи.

Тому у зоні дозування матеріалу у трубу-сушарку корпус труби виконується звуженим, що створює розрідження, яке полегшує дозування апарата порошкоподібним висхідним продуктом. При цьому скорочуються питомі енергетичні витрати. Таких звужень може бути декілька по висоті апарата. У місцях звужень збільшуються відносні швидкості потоків газу та частинок матеріалу, останні добре перемішуються, у результаті чого теплообмінні та масообмінні процеси інтенсифікуються. Локальні коефіцієнти тепловіддачі в місці контакту твердих частинок з газовим струменем можуть досягати $200\text{--}400 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$, що співпадає зі значеннями, які характерні для розвиненого псевдозрідженого шару. Це дозволяє подавати сушильний агент з більш високою температурою на вході (в 1,5 рази вище за температуру плавлення), не побоюючись термічного пошкодження частинок.

Для збільшення часу перебування частинок матеріалу у зваженому стані та глибини сушіння комбінують пневматичну трубу-сушарку із аерофонтанними ділянками. За допомогою розподілювачів потоку створюють вихрові потоки матеріалу та газу і багатократну циркуляцію потоків у робочому об'ємі аерофонтанних ділянок, завдяки чому інтенсифікуються теплообмінні та масообмінні процеси. Перетин таких розширювальних ділянок збільшується, що призводить до зменшення швидкості газового потоку. Це призводить до затримання більш крупних фракцій матеріалу в цих зонах і відповідно до більшого часу висушування даних частинок до остаточної вологості.

Таким чином, вказані шляхи конструктивної модернізації пневмотранспортних труб-сушарок дозволять досягти більш високого технологічного ефекту.

ОСОБЛИВОСТІ ПРОЦЕСУ СУШІННЯ СИПКИХ МАТЕРІАЛІВ У БАРАБАННИХ СУШАРКАХ

*Середа Б. О., студ. гр. МБ-21/2кі; Юхименко М. П., доц. каф. ХІ,
Сумський державний університет, м. Суми*

У хімічній промисловості та суміжних галузях широко використовуються барабанні конвективні сушарки для сушіння сипких матеріалів, як правило, у великотоннажних виробництвах. Для барабанних сушарок важливою конструктивною частиною є насадка, яка встановлюється всередині робочого об'єму барабана та забезпечує контакт між частинками вологого матеріалу та газовим потоком. Конструкція насадки залежить від властивостей матеріалу, який висушується.

Важливим фактором є розбивання великих кусків вологого матеріалу на більш дрібні у зоні завантаження матеріалу у барабан. Тому обов'язковим повинно бути установлення у даній зоні барабану насадки шнекового типу чи гвинтової із числом спіральних лопатей від 6 до 16 залежно від діаметру барабану. При висушуванні матеріалів із значним адгезійним ефектом до внутрішньої поверхні стінок барабану на початковій ділянці закріплюють ланцюги, за допомогою яких руйнуються грудки та очищуються стінки барабану. Для цієї мети можуть також використовуватися спеціальні ударні пристрої, які розташовані ззовні барабану.

Інтенсифікація барабанних сушарок забезпечується удосконаленням конструкції внутрішньої насадки з метою збільшення кількості матеріалу, який пересипається і активно перемішується у робочому об'ємі барабану.

У сушарках діаметром від 1,0 до 1,6 м при висушуванні матеріалів із достатньою сипкістю із розміром частинок до 8 мм необхідно встановлювати секторну насадку. Якщо матеріали мають властивості налипання до робочих поверхонь чи розмір частинок яких більше 8 мм – треба використовувати лопатеву насадку.

У сушарках діаметром до 3,5 м при висушуванні матеріалу, який має властивості до налипання на початку процесу, треба встановлювати на 30% довжини від завантажувальної камери лопатеву насадку, а після неї – секторну.

Розподільна насадка, яка утворює кілька поперечних завіс, збільшує коефіцієнт насадки (як відношення об'єму матеріалу, який зсипається, до повного об'єму матеріалу у апараті) від 0,1 до 0,3. А це дозволяє зменшити довжину барабана у 2,0–2,5 рази. Також важливою характеристикою барабанної сушарки є коефіцієнт заповнення матеріалом робочого об'єму сушарки. Чим вище цей коефіцієнт, тим більша поверхня частинок вологого матеріалу бере участь у тепло- масообміні із сушильним агентом і тим ефективніше використовується робочий об'єм барабана. Тобто треба підбирати певний тип насадки із оптимальним значенням коефіцієнту заповнення. На практиці цей коефіцієнт дорівнює 0,15–0,35.

ТЕХНОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ ОТРИМАННЯ ОРГАНО-МІНЕРАЛЬНИХ ДОБРИВ НА ОСНОВІ ДИГЕСТАТУ БІОГАЗОВИХ УСТАНОВОК

*Буділовський О. В., студ. гр. МБ-21/2кі,
Сумський державний університет, м. Суми*

Одним із перспективних напрямів підвищення ресурсної ефективності аграрного виробництва є використання побічних продуктів біогазових установок як сировини для отримання добрив. Дигестат, що утворюється в процесі анаеробного зброджування органічної сировини, містить значну кількість органічної речовини та поживних елементів, однак його безпосереднє застосування ускладнюється високою вологістю, неоднорідністю складу та низькою концентрацією макроелементів. Перспективним напрямом валоризації такого продукту є створення гранульованих органічно-мінеральних добрив із підвищеним вмістом поживних речовин і покращеними технологічними властивостями.

Технологічна схема передбачає попередню підготовку дигестату, його збагачення мінеральними компонентами та подальше формування гранульованого продукту. Для підвищення вмісту поживних елементів до складу суміші вводили мінеральні добавки, зокрема сульфат амонію, моноамонійфосфат та хлорид калію. Отриману композицію використовували як основу для формування гранульованого органічно-мінерального добрива.

У процесі дослідження було визначено основні фізико-хімічні характеристики отриманого продукту. Встановлено, що гранульований матеріал характеризується стабільним хімічним складом і високим вмістом макроелементів: масова частка азоту становить близько 5 %, фосфору (P_2O_5) – до 6 %, калію (K_2O) – до 5 %. Вміст сухої речовини перевищує 95 %, що свідчить про придатність продукту до тривалого зберігання та транспортування. Додаткові дослідження показали, що концентрації важких металів у гранульованому продукті знаходяться значно нижче гранично допустимих норм, встановлених європейськими стандартами для органічних та органічно-мінеральних добрив.

Оцінка агрохімічних властивостей отриманого продукту показала його позитивний вплив на властивості ґрунту та ріст рослин. У лабораторних дослідженнях відзначено підвищення катіонно-обмінної ємності ґрунту, що свідчить про покращення його буферних властивостей та здатності утримувати поживні елементи. Вегетаційні експерименти з ярим ячменем показали збільшення біомаси рослин на 6–10 % порівняно з контрольними варіантами, що підтверджує ефективність використання поживних речовин із гранульованого органічно-мінерального добрива.

Дослідження виконано за підтримки AgriSci-UA Platform (Call for Grants: Multidisciplinary Research Teams 2025) у рамках проекту «Digestate-based organo-mineral fertilizers for restoring soil fertility in areas affected by hostilities (DigestOMF)» під керівництвом д-ра техн. наук, проф. Остроги Р. О.

ТЕОРЕТИЧНИЙ АНАЛІЗ РОЗПАДУ СТРУМЕНЯ РОЗПЛАВУ В ОБЕРТОВИХ СИСТЕМАХ ГРАНУЛЮВАННЯ

Забіцький Д. В., викладач вищої категорії, ВСП «Машинобудівний фаховий коледж СумДУ», м. Суми

Якість гранульованого матеріалу значною мірою визначається характером руйнування рідинного струменя, що утворюється під час витікання розплаву з отворів грануляційного пристрою. Саме на цьому етапі закладаються основні параметри майбутнього гранулометричного складу, визначається рівномірність формування частинок і стабільність подальших процесів їх охолодження та кристалізації. Тому дослідження механізмів розпаду струменя розплаву має принципове значення для прогнозування властивостей гранульованого продукту та підвищення ефективності процесу.

У практиці промислового гранулювання переважно розглядають режими, коли розпад струменя відбувається під дією зовнішніх збурень або конструктивних особливостей обладнання. Проте важливим є й аналіз випадків, коли формування крапель відбувається без примусового механічного впливу, а розвиток нестійкості визначається внутрішніми гідродинамічними процесами у самому потоці розплаву. Подібні умови можуть виникати під час перехідних режимів роботи грануляційних установок, а також у деяких конструктивних схемах відцентрових систем гранулювання.

Теоретичний аналіз базується на класичних положеннях теорії капілярної нестійкості рідинних струменів, сформульованих у фундаментальних дослідженнях Релея та Томотіки. Згідно з цими уявленнями, навіть незначні збурення на поверхні струменя можуть поступово зростати під дією поверхневого натягу та інерційних сил, формуючи хвильові деформації, що зрештою призводять до розпаду потоку на систему окремих крапель.

Визначальну роль у формуванні характерного масштабу руйнування струменя відіграє співвідношення між капілярними та інерційними силами. В'язкість розплаву впливає на швидкість розвитку нестійкості та стабільність процесу, не змінюючи принципового механізму його перебігу. У результаті формується характерний спектр хвильових збурень, серед яких одна довжина хвилі стає домінуючою та визначає типовий розмір утворених крапель.

Порівняння різних теоретичних підходів до опису розпаду струменя свідчить про їхню загальну узгодженість і можливість використання для інженерних оцінок процесів гранулювання розплавів. Це дозволяє розглядати отримані залежності як основу для прогнозування умов формування гранул та аналізу стабільності роботи грануляційного обладнання.

Робота виконана за підтримки МОН України (ДР № 0125U000500 «Розроблення технологічних основ отримання складнозмішаних добрив монодисперсного складу») під керівництвом д-ра техн. наук, проф., г. н. с. Остроги Р. О.

СТАБІЛІЗАЦІЯ СТРУКТУРИ ГРАНУЛ СКЛАДНОЗМІШАНИХ ДОБРІВ У ПРОЦЕСІ КОНВЕКТИВНОГО ОХОЛОДЖЕННЯ

*Мищенко Д. І., асп. гр. А-35/МБ; Пирогов І. С., студ. гр. МБ-21/2кі-3,
Сумський державний університет, м. Суми*

У технологіях виробництва гранульованих добрив стадія охолодження відіграє визначальну роль у формуванні остаточної структури гранул. Саме під час інтенсивного теплообміну між твердими частинками та повітряним потоком завершується процес кристалізації матеріалу, формується поверхнева оболонка гранули та стабілізуються її фізико-механічні властивості. Характер теплоперенесення у системі «газ – тверда фаза» визначає швидкість відведення теплоти від гранул і суттєво впливає на формування їх внутрішньої структури.

Гранули, що утворюються під час процесів гранулювання або приривання розплавів, мають підвищену температуру та характеризуються нерівномірним температурним розподілом по радіусу частинки. У зовнішніх шарах гранули відбувається інтенсивне охолодження внаслідок контакту з газовим потоком, тоді як центральна частина тривалий час залишається нагрітою. Такий температурний градієнт зумовлює формування пористої оболонки гранули, структура якої визначає ефективну теплопровідність матеріалу та істотно впливає на механічну міцність частинок.

Інтенсивність процесу стабілізації гранул значною мірою залежить від режимів конвективного охолодження. В апаратах з активною гідродинамікою потоків теплообмін між гранулами та повітрям відбувається у складному газодисперсному середовищі, де одночасно реалізуються процеси теплопередачі, масоперенесення та руху частинок. За таких умов важливими параметрами процесу є швидкість газового потоку, коефіцієнти тепловіддачі та характер взаємодії частинок із газовим середовищем.

Аналіз теплових процесів під час охолодження гранульованого матеріалу свідчить, що ефективність стабілізації структури гранул визначається співвідношенням між інтенсивністю міжфазного теплообміну та теплопровідністю матеріалу гранули. За недостатньої інтенсивності теплообміну поверхневий шар частинок тривалий час зберігає пластичний стан, що може призводити до деформації гранул або їх злипання. Інтенсифікація конвективного теплообміну, навпаки, сприяє швидкому формуванню твердої оболонки частинок, стабілізації їх геометричної форми та закріпленню внутрішньої структури матеріалу. У зв'язку з цим оптимізація режимних і конструктивних параметрів охолоджувачів є важливим чинником керування процесом формування кінцевої структури гранул.

Робота виконана за підтримки МОН України (ДР № 0125U000500 «Розроблення технологічних основ отримання складнозмішаних добрив монодисперсного складу») під керівництвом д-ра техн. наук, проф., г. н. с. Остроги Р. О.

СЕПАРАЦІЙНІ ПРОЦЕСИ У ФОРМУВАННІ ВУЗЬКОДИСПЕРСНОГО ГРАНУЛОМЕТРИЧНОГО СКЛАДУ СКЛАДНОЗМІШАНИХ ДОБРИВ

*Острога Д. В., асп. гр. А-25/ХТ; Чміленко Б. С., студ. гр. МБ-21/2кі-3,
Сумський державний університет, м. Суми*

Раціональна переробка органічних відходів тваринництва розглядається як перспективний напрям створення сучасних технологій виробництва гранульованих добрив у контексті розвитку принципів зеленої хімії та циркулярної економіки. При цьому особливого значення набуває формування стабільного гранулометричного складу продукту, оскільки розмір гранул визначає сипкість матеріалу, рівномірність його розподілу під час внесення та ефективність використання поживних елементів рослинами.

У процесі гранулювання продуктів біоконверсії органічної сировини утворюється полідисперсна система частинок, що характеризується широким розподілом гранул за розмірами. Така структура формується внаслідок одночасного перебігу процесів зародження гранул, їх росту, агломерації та часткового руйнування у грануляційному апараті. У результаті поряд із цільовою фракцією (2–4 мм) формуються як дрібні частинки розміром менше 1 мм, так і укрупнені гранули понад 5 мм. Неоднорідність гранульованого матеріалу негативно впливає на технологічні та експлуатаційні характеристики добрив, зокрема на сипкість, рівномірність розподілу під час внесення, а також на стабільність транспортування і зберігання.

У зв'язку з цим виникає необхідність застосування додаткових технологічних операцій, спрямованих на виділення цільової фракції гранул заданого розміру та повернення некондиційних частинок у повторний цикл гранулювання. Одним із ефективних способів формування вузького гранулометричного складу є застосування сепараційних процесів, зокрема пневматичної класифікації сипких матеріалів. У поличному пневмокласифікаторі розділення гранул відбувається під дією висхідного газового потоку: дрібні частинки виносяться газовим потоком, тоді як більш крупні гранули осаджуються на полицях апарата та переміщуються до зони розвантаження. Завдяки особливостям аеродинамічної взаємодії частинок із газовим потоком у такому апараті створюються сприятливі умови для ефективного розділення полідисперсних гранульованих сумішей.

Формування вузькодисперсного гранулометричного складу складнозмішаних добрив слід розглядати як результат комплексної взаємодії процесів гранулювання та подальшої сепарації отриманого матеріалу. Застосування пневматичних методів класифікації дозволяє підвищити однорідність продукту та зменшити втрати сировини.

Робота виконана за підтримки МОН України (ДР № 0125U000500 «Розроблення технологічних основ отримання складнозмішаних добрив монодисперсного складу») під керівництвом д-ра техн. наук., проф., г. н. с. Остроги Р. О.

РОЗРОБЛЕННЯ ДЕТОКСИКАЦІЙНИХ ДОБРИВ ДЛЯ ВІДНОВЛЕННЯ ДЕГРАДОВАНИХ ҐРУНТІВ

Острога Р. О., зав. каф. XI, Сумський державний університет, м. Суми

Значні площі сільськогосподарських земель України зазнали деградації внаслідок активних бойових дій, що супроводжуються техногенним забрудненням ґрунтів важкими металами, залишками вибухових речовин та токсичними органічними сполуками. За таких умов особливої актуальності набуває розроблення ефективних підходів до екологічної ремедіації ґрунтів із одночасним відновленням їх родючості. Одним із перспективних напрямів є створення детоксикаційних добрив, здатних поєднувати функції сорбції токсикантів і забезпечення рослин поживними елементами.

У межах дослідження передбачається провести комплексне вивчення стану ґрунтів на територіях, що зазнали інтенсивного техногенного навантаження внаслідок бойових дій. Планується відібрати 15 ґрунтових проб на сільськогосподарських угіддях Білопільського району Сумської області, розташованих на території Кальченківської сільської ради та оброблюваних ТОВ «Білопілля Агросвіт». Для відібраних зразків буде проведено аналітичні дослідження рівня забруднення за п'ятьма ключовими групами токсикантів, зокрема свинцем, кадмієм, ртуттю, залишками вибухових речовин та токсичними органічними сполуками, що становлять екологічну та аграрну загрозу для ґрунтових екосистем.

Паралельно здійснюватиметься розроблення композиційних детоксикаційних добрив на основі органічної сировини, отриманої в результаті анаеробного зброджування біомаси. Основою добрива виступатиме тверда фаза дигестату біогазових установок, яка характеризується високим вмістом органічної речовини та поживних елементів. Для підсилення сорбційних властивостей композиції до складу добрива планується вводити біозолу, отриману з лушпиння соняшника, а також додаткові сорбційно-активні компоненти.

Передбачається, що базовий склад композиції варіюватиметься в межах до 80 % дигестату та до 20 % біозоли, з можливим введенням функціональних сорбційних добавок. Одним із ключових завдань дослідження буде визначення оптимального співвідношення органічної, мінеральної та сорбційної складових, яке забезпечить ефективне зниження міграційної здатності токсикантів у ґрунті та одночасне підвищення агрохімічних показників родючості.

Дослідження виконано в рамках гранту Президента України для підтримки наукових досліджень молодих вчених-докторів наук (до 40 років), проєкт № 2025.03/0006 «Розробка детоксикаційних добрив на основі біозоли для екологічного відновлення деградованих ґрунтів».

ДВОКАСКАДНА ХОЛОДИЛЬНА СИСТЕМА У ВИГЛЯДІ МОДЕРНІЗОВАНОГО АПАРАТУ ПОВІТРЯНОГО ОХОЛОДЖЕННЯ ДЛЯ КОНДЕНСАЦІЇ ПАРІВ АМІАКУ

Яковенко Д. В., студ. гр. Хм.м-41, Сумський державний університет, м. Суми

Зростання вимог до енергоефективності промислових підприємств та дефіцит водних ресурсів у низці регіонів України актуалізують проблему відмови від традиційних кожухотрубних конденсаторів водяного охолодження в аміачних холодильних системах. Такі конденсатори потребують розгалуженої інфраструктури оборотного водопостачання, схильні до корозійного зношення та забруднення поверхонь теплообміну, що суттєво збільшує операційні витрати виробництва. Альтернативою слугують апарати повітряного охолодження (АПО), однак їх продуктивність в літній період за підвищених температур навколишнього середовища значно знижується, що обмежує їх безпосереднє застосування як конденсаторів аміаку.

Було проведено обґрунтування двокаскадної холодильної системи на базі модернізованого АПО з адиабатним попереднім охолодженням повітряного потоку з використанням конструктивної схеми, що поєднує два функціональні каскади: перший забезпечує безпосередню конденсацію парів аміаку в оребрених трубних пучках АПО, другий — додаткове охолодження за рахунок введення системи дрібнодисперсного зрошення перед вентиляторними секціями, яка реалізує адиабатне зволоження повітря до його контакту з теплообмінною поверхнею.

Якщо використовувати систему зрошення з форсунками та діаметром крапель 0,06–0,08 мм то це дозволяє знизити температуру повітряного потоку на вході до теплообмінних секцій на 5–12 °С залежно від поточної відносної вологості атмосферного повітря.

Математична модель процесу конденсації побудована на рівняннях теплового балансу і масообміну для двофазного потоку аміаку в горизонтальних оребрених трубках. Коефіцієнти тепловіддачі з боку конденсату розраховані за модифікованим критеріальним рівнянням Нуссельта для плівкової конденсації; з боку повітряного потоку – з урахуванням поправок на геометрію оребрення та ступінь зволоження.

Порівняльний аналіз із базовою одноступеневою схемою повітряного конденсування свідчить, що впровадження запропонованої двокаскадної системи дозволяє скоротити питому витрату електроенергії компресора на 12–18 %, а відносно традиційних зрошувальних конденсаторів водяного охолодження — зменшити витрату технічної води на 70–80 %.

Найбільший економічний ефект може бути досягнутий на підприємствах, що розташовані в регіонах з підвищеним температурним навантаженням та обмеженим доступом до водних ресурсів.

Робота виконана під керівництвом проф. Склабінського В. І.

ШЛЯХИ МОДЕРНІЗАЦІЇ АБСОРБЕРА ДЛЯ ВИЛУЧЕННЯ ДИХЛОРЕТАНУ ІЗ ВІДХІДНИХ ГАЗІВ ВИРОБНИЦТВО ВІНІЛХЛОРИДУ

Котов Ю. В., студ. гр. Хм.м-41, Сумський державний університет, м. Суми

Вінілхлорид (хлоретилен, ВХМ) є одним із найважливіших мономерів хімічної промисловості – основним продуктом для синтезу полівінілхлориду (ПВХ). Промислове виробництво ВХМ ґрунтується на збалансованому методі, що поєднує пряме хлорування та оксихлорування етилену з подальшим піролізом 1,2-дихлоретану (ДХЕ). Відхідні гази стадій хлорування та піролізу містять значну кількість парів ДХЕ (до 5–15 г/м³), що зумовлює необхідність їх ефективного вилучення з метою мінімізації втрат сировини та виконання вимог екологічного законодавства.

Чинні абсорбери з хаотичною насадкою Рашига характеризуються недостатньою питомою поверхнею контакту фаз, підвищеним гідравлічним опором та схильністю до забивання при наявності твердих домішок у газі. Модернізація абсорбційної колони бажано проводити для підвищення ступеня вилучення ДХЕ до рівня не нижче 99,5 % при одночасному зниженні питомих енерговитрат. Це можуть бути наступні технічні рішення: заміна хаотичної насадки Рашига (25 мм) на структуровану металеву насадку типу Mellapak 250.Y (питома поверхня 250 м²/м³), що вдвічі знижує гідравлічний опір при збереженні високої масообмінної ефективності; встановлення трубчастого дистриб'ютора з перфорованими стаканами для рівномірного розподілу рідини по перерізу колони та усунення каналотворення; рециркуляція охолодженого абсорбенту (технічний ДХЕ, $t = 10\text{--}15\text{ }^{\circ}\text{C}$) через проміжний кожухотрубчастий теплообмінник для компенсації теплового ефекту абсорбції та збільшення рушійної сили масопередачі; монтаж сітчастого краплевловлювача у верхній частині апарату для запобігання механічному захопленню крапель відхідним газом; каскадна система автоматичного регулювання витрати абсорбенту та температури з корекцією за сигналом ПЧ-аналізатора концентрації ДХЕ на виході з колони.

Розрахункова висота насадкового шару за методом числа одиниць переносу (NTU–НТУ) становить 4,8 м при діаметрі апарату 1,2 м і продуктивності 8000 м³/год за газом. Загальний об'ємний коефіцієнт масопередачі $K_{га}$ для системи ДХЕ–повітря при застосуванні структурованої насадки зростає на 40–55 % порівняно з хаотичним завантаженням.

Реалізація запропонованих рішень забезпечує підвищення ступеня вилучення ДХЕ до 99,6–99,8 %, скорочення питомої витрати абсорбенту на 20–25 % та зниження викидів хлорорганічних сполук до рівня, що відповідає вимогам Директиви ЄС 2010/75/ЄС. Економічний ефект досягається поверненням вилученого ДХЕ у виробничий цикл і зменшенням витрат сировини на 3–5 %.

Робота виконана під керівництвом проф. Склабінського В. І.

МОДЕРНІЗАЦІЇ ВИПАРНОГО АПАРАТУ ВИРОБНИЦТВА ДВООКИСУ ТИТАНУ

Гаджів М., студ. гр. ХМ.м-41, Сумський державний університет, м. Суми

Пігментний TiO_2 посідає провідне місце серед неорганічних барвників завдяки унікальному поєднанню високого показника заломлення, фотостабільності та нетоксичності.

Випарний апарат займає важливе місце у технологічній схемі хлоридного процесу. Сульфатна технологія зберігає актуальність для підприємств, що переробляють ільменітові концентрати вітчизняних родовищ з умістом TiO_2 нижче 60 %.

Сульфатна технологія охоплює розкладання ільменіту концентрованою H_2SO_4 , відновлення Fe^{3+} до Fe^{2+} , фільтрацію, гідроліз розчину TiOSO_4 та прокалювання гідрату TiO_2 . Стадія упарювання передусім гідролізу: розчин необхідно довести до концентрації 230–250 г/л TiO_2 , а надмірна теплова навантага веде до передчасної кристалізації та забруднення поверхонь теплообміну. Саме тому технічний стан і режим роботи випарного апарату безпосередньо визначають вихід та білість готового пігменту.

Можливі наступні технічні рішення:

- заміна гладкотрубного пучка на трубки з профільованою поверхнею (турбулізуючі вставки або повздовжнє оребрення) дозволяє збільшити коефіцієнт тепловіддачі з боку розчину на 25–35 % без розширення корпусу апарату;

- переведення апарату на схему з виносною нагрівальною камерою та примусовою циркуляцією (осьовий насос, швидкість не менше 2,5 м/с) суттєво гальмує інкрустацію кип'ятильних труб сульфатними відкладеннями та подовжує міжпромивний цикл;

- організація двокорпусного випарювання з послідовним зниженням тиску (I корпус – атмосферний, II корпус – вакуум близько 30 кПа) скорочує питомі витрати гріючої пари на 40–48 % порівняно з однокорпусною схемою;

- нанесення антикорозійного покриття на основі фторполімерів або гумування внутрішніх поверхонь корпусу забезпечує ресурс апарату не менше 8–10 років у середовищі сульфатних розчинів з рН 0,5–1,5;

- впровадження SCADA-системи з каскадним регулюванням рівня розчину, тиску вторинної пари та витрати конденсату стабілізує технологічний режим і знижує частоту позапланових зупинок на 30 %.

Сукупне впровадження запропонованих рішень забезпечує зниження питомих витрат енергоносіїв на 35–48 %, зростання продуктивності установки на 15–20 % та підвищення стабільності якісних показників напівпродукту. Результати можуть бути використані при реконструкції діючих ліній виробництва TiO_2 на підприємствах хімічної промисловості України.

Робота виконана під керівництвом проф. Склабінського В. І.

ОСОБЛИВОСТІ ГІДРОДИНАМІКИ РОЗПЛАВУ МІНЕРАЛЬНИХ ДОБРИВ У ПРОТОЧНІЙ ЧАСТИНІ ВИСОКОПРОДУКТИВНИХ ВІБРАЦІЙНИХ ГРАНУЛЯТОРІВ

Каруцький А. Ю., асп. гр. А-45/МБ, Сумський державний університет, м. Суми

У виробництві мінеральних добрив у грануляційних баштах широкого застосування набули обертові вібраційні гранулятори (ОВГ). Їх використання сприяє формуванню гранул із більш однорідним гранулометричним складом і стабільними міцнісними характеристиками порівняно з іншими методами грануляції, що розширює сфери застосування готового продукту в різних галузях промисловості [1].

ОВГ складається зі статорної і роторної частин. Традиційно, основна увага в дослідженнях приділялась гідродинамічним процесам у роторній частині грануляторів [2, 3], зокрема впливу вібрації та руйнування струменів розплаву [4–6], впливу обертового руху корзини гранулятора на процес формування гранул [7] на їх диспергування, а також теплообміну та охолодженню сформованих крапель у висхідному потоці повітря [8]. Водночас процеси, що відбуваються у статорній частині, залишалися поза увагою, оскільки вважалося, що вони не мають суттєвого впливу на формування гранул. Однак, зростання продуктивності грануляційних установок у теперішній час з 80 до 200 т/год та ускладнення їх конструкцій обумовлюють необхідність детального дослідження гідродинаміки у статорній частині.

Пропускна здатність проточної частини гранулятора визначається витратою розплаву, що може проходити через проточну частину гранулятора, та залежить від геометричних параметрів статорної частини, а також частоти обертання і сумарної площі отворів роторної частини (корзини). Узгодження пропускної здатності статорної та роторної частин є необхідною умовою стабільного використання високопродуктивних грануляторів.

Статорна частина складається з труби вводу розплаву і тангенціального вводу (равлика). У тангенціальному вводі потік розплаву набуває закрутки за рахунок його тангенціального підведення. При цьому геометричні розміри равлика обмежені в діаметральному і осьовому напрямку.

Основною метою роботи є аналіз пропускної здатності базової конструкції тангенціального вводу та її підвищення до рівня 200 т/год.

У результаті проведення модельних досліджень встановлено, що пропускна здатність базової конструкції становить 110 т/год. Встановлення лопаток у проточній частині дозволяє підвищити пропускну здатність равлика до 200 т/год. Результати чисельного моделювання в ANSYS CFX показали, що витрата 200 т/год не є оптимальною, а обмежується можливостями експериментального стенда, оскільки зі збільшенням витрати коефіцієнт гідравлічних втрат статорної частини продовжує зменшуватися.

Список літератури

1. Rahmanian, N., Naderi, S., Supuk, E., Abbas, R., Hassanpour, A. (2015). Urea finishing process: Prilling versus granulation. *Procedia Engineering*, 102, 174–181. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.01.122>
2. Yurchenko, O., Sklabinskyi, V., Ochowiak, M., Ostroha, R., Gusak, O. (2022). Rational choice of a basket for the rotational vibropriller. *Journal of Engineering Sciences*, 9(1), F16–F20. [https://doi.org/10.21272/jes.2022.9\(1\).f3](https://doi.org/10.21272/jes.2022.9(1).f3)
3. Artyukhov A., Sklabinskyi V. (2015). Theoretical analysis of granules movement hydrodynamics in the vortex granulators of ammonium nitrate and carbamide production. *Chemistry and Chemical Technology*. 2015. Vol. 9, No. 2. P. 175–180. [DOI: 10.23939/chcht09.02.175](https://doi.org/10.23939/chcht09.02.175).
4. Pavlenko, I., Sklabinskyi, V., Pitel, J., Zidek, K., Kuric, I., Ivanov, V., Skydanenko, M., Liaposhchenko, O. (2020). Effect of superimposed vibrations on droplet oscillation modes in prilling process. *Processes*, Vol. 8(5), 566, [doi: 10.3390/pr8050566](https://doi.org/10.3390/pr8050566).
5. Sklabinskyi, V. I., Skydanenko, M. S., Demchenko, A. N. (2015). Vibration influence research on melt jet hydrodynamics of nitrogen fertilizer production vibrogranulators. *Technology Audit and Production Reserves*, 5(7(25)), 12–15. <https://doi.org/10.15587/2312-8372.2015.50940>
6. Sklabinskyi, V. I., Yurchenko, O. Y., Nichvolodin, K. V., & Karutskyi, A. Y. (2025). Influence of temperature on viscosity and vibration propagation in a urea melting in a rotary vibration granulator basket. *Bulletin of Sumy National Agrarian University. The Series: Mechanization and Automation of Production Processes*, (4), 113-117. <https://doi.org/10.32782/msnau.2025.4.16>
7. Sklabinskyi, V., & Karutskyi, A. (2026). Identification of the influence of the rotational motion of a vibropriller basket on melt jets and droplets of mineral fertilizers in a prilling tower. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1(1 (139)), 51–58. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2026.353110>
8. Nichvolodin, K., Sklabinskyi, V., & Yurchenko, O. (2024). Determination of the temperature of mineral fertiliser granules after contact with the air in a granulation tower. *Technology Audit and Production Reserves*, 4(3(78)), 28–32. <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2024.310855>

Робота виконана під керівництвом проф. Склабінського В. І.

ГРАВІТАЦІЙНА ПНЕВМОКЛАСИФІКАЦІЯ СИПУЧИХ МАТЕРІАЛІВ З УРАХУВАННЯМ ГІДРОДИНАМІКИ ДВОФАЗНОГО ПОТОКУ

Карпенко А. С., асп. гр. А-55/МБ, Сумський державний університет, м. Суми

Розвиток промислових технологій супроводжується посиленням вимог до енергоефективності, ресурсозбереження та інтеграції виробничих процесів у цифрові системи управління. Особливої актуальності набувають процеси сухого фракціонування сипучих матеріалів, які широко застосовуються в хімічній, агропромисловій, будівельній та інших галузях. Їх впровадження дозволяє відмовитися від енергоємних стадій термічної обробки, зокрема сушіння, що є важливим з точки зору зниження енергоспоживання та екологічного навантаження.

Одним із ключових типів обладнання для реалізації таких процесів є гравітаційні пневмокласифікатори, принцип дії яких базується на взаємодії сил тяжіння та аеродинамічних сил висхідного газового потоку. Розділення полідисперсних систем відбувається за рахунок різниці швидкостей витання частинок, що визначаються їх розміром, формою та густиною. У результаті дрібні та легкі частинки виносяться потоком у верхні зони сепарації, тоді як більш крупні фракції осідають під дією гравітаційних сил. Така фізична модель забезпечує ефективне та технологічно просте фракціонування без використання додаткових енергетичних впливів.

Разом із тим, незважаючи на значну кількість конструктивних рішень (зигзагоподібні, поличні, конічні, ромбічні апарати), сучасні підходи до проектування та експлуатації пневмокласифікаторів здебільшого базуються на емпіричних залежностях і узагальнених інженерних рекомендаціях. Такий підхід не дозволяє повною мірою врахувати складну структуру двофазного газо-дисперсного потоку, зокрема наявність турбулентних пульсацій, вторинних циркуляційних зон, локальних концентраційних неоднорідностей та міжчастинкових взаємодій. У результаті виникають обмеження щодо точності прогнозування ефективності класифікації та можливостей цілеспрямованої оптимізації конструктивно-режимних параметрів.

У зв'язку з цим науково обґрунтоване врахування гідродинаміки двофазних потоків у поєднанні із застосуванням сучасних методів цифрового моделювання (CFD/DEM) розглядається як ключовий напрям підвищення ефективності процесів пневмокласифікації. Отже, актуальним науковим завданням є розроблення комплексного підходу до оптимізації конструктивно-режимних параметрів гравітаційних пневмокласифікаторів на основі аналізу гідродинаміки двофазних потоків та використання інструментів цифрового моделювання.

Робота виконана за підтримки МОН України (ДР № 0125U000500 «Розроблення технологічних основ отримання складнозмішаних добрив монодисперсного складу») під керівництвом д-ра техн. наук, проф., г. н. с. Остроги Р. О.

КВАНТОВО-ХІМІЧНИЙ СКРИНІНГ ГІДРОФОБНИХ НИЗЬКОТЕМПЕРАТУРНИХ ЕВТЕКТИЧНИХ РОЗЧИННИКІВ НА ОСНОВІ МОНОТЕРПЕНОЇДІВ

*Гнатко І. В., аспірант, Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ*

Сучасні тенденції «зеленої» хімії сприяють підвищенню зацікавленості до розробки гідрофобних низькотемпературних евтектичних розчинників (НЕР) на основі речовин природного походження, зокрема монотерпеноїдів, які здатні відігравати роль як акцепторів, так і донорів водневого зв'язку (АВЗ та ДВЗ) [1]. Такі системи вирізняються, передусім, можливістю регулювання фізико-хімічних характеристик, що робить їх перспективною альтернативою традиційним органічним неполярним розчинникам.

Експериментальний пошук оптимальних евтектичних композицій є надзвичайно трудомістким, тому дедалі більше дослідників звертаються до квантово-хімічного моделювання їхніх властивостей із застосуванням різноманітних програмних пакетів: HyperChem, Gaussian, Orca та інших. За умови правильного вибору розрахункового методу та базисного набору стає можливим прогнозування стійкості НЕР, що є ключовим показником доцільності їх синтезу. Однак підібрати відповідний метод для розрахунку цілих агломератів вдається не завжди, тому розробка чітких кількісних критеріїв оцінювання стабільності НЕР на основі квантово-хімічних даних щодо окремих компонентів залишається актуальною науковою задачею.

У більшості з останніх наукових публікацій, присвячених квантово-хімічному прогнозуванню властивостей гідрофобних НЕР, використовується модель COSMO-RS. Вона побудована на теорії функціональної густини (DFT) з інтеграцією специфічних дескрипторів – σ -профілів та σ -поверхонь. У роботі [2] відзначається відповідність розрахованих результатів експерименту.

Підходи, засновані виключно на молекулярній динаміці (MD), виявились непридатними. Зазначається, що цей метод може застосовуватися лише за наявності сформованої бази даних про конкретні класи сполук [3].

Значна кількість публікацій присвячена прогнозуванню стійкості гідрофобних НЕР шляхом аналізу квантово-хімічних дескрипторів компонентів: розподілу електростатичних потенціалів, енергій граничних орбіталей, дипольного моменту, хімічної м'якості та твердості й інших споріднених параметрів. Саме цей підхід застосовується в даній роботі.

Метою роботи є відбір із вихідного набору монотерпеноїдів та жирних кислот 10 потенційно найбільш стабільних двокомпонентних гідрофобних НЕР на основі аналізу ряду квантово-хімічних дескрипторів у HyperChem.

Для дослідження обрано монотерпеноїди – (\pm)-ментол, тимол, (\pm)-камфору, (+)-борнеол, (\pm)-ліналоол, 1,8-цинеол – та жирні кислоти – капринову, лауринову, міристинову, олеїнову (молярне співвідношення 1:1). З цього

набору теоретично можна отримати 38 двокомпонентних евтектичних систем, що включають принаймні один монотерпеноїд.

Оскільки оптичні ізомери є енергетично виродженими, тому для компонентів, що є рацемічними сумішами – (±)-ментол, (±)-камфора, (±)-ліналоол – оптимізація геометрії з подальшим обчисленням квантово-хімічних дескрипторів проводилась для одного з ізомерів.

Оптимізацію геометрії молекул здійснено у два етапи: первинну – молекулярно-механічним методом ММ+, вторинну – напівемпіричним квантово-хімічним методом РМЗ. Розрахунок квантово-хімічних дескрипторів – граничних значень електростатичного потенціалу (φ_{\min} , φ_{\max}), енергій нижчої вільної та вищої зайнятої молекулярних орбіталей ($E_{\text{НВМО}}$, $E_{\text{ВЗМО}}$), дипольного моменту (μ) – реалізовано за допомогою вже згаданого методу РМЗ шляхом побудови, серед іншого, тривимірних ізоповерхонь молекул та енергетичних профілів молекулярних орбіталей.

Для оцінки стійкості димерів «АВЗ – ДВЗ» введено два кількісні критерії:

$$K_1 = \frac{\varphi_{\max}(\text{ДВЗ}) - \varphi_{\min}(\text{АВЗ})}{\Delta\varphi_{\max}}, \quad (1)$$

де $\varphi_{\max}(\text{ДВЗ})$ – максимальне значення електростатичного потенціалу ДВЗ, e/a₀; $\varphi_{\min}(\text{АВЗ})$ – мінімальне значення електростатичного потенціалу АВЗ, e/a₀; $\Delta\varphi_{\max}$ – максимальна різниця електростатичних потенціалів у ряду, e/a₀.

$$K_2 = \frac{E_{\text{НВМО}}(\text{АВЗ}) - E_{\text{ВЗМО}}(\text{ДВЗ})}{\Delta E_{\max}}, \quad (2)$$

де $E_{\text{НВМО}}(\text{АВЗ})$ – енергія НВМО АВЗ, eВ; $E_{\text{ВЗМО}}(\text{ДВЗ})$ – енергія ВЗМО ДВЗ, eВ; ΔE_{\max} – максимальна різниця енергій граничних підрівнів в ряду, eВ.

Сумарний показник ($K_1 + K_2$) використано в якості інтегральної міри стійкості міжмолекулярних зв'язків в комплексах.

Встановлено, що найвищу прогнозовану стабільність мають системи «(±)-ментол – тимол», «(±)-камфора – тимол», «(+)-борнеол – тимол», «1,8-цинеол – тимол», «капринова кислота – тимол», «лауринова кислота – тимол», «міристинова кислота – тимол», «олеїнова кислота – тимол», «(+)-борнеол – лауринова кислота», «1,8-цинеол – лауринова кислота». Отримані результати добре узгоджуються зі значеннями дипольних моментів окремих компонентів.

Список літератури

1. Devi, M. et al. (2023). Hydrophobic deep eutectic solvents as greener substitutes for conventional extraction media: examples and techniques. *ACS Omega*, 8(11), 9702-9728. DOI: 10.1021/acsomega.2c07684.
2. Quaid, T., Reza, T. (2023). COSMO-RS predictive screening of type 5 hydrophobic deep eutectic solvents for selective platform chemicals absorption. *Journal of Molecular Liquids*, 382. DOI: 10.1016/j.molliq.2023.121918.
3. Bernicot, B. et al. (2025). Design and characterization of novel hydrophobic eutectic solvents based on metal-extracting ligands. *Journal of Molecular Liquids*, 427. DOI: 10.1016/j.molliq.2025.127332.

ВПЛИВ МІНЕРАЛЬНИХ ДОБАВОК НА ЕРОЗІЙНИЙ ЗНОС ЕЛЕМЕНТІВ ГРАНУЛЯЦІЙНОГО ОБЛАДНАННЯ У ВИРОБНИЦТВІ АМІАЧНОЇ СЕЛІТРИ

*Маринченко Д. Д., аспірант; Книш І. С., студент; Котенко М. Р., студент;
Скиданенко М. С., доц. каф. XI, Сумський державний університет, м. Суми*

Аміачна селітра належить до найбільш ефективних і широко застосовуваних у світі азотних мінеральних добрив. Високий вміст азоту та значна агрохімічна ефективність забезпечують її широке використання у сільському господарстві. Разом з тим, обмеження, пов'язані з потенційною вибухонебезпечністю аміачної селітри, зумовлюють необхідність удосконалення технології її виробництва, зокрема шляхом введення мінеральних добавок у розплаву.

Аналіз експлуатації промислових установок грануляції аміачної селітри свідчить про наявність суттєвих експлуатаційних проблем, пов'язаних із інтенсивним зносом основних елементів грануляційного обладнання, зокрема відцентрових диспергаторів (пріллерів) розплаву. Руїнування конструктивних елементів диспергаторів призводить до погіршення гранулометричного складу продукту, дестабілізації технологічного режиму грануляції та скорочення міжремонтних періодів експлуатації обладнання. У зв'язку з цим встановлення закономірностей ерозійного зносу диспергаторів розплаву та їх конструктивних елементів є важливим завданням підвищення надійності й ефективності виробництва аміачної селітри.

Метою роботи є встановлення причин ерозійного зносу елементів відцентрових диспергаторів розплаву у виробництві аміачної селітри з мінеральними добавками та оцінка їх впливу на формування гранулометричного складу готового продукту.

У виробництві аміачної селітри для диспергування розплаву застосовують відцентрові диспергатори, перфорована оболонка яких має 6 поясів, у кожному з яких розташовано 7–8 рядів отворів. Діаметр отворів у поясах становить від 0,9 до 1,5 мм в залежності від необхідного основного розміру фракції гранул, а крок між верхніми та нижніми поясами змінюється від 4,6 мм до 3,6 мм, що забезпечує формування гранул із заданими гранулометричними характеристиками.

Підведення розплаву на розпилення здійснюється з приймальної камери окремо до кожного поясу отворів за допомогою розподільника розплаву. Конструктивно розподільник являє собою систему порожнистих усічених конусів, закріплених на спільному фланці, що забезпечує рівномірний розподіл розплаву по поясах перфорованої оболонки диспергатора.

У результаті проведених досліджень грануляційного обладнання встановлено, що найбільш інтенсивному руйнуванню піддаються отвори перфорованої оболонки відцентрового диспергатора, розподільник розплаву та його регулювальне кільце. Основною причиною виходу з ладу цих

елементів є ерозійний вплив твердих частинок, що містяться у розплаві аміачної селітри з мінеральними добавками.

Основними абразивними компонентами розплаву є частинки хлористого калію, вміст яких становить 11–16 % мас., при цьому розмір основної фракції частинок знаходиться у межах 0,2–0,63 мм. Додатковий ерозійний вплив спричиняють нерозчинні включення дикальційфосфату та трикальційфосфату, що утворюються в технологічній лінії виробництва та мають розмір частинок 2–5 мм.

Результати вимірювань діаметрів отворів перфорованих оболонок відцентрових диспергаторів показали, що процес зносу має виражений нерівномірний характер по периметру отворів. Найменший знос спостерігається у напрямку утворюючої конічної поверхні перфорованої оболонки і становить 2–10 % за рік, тоді як найбільший знос відбувається у дотичному напрямку до стінки і досягає 6–17 % на рік.

Найбільш інтенсивному ерозійному впливу піддається внутрішня поверхня перфорованої оболонки диспергатора. Середня величина ерозійного зносу у напрямку утворюючої конічної стінки становить 1,3–1,5 мм за рік, а по окремих рядах отворів досягає 2–3 мм за рік. При цьому більш інтенсивному руйнуванню піддається сторона перфорованої поверхні, протилежна напрямку обертання відцентрового диспергатора.

Суттєвого ерозійного руйнування зазнають також елементи розподільника розплаву. Найбільший знос спостерігається на кромках кожного конуса розподільника, розташованих на рівні перемичок між поясами перфорованої оболонки. Зменшення кромки конусів становить 0,5–1,5 мм за рік, що призводить до порушення рівномірності подачі розплаву по секторах диспергатора та, відповідно, до погіршення гранулометричного складу готового продукту.

У результаті проведених досліджень встановлено, що основною причиною виходу з ладу елементів грануляційного обладнання у виробництві аміачної селітри є ерозійний знос, зумовлений присутністю твердих частинок у розплаві. Найбільш інтенсивний ерозійний вплив чинять частинки хлористого калію (11–16 % мас., 0,2–0,63 мм) та нерозчинні включення дикальційфосфату і трикальційфосфату (2–5 мм).

Показано, що знос отворів перфорованої оболонки має нерівномірний характер і становить 2–10 % на рік у напрямку утворюючої конічної поверхні та 6–17 % на рік у дотичному напрямку. Середня величина ерозійного зносу становить 1,3–1,5 мм за рік, а по окремих рядах отворів досягає 2–3 мм за рік. Встановлено також значний знос кромки конусів розподільника розплаву, що становить 0,5–1,5 мм за рік.

Отримані результати дозволили встановити основні причини погіршення гранулометричного складу аміачної селітри та обґрунтувати доцільність модернізації грануляційного обладнання у виробництві даного виду мінеральних добрив.

МОДИФІКУВАННЯ ГРАНУЛ КАРБАМІДУ МІНЕРАЛЬНИМИ ДОБАВКАМИ З МЕТОЮ ПІДВИЩЕННЯ ЇХ МЕХАНІЧНОЇ МІЦНОСТІ

Табачун М. О., аспірант; Анісковець М. М., студент; Піддубний В. С., студент; Скиданенко М. С., доц. каф. XI, Сумський державний університет, м. Суми

Карбамід є одним із найбільш поширених азотних мінеральних добрив, що широко використовується у сільському господарстві завдяки високому вмісту азоту та ефективності засвоєння рослинами. Водночас важливим показником якості гранульованого карбаміду є його фізико-механічні властивості, зокрема гранулометричний склад, механічна міцність гранул, розсипчастість та стійкість до злежування під час транспортування і тривалого зберігання. Недостатня міцність гранул і підвищена схильність до злежування можуть призводити до погіршення технологічних характеристик добрива, ускладнення процесів транспортування, складування та внесення у ґрунт.

Одним із перспективних напрямів підвищення якості гранульованого карбаміду є використання модифікувальних добавок, які здатні впливати на формування структури гранул та покращувати їх експлуатаційні властивості. При цьому такі добавки повинні відповідати ряду технологічних та екологічних вимог: бути доступними, не чинити токсичного впливу на ґрунт і рослини та не знижувати концентрацію азоту в готовому продукті. У зв'язку з цим кількість добавок, що вводяться до карбаміду, повинна бути обмеженою і, як правило, не перевищувати 0,6 % від маси продукту. Тому дослідження впливу різних мінеральних компонентів на фізико-механічні властивості гранул карбаміду є важливим напрямом удосконалення технології виробництва азотних добрив.

Метою роботи є експериментальне дослідження впливу різних мінеральних добавок на механічну міцність гранул карбаміду та оцінка їх антизлежувальної дії у процесі зберігання продукту.

Експериментальні дослідження проводилися в лабораторних умовах з метою встановлення ефективності використання мінеральних добавок для підвищення механічної міцності гранул карбаміду та покращення їх експлуатаційних властивостей. Як модифікувальні компоненти використовували азотно-кислу витяжку магнезиту, сульфат амонію та сухий порошкоподібний магнезит. Підготовка дослідних зразків здійснювалася шляхом ретельного подрібнення та перемішування карбаміду з відповідними добавками до отримання однорідної суміші. Після цього суміш завантажували до ємності для плавлення. Отриманий розплав дозували по краплях у приймач із мастилом, що забезпечувало формування гранул у лабораторних умовах. Після завершення процесу гранулювання гранули відокремлювали від мастила та висушували на паперових фільтрах. Така методика дозволила забезпечити однакові умови формування гранул як для контрольних, так і для модифікованих зразків, що дало змогу об'єктивно оцінити вплив добавок.

Ефективність модифікування оцінювали шляхом порівняльного аналізу механічної міцності гранул карбаміду без добавок і з добавками. Встановлено, що середня міцність гранул карбаміду без введення добавок становить 500 г/гранулу. Введення сульфату амонію у кількості 0,8 % мас. сприяло підвищенню міцності гранул до 600–700 г/гранулу, що свідчить про позитивний вплив цієї добавки на структуру гранул та їх механічну стійкість.

Більш суттєвий ефект спостерігався при використанні магнезитових добавок. Зокрема, при введенні 1,2 % магнезиту у вигляді витяжки середнє значення міцності гранул становило 1100 г/гранулу, що більш ніж у два рази перевищує аналогічний показник для немодифікованого карбаміду. Найбільш значне підвищення механічної міцності гранул було досягнуто при використанні сухого магнезиту (MgO) у кількості 3–4 % мас.. У цьому випадку середня міцність гранул діаметром 1,5–3 мм становила 4500 г/гранулу, що свідчить про суттєвий зміцнювальний ефект цієї добавки. Встановлено, що введення сухого магнезитового порошку у плав карбаміду не супроводжується виникненням побічних технологічних явищ і забезпечує формування однорідної системи. Це сприяє покращенню структурної цілісності гранул та підвищенню їх механічної стійкості до руйнування. Оцінка антизлежувальної дії досліджуваних добавок проводилася шляхом аналізу стану зразків після одного місяця зберігання. Результати досліджень показали, що введення азотно-кислого розчину магнезитової добавки призводить до підвищення злежування гранул, що пов'язано з наявністю залишкової кислотності у розчині. Водночас використання нейтрального порошкоподібного магнезиту сприяє підвищенню механічної міцності гранул у 1,5–2 рази та зниженню їх схильності до злежування під час зберігання. Додавання сульфату амонію також позитивно впливає на збереження сипких властивостей продукту та забезпечує задовільну стабільність гранул при зберіганні. Результати проведених лабораторних досліджень свідчать про ефективність використання мінеральних добавок для модифікування гранульованого карбаміду з метою покращення його фізико-механічних властивостей. Встановлено, що введення сульфату амонію у кількості 0,8 % мас. підвищує механічну міцність гранул до 600–700 г/гранулу, тоді як використання 1,2 % магнезиту у вигляді витяжки забезпечує зростання цього показника до 1100 г/гранулу. Найбільш ефективним модифікувальним компонентом виявився сухий магнезит (MgO), введення якого у кількості 3–4 % мас. дозволяє підвищити міцність гранул діаметром 1,5–3,0 мм до 4500 г/гранулу. Показано, що застосування сухого магнезиту не супроводжується негативними технологічними ефектами та забезпечує формування однорідної системи у плаві карбаміду.

Встановлено також, що нейтральні магнезитові добавки сприяють підвищенню міцності гранул у 1,5–2 рази та зменшують їх злежування після одного місяця зберігання, тоді як використання азотно-кислої витяжки магнезиту може призводити до зростання злежування через залишкову кислотність.

МОРСЬКА БІОМАСА *ZOSTERA MARINA* ЯК ПЕРСПЕКТИВНЕ ДЖЕРЕЛО ЦЕЛЮЛОЗИ ДЛЯ СИНТЕЗУ ЇЇ НІТРАТІВ ТА РОЗВИТКУ ТЕХНОЛОГІЙ У СФЕРІ ЗЕЛЕНОЇ ХІМІЇ

Малишок К. О., студ. гр. ХТ-31ш; Павленко О. В., ст. викл. каф. ФЗНД,
ШІ СумДУ, м. Шостка; Острога Р. О., зав. каф. ХІ,
Сумський державний університет, м. Суми

Постійний розвиток хімічної промисловості потребує розширення сировинної бази для виробництва нітроцелюлози. Традиційно для отримання нітратів целюлози використовують бавовну та деревину, що супроводжується значними екологічними наслідками. Зокрема, вирощування бавовни потребує значних кліматичних, агротехнічних і водних ресурсів, а також пов'язане з використанням дорогої імпоротної сировини. Інтенсивна вирубка лісів, у свою чергу, призводить до деградації екосистем, руйнування ґрунтів і порушення біорізноманіття.

У зв'язку з цим перспективним напрямом є використання вторинних ресурсів агропромислового походження та інших видів недеревної рослинної біомаси, які можуть стати основою для одержання якісної целюлозовмісної продукції.

Особливу увагу привертає морська трава *Zostera marina*, що зростає на мілководді морських узбереж і у значній кількості накопичується на береговій лінії. В Україні її поклади зустрічаються на узбережжях Чорного та Азовського морів. Волокна цієї рослини характеризуються пружністю та стійкістю до руйнування. За результатами аналізу структури волокон встановлено, що вміст целюлози становить близько 57 %, близько 38 % припадає на нецелюлозні полісахариди та близько 5 % – на лігнін [1]. Це свідчить про перспективність використання *Zostera marina* як альтернативної сировини для одержання целюлози та продуктів її хімічної переробки.

Для отримання целюлози з морської трави було обрано органосольвентний спосіб з використанням як реагентів суміші оцтової кислоти та пероксиду водню. Вміст α -целюлози визначали гравіметричним методом шляхом визначення нерозчинного залишку після обробки целюлози 17,5 %-м розчином NaOH з подальшим промиванням 9,5 %-м розчином NaOH [2].

Нітрування целюлози проводили в лабораторних умовах із застосуванням потрійної нітруючої суміші. Вміст нітрогену в нітроцелюлозі визначали методом омилення нітратів целюлози концентрованою сульфатною кислотою з подальшим відновленням утвореної нітратної кислоти розчином сульфату заліза (II) до оксиду нітрогену. Останній у надлишку утворює комплексну сполуку $\text{Fe}(\text{NO})\text{SO}_4$, що супроводжується забарвленням розчину в жовто-рожевий колір [3].

У ході експерименту було отримано зразки целюлози. За результатами хімічного аналізу вміст α -целюлози становив 75 %. Цей показник є дещо нижчим порівняно з бавовняною целюлозою, що, ймовірно, пов'язано з

наявністю залишкових целюлозних компонентів, зокрема лігніну. Нітрування отриманої целюлози проводили із застосуванням потрібної нітруючої суміші, у результаті чого було одержано зразки нітроцелюлози. Вміст нітрогену в отриманих зразках становив 11,95 %.

Оцінку придатності отриманих зразків целюлози та нітроцелюлози для подальшої хімічної переробки здійснювали із застосуванням інфрачервоної спектроскопії Фур'є. Зразки нітроцелюлози додатково досліджували методом термогравіметричного аналізу.

Аналіз ІЧ-спектрів целюлози, отриманої з морської трави *Zostera marina*, показав наявність характерних смуг поглинання, притаманних целюлозній структурі. Порівняння спектрів із бавовняною целюлозою підтвердило їх структурну подібність. У спектрах нітрованих зразків спостерігалися характерні смуги нітрогруп, що свідчить про утворення нітроцелюлози. Результати термогравіметричного аналізу показали наявність екзотермічного ефекту при температурі близько 165°C, що відповідає температурі спалаху піроксиліну та підтверджує успішність проведеної реакції нітрації.

Водночас *Zostera marina* може розглядатися як цінний відновлюваний ресурс для розвитку технологій зеленої хімії та циркулярної біоекономіки. Завдяки високому вмісту целюлози та природних полісахаридів продукти переробки цієї морської рослини можуть використовуватися у різних галузях. Зокрема, у хімічній промисловості вона може слугувати сировиною для одержання біополімерів і композиційних матеріалів.

У матеріалознавстві та будівництві перспективним є використання її волокон для виробництва теплоізоляційних панелей, легких композиційних плит і біокompозитів. У пакувальній індустрії матеріали на основі її целюлози можуть застосовуватися для створення біорозкладних пакувальних матеріалів і плівок. В аграрному секторі морська біомаса може використовуватися як компонент органічних добрив, ґрунтових покращувачів і біосорбентів для відновлення ґрунтів.

Комплексне використання морської трави *Zostera marina* сприятиме розширенню сировинної бази хімічної промисловості, зменшенню навантаження на традиційні джерела целюлози та впровадженню екологічно безпечних технологій переробки природної біомаси.

Список літератури

1. Davies P., Morvan C., Sire O., Baley C. Structure and properties of fibres from sea-grass (*Zostera marina*). Journal of Materials Science. 2007. Vol. 42. P. 4850–4857. <https://doi.org/10.1007/s10853-006-0546-1>
2. Черьопкіна Р. І., Трембус І. В., Барбаш В. А., Дейкун І. М. Хімічне перероблення недеревної сировини. Вибрані розділи. Лабораторний практикум. Ч. 2 : навчальний посібник. Київ : КПІ ім. І. Сікорського, 2020. 61 с.
3. Барбаш В. А., Дейкун І. М. Хімія рослинних полімерів: навч. посіб. / за ред. В. А. Барбаша. Київ : Каравела, 2018. 440 с.

ГІДРОДИНАМІКА ПСЕВДОЗРІДЖЕНОГО ШАРУ: ЧИСЕЛЬНІ МЕТОДИ, ПРОБЛЕМИ ТА НАПРЯМИ ВДОСКОНАЛЕННЯ

*Криводуб Д. Г., асп. гр. А-35/МБ; Михайловський Я. Е., доц. каф. ХІ,
Сумський державний університет, м. Суми*

Чисельне моделювання псевдозріджених систем є одним із ключових інструментів дослідження гідродинамічних процесів у сучасній інженерії. Воно застосовується як для прогнозування поведінки системи, так і для аналізу та оптимізації технологічних параметрів. Попри значні досягнення, точність існуючих моделей залишається обмеженою, що обумовлює необхідність їх подальшого вдосконалення. У роботі узагальнено підходи до моделювання гідродинаміки псевдозрідженого шару з використанням CFD.

Дослідження в цій сфері можна умовно поділити на два напрями: використання CFD для аналізу конкретних процесів та розвиток математичних моделей і чисельних методів, що лежать в основі обчислювальної гідродинаміки. Аналіз літературних джерел показує, що існуючі підходи не повністю враховують складну міжфазну взаємодію, що знижує точність результатів. Водночас відчувається дефіцит експериментальних даних, необхідних для верифікації моделей.

Складність опису багатofазних потоків зумовлює значні обчислювальні витрати, що вимагає застосування ефективніших алгоритмів і потужних обчислювальних ресурсів. Використання комбінованих підходів, зокрема CFD-DEM, дозволяє враховувати як взаємодію фаз, так і контакти між частинками, забезпечуючи прийнятну точність результатів.

Дослідження показують, що зі збільшенням швидкості потоку ефективність розділення знижується, що пов'язано з винесенням частинок у верхні зони апарата. Моделі Ейлера–Лагранжа забезпечують адекватний опис розподілу швидкостей і концентрацій, що робить їх придатними для інженерних задач.

Встановлено, що ефективність фракціонування залежить від розміру і густини частинок, швидкості потоку та геометрії апарата. Найбільш ефективними є вертикальні циліндричні та циліндроконічні класифікатори з регульованим потоком. CFD-моделювання дозволяє досліджувати структуру потоку та оптимізувати конструкцію апаратів.

Перспективи розвитку пов'язані з моделюванням поліфракційних систем і розширенням експериментальної бази для перевірки чисельних результатів. Комплексний аналіз результатів показує, що якість фракціонування визначається сукупною дією кількох параметрів, серед яких ключовими є розмір і густина частинок, гідродинамічні умови та геометричні характеристики обладнання. Окрему увагу привертають конструкції вертикального типу, зокрема циліндричні та циліндроконічні апарати, в яких реалізується керований висхідний потік. Саме такі системи демонструють підвищену ефективність поділу за рахунок кращого контролю гідродинаміки.

СЕКЦІЯ «ХІМІЧНІ НАУКИ»

QUANTITATIVE DETERMINATION OF METHANOL IN TYROLEAN FINE SPIRITS

Shovkun M., student, group I-22; Dychenko T., Senior Lecturer, Department of Theoretical and Applied Chemistry, Sumy State University, Sumy

Traditional Tyrolean strong beverages, such as craft schnapps and fruit distillates, are renowned for their unique taste profiles and possess a century – old history of production. However, during the fermentation of fruit raw materials – especially those with a naturally high pectin content like apples, pears, and plums – a significant amount of methanol is formed as a byproduct of pectin methylesterase enzymatic activity. This component is highly toxic to the human body. According to the current regulations of the European Union, the maximum allowed concentration of methanol in fruit distillates is strictly regulated to ensure consumer safety (for instance, the limit is up to 1000 g/hL of absolute alcohol, depending on the specific type of fruit). Therefore, a fast, accurate, and cost-effective express control of methanol content is a critically important stage in modern craft and industrial spirit production (United Scientific Group, 2023).

The aim of our work was the quantitative determination of methanol in samples of Tyrolean spirits using the innovative portable analyzer from the Swiss company Alivion. This device allows for rapid in situ analysis using advanced nanotechnological gas sensors.

The studies were conducted on samples of local craft distillates from the Tyrol region. Sampling was carried out using a specialized syringe to collect the headspace gas phase directly above the surface of the liquid beverage, followed by its manual injection into the Alivion device. The device's interface automatically processes the microsensor data, effectively separating the chemical signals of ethanol and methanol, and instantly calculates the quantitative content of the target toxic component.

The concentration of methanol in the investigated sample of cherry schnapps is 12.0 g/hL a.a. The high selectivity of the sensor ensures that the presence of exceptionally high concentrations of ethanol (40% vol.) and other volatile aromatic impurities does not interfere with the accurate detection of methanol. This is significantly lower than the maximum permissible limits set by EU standards, which confirms the excellent quality and absolute chemical safety of the tested Tyrolean beverage (United Scientific Group, 2023).

The obtained results validate the effectiveness of implementing microsensor technologies in the food and beverage industry.

List of references

1. United Scientific Group. *Food Chemistry & Technology (FCT-2023)*. URL: <https://food.unitedscientificgroup.org/2023/pdfs/FCT-2023-ABSTRACT-BOOK.pdf>

ВПЛИВ ЛЕГУВАННЯ НА ЕЛЕКТРОФІЗИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ОКСИДУ ЦИНКУ

*Чудеса К. В., студ. гр. І-22/Іпх; Пишеничний Р. М., доц. каф. ТПХ,
Сумський державний університет, м. Суми*

ZnO належить до класу широкозонних напівпровідників, які мають високу хімічну стабільність, прозорість у видимому діапазоні та значну рухливість носіїв заряду. Ці властивості роблять ZnO перспективним матеріалом для застосування у фотодетекторах, ультрафіолетових лазерах, тонкоплівкових транзисторах та сонячних елементах. Одним із ключових аспектів функціональності ZnO є наявність дефектів у кристалічній ґратці (табл. 1), які суттєво впливають на електронну структуру та оптичні характеристики матеріалу [1, 2].

Таблиця 1 – Основні типи дефектів у ZnO та їх вплив на властивості

Тип дефекту	Позначення	Походження дефекту	Вплив на властивості ZnO
Вакансія оксигену	V_o	Виникає при нестачі оксигену під час синтезу або при легуванні	Формує донорські рівні в забороненій зоні, збільшує концентрацію електронів та сприяє n-типу провідності
Вакансія цинку	V_{Zn}	Дефіцит атомів Zn у кристалічній ґратці	Створює акцепторні рівні, може сприяти формуванню р-типу провідності
Міжвузловий атом Zn	Zn_i	Надлишок Zn або швидке охолодження під час синтезу	Створює додаткові донорські рівні, впливає на електропровідність та люмінесценцію
Домішкові іони Cu^{2+}	Cu_{Zn}	Замінюють іони Zn^{2+} у вузлах ґратки	Створюють проміжні енергетичні рівні, звужують ширину забороненої зони та підвищують поглинання у видимому спектрі
Комплексні дефекти	$Cu_{Zn} + V_o$	Взаємодія домішок Cu з вакансіями оксигену	Модифікують електронну структуру та фотопровідність, можуть впливати на магнітні властивості

Фізико-хімічні властивості Cu-легованого ZnO значною мірою визначаються методом синтезу, оскільки саме умови формування матеріалу контролюють концентрацію дефектів, розмір кристалітів і морфологію поверхні. Одним із поширених підходів є золь-гель метод, який дозволяє отримувати однорідні тонкі плівки з контрольованим вмістом домішок та відносно низькою температурою синтезу. При цьому формуються нанокристаліти з високою питомою поверхнею, а концентрація дефектів,

зокрема вакансій кисню, залежить від умов термічної обробки та співвідношення реагентів [3, 6].

Іншим ефективним методом є магнетронне розпилення, яке забезпечує більш точний контроль складу та товщини плівок. Такий підхід дозволяє регулювати концентрацію Cu у кристалічній ґратці ZnO та отримувати матеріали з різними електричними характеристиками. Також застосовується хімічне осадження з розчину, яке характеризується простотою та можливістю масштабування для отримання наноструктур різної морфології [4, 5].

Легування оксиду цинку іонами Cu є ефективним способом модифікації його структури та функціональних властивостей. Введення домішок Cu призводить до формування додаткових дефектних центрів і проміжних енергетичних рівнів у забороненій зоні, що впливає на електронну структуру матеріалу, змінює ширину забороненої зони та концентрацію носіїв заряду.

У результаті відбувається регулювання електропровідності, fotocутливості та інших електрофізичних характеристик ZnO. Крім того, особливості дефектної структури та морфології значною мірою визначаються методом синтезу і концентрацією домішки, що дозволяє цілеспрямовано керувати властивостями матеріалу залежно від умов отримання.

Список літератури

1. Ma, Z., Ren, F., Ming, X., Long, Y., & Volinsky, A. A. (2019). Cu-doped ZnO electronic structure and optical properties studied by first-principles calculations and experiments. *Materials*, 12(1), 196. <https://doi.org/10.3390/ma12010196>
2. Joshi, B. C., & Chaudhri, A. K. (2022). Sol-gel-derived Cu-doped ZnO thin films for optoelectronic applications. *ACS Omega*, 7(25), 21941–21949. <https://doi.org/10.1021/acsomega.2c02040>
3. Khosravi, P., Karimzadeh, F., Salimijazi, H. R., & Abdi, Y. (2019). Structural, optical and electrical properties of co-sputtered p-type ZnO:Cu thin films. *Ceramics International*, 45(6), 7282–7288. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2019.01.039>
4. Amani, F., Bidadi, H., Mohammadi, M. A., & Ghafouri, M. (2025). Structural and optical properties of ZnO and Cu-doped ZnO thin films and the influence of surface defects on glucose oxidation. *Journal of the Indian Chemical Society*, 102, 102108. <https://doi.org/10.1016/j.jics.2025.102108>
5. Afolabi, O. A., & Olanrewaju, O. A. (2024). Processing and applications of composite ceramic materials for emerging technologies. *IntechOpen*. <https://doi.org/10.5772/intechopen.1007296>
6. Kumar, S., Ahmed, F., Ahmad, N., Shaalan, N. M., Kumar, R., Alshoaibi, A., Arshi, N., Dalela, S., Sayeed, F., & Kumari, K. (2022). Structural, morphological, optical and magnetic studies of Cu-doped ZnO nanostructures. *Materials*, 15(22), 8184. <https://doi.org/10.3390/ma15228184>

ВИЗНАЧЕННЯ ЕТАНОЛУ В АПТЕЧНИХ НАСТОЯНКАХ РЕФРАКТОМЕТРИЧНИМ ТА АРЕОМЕТРИЧНИМ МЕТОДАМИ

*Мироненко Д. В., студ. гр. І-32/2пх; Пшеничний Р. М., доц. каф. ТПХ,
Сумський державний університет, м. Суми*

Аптечні настоянки – забарвлені рідкі водно-спиртові або спиртові витяжки з лікарської рослинної сировини, які одержують без нагрівання або видалення екстрагенту [1]. В Україні вони виготовляються за стандартами, що регламентуються Державною Фармакопеею України, яка визначає вимоги до компонентів, методів екстракції та контролю якості [2]. Контроль вмісту етанолу в настоянках є важливим показником їх якості, оскільки етиловий спирт є як екстрагентом, так і консервантом, що забезпечує стабільність біологічно активних речовин протягом усього терміну придатності [1].

Метою даної роботи є порівняльне дослідження вмісту етанолу в аптечних настоянках з різними біологічно активними речовинами рефрактометричним та ареометричним методами та перевірка доцільності використання цих методів як експрес-методів для попередньої оцінки вмісту спирту в лабораторних умовах.

Було досліджено настоянки плодів глоду, коренів валеріани, коренів ехінацеї пурпурової та трави кропиви собачої (пустирника). Приблизні значення заявленого вмісту етанолу в досліджуваних настоянках становили в межах 45,5–63,6 % (зазначені концентрації є розрахунковими).

Для аналізу попередньо було приготовано шість калібрувальних розчинів з концентраціями етанолу 50, 60, 70, 80, 90 та 96 %, виміряно їхні показники рефракції та показники заломлення настоянок. За отриманими даними визначено вміст етанолу згідно з результатами рефрактометричного дослідження та визначено відносні похибки. Ці результати наведені у табл. 1.

Таблиця 1 – Результати рефрактометричного вимірювання

Назва	Колір	ПЗ, n	Концентрація, %	Похибка, %
Глід	Оранжевий	1,3650	97	52,5
Валеріана	Бурий	1,3670	99	69,8
Пустирник	Жовто-бурий	1,3654	98	68,1
Ехінацея	Світло-оранжевий	1,3578	53	16,5

Для отримання більш достовірних результатів проведено вимірювання густини та визначено масу сухого залишку в 10 мл кожної настоянки. Визначено вміст спирту за результатами ареометричного дослідження, розраховано відносні похибки. Ці розрахунки наведені у табл. 2.

Таблиця 2 — Результати рефрактометричного вимірювання

Назва	m сухого залишку, г	Густина, г/см ³	Концентрація, %	Похибка, %
Глід	0,2329	0,902	56	13,6
Валеріана	0,4651	0,908	53	10,0
Пустирник	0,2189	0,897	57,5	1,4
Ехінацея	0,1471	0,942	36,5	24,7

Порівняння отриманих значень густини показало, що реальний вміст етанолу перебуває в межах 50-70 %, що краще узгоджується із заявленими значеннями.

Показники заломлення екстрактивних речовин (флавоноїдів, дубильних сполук, ефірних олій тощо), що містяться в настоянці, впливають на її загальний показник заломлення. Інтенсивність забарвлення настоянок корелює з отриманими похибками: найбільший вміст екстрактивних речовин у настоянці валеріани пояснює максимальне відхилення показників. Для настоянки ехінацеї похибка ареометричного методу найбільша, що пояснюється низьким вмістом спирту. У зразку переважає вода, яка має більшу густину, і це значно впливає на загальну густину настоянки.

Висновок:

Розглянуті методи аналізу без попереднього видалення екстрактивних речовин показують завищені результати, для експрес-оцінки зразків придатним може бути лише ареометричний аналіз. Для отримання точних результатів необхідне застосування попередньої дистиляції або газової хроматографії.

Список літератури

1. Закон України «Про лікарські засоби»: Закон України від 04.04.1996 №123/96-ВР. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/123/96-вр> (дата звернення: 19.03.2026)
2. Розробка лікарських засобів. Навчальний посібник для практичних занять: Навч. посіб. для студ. вищих навч. закл. / І.Ю. Борисюк та ін. Одеса: ОНМедУ, 2021. 32-35 с. URL: [Borisjuk.pdf](#) (дата звернення: 19.03.2026)

ВПЛИВ НАПРУГИ НА ПЕРЕБІГ ПРОЦЕСУ МЕМБРАННОГО ЕЛЕКТРОЛІЗУ ІОНІВ КАДМІЮ

*Шокаленко О. В., студ. гр. Х.м-51; Большаніна С. Б., доц. каф. ТПХ,
Сумський державний університет, м. Суми*

Європейський зелений курс – це пакет політичних ініціатив, який має на меті спрямувати Європейський Союз (ЄС) на шлях зеленого переходу з кінцевою метою досягнення кліматичної нейтральності до 2050 року. Пакет включає ініціативи, що стосуються клімату, навколишнього середовища, енергетики, транспорту, промисловості, сільського господарства та сталого фінансування, що тісно взаємопов'язані між собою. Особливо цікавою ініціативою є: відокремлення економічного зростання від використання ресурсів і перехід до циркулярних систем у виробництві та споживанні [1].

З метою долучення до Європейського зеленого курсу, пропонується удосконалити один з найбільш екологічно небезпечних виробництв – гальваніку. Для введення замкненої системи ресурсообігу в гальваніці варто застосувати високоефективне обладнання. Як приклад такого обладнання, пропонується використати електрохімічні модулі з катіонообмінними мембранами[2].

На меті цього дослідження є вивчення впливу напруги на процес мембранного електролізу забруднених іонами Кадмію розчинів.

Для дослідження впливу напруги на кінетику електромембранного процесу були підготовлені розчини аноліту (0,19 моль/екв-л CdSO_4) та католіту (0,5 % розчин H_2SO_4). В експерименті використовувався двохкамерний електролізер, де катодна камера була ізольована від анодної за допомогою катіонообмінної мембрани RALEX®CM-PES 11-66. Як катод застосовували титанову пластину, як анод пластину, виготовлену зі свинцю, електроди були з'єднані з джерелом постійного електричного струму. Окрім мембранного модуля, у процесі дослідження використовували джерело постійного струму (Регульований лабораторний блок живлення Masteram MR 5010E BC-24) та кулонометр для контролю кількості електрики, що проходить через систему.

Електроліз тривав протягом двох годин (7200 секунд), із варіюванням напруги в діапазоні від 4,5 до 7,5 В та змінною силою струму (від 0,1–0,2 до 0,4–0,5 А) [3].

У результаті експериментів були отримані дані про вихід кадмію за струмом за різних умов проведення електролізу. Результати розрахунків і спостережень представлені у табл. 1.

Результати, представлені в таблиці свідчать про це, що хоч швидкість міграції йонів кадмію в католіт збільшується зі зростанням напруги, але якість цього процесу навпаки зменшується, що вказує нам на не оптимальність використання високих напруг для вилучення йонів кадмію в католіт.

Таблиця 1 – Розрахунок виходу за струмом кадмію в процесі електрохімічного вилучення іонів кадмію залежно від умов його проведення

Умови мембранного електролізу	Маса кадмію в катодному блоці, г	Зміна маси катоду кулонометра, г	Вихід за струмом, %	Швидкість, г/год
U=4,5В, I=0,1-0,2 А	0,613	0,377	92	0,3
U=6В, I=0,1-0,2 А	0,605	0,419	81,5	0,33
U=7,5В, I=0,4-0,5А	0,854	1,052	46	0,427

Список літератури

1. Кицюк І., Науменко Н., Присяжнюк В. ЄВРОПЕЙСЬКИЙ ЗЕЛЕНИЙ КУРС: МОЖЛИВОСТІ ТА НАСЛІДКИ ДЛЯ УКРАЇНСЬКОГО БІЗНЕСУ. *Економіка та суспільство*. 2023. № 56. URL: <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2023-56-87> (дата звернення: 14.03.2026).
2. Шокаленко О. В. Мембранний електроліз розчинів, забруднених іонами кадмію : Магістерська робота : 102. Суми, 2025. 62 с. URL: <https://essuir.sumdu.edu.ua/handle/123456789/99359> (дата звернення: 14.03.2026).
3. Радченко А. Е. Використання мембранного електролізу в гальванічних процесах : робота на здобуття кваліфікаційного ступеня бакалавра : спец. 102 – хімія / наук. кер. С. Б. Большаніна. Суми : Сумський державний університет, 2024. 52 с. URL: <https://essuir.sumdu.edu.ua/handle/123456789/95555> (дата звернення: 14.03.2025).

БІОКОМПОЗИТИ ДЛЯ ВИДАЛЕННЯ ФОСФОРУ З ВОДНИХ СИСТЕМ

Пятишкіна П. Д., студ. гр. І-22/Іпх; Большаніна С. Б., доц. каф. ТПХ,
Сумський державний університет, м. Суми

Антропогенне навантаження на водні екосистеми призводить до значного накопичення сполук фосфору, надмірна кількість якого завдає шкоди довкіллю. Глобальна статистика свідчить, що понад 50% фосфору потрапляє у водойми з комунально-побутовими стоками. Основними джерелами є продукти життєдіяльності людини та мийні засоби, які містять фосфати. Для України проблема є особливо важливою, оскільки більшість вітчизняних очисних споруд не мають стадії видалення фосфору, що призводить до перевищення гранично допустимих концентрацій [1].

Надлишок фосфатів є головним тригером евтрофікації – явища, що стимулює бурхливе «цвітіння» води синьо-зеленими водоростями (ціанобактеріями). Цей процес спричиняє дефіцит розчиненого кисню у воді, масову загибель гідробіонтів та виділення небезпечних ціанотоксинів, які мають гепатотоксичну та нейротоксичну дію на організм людини [2].

Серед сучасних методів очищення води перспективним підходом є біосорбція, яка виділяється як екологічно безпечна та економічно вигідна альтернатива хімічному осадженню [3]. Біосорбція є пасивним процесом зв'язування забруднювачів функціональними групами на поверхні біомаси. Мікрводорості, зокрема *Chlorella vulgaris*, мають здатність до «надлишкового поглинання» фосфатів, що робить їх ефективними біоагентами. Поєднання мікрводоростей з нітрифікувальними бактеріями створює синергетичний ефект, який стає вагомим у холодну пору. Водорості забезпечують бактерій киснем, а бактерії стабілізують процес та сприяють розщепленню органічних сполук [4].

У нашій роботі було розроблено та досліджено два типи біосорбентів:

- біосорбент 1 – матриця на основі мікрводоростей *Chlorella vulgaris*;
- біосорбент 2 – багатокомпонентний композит, до складу якого входять мікрводорості *Chlorella vulgaris*, нітрифікувальні бактерії та мінеральний наповнювач каолін.

Обидва біосорбенти виготовили у вигляді альгінатних гранул шляхом іонного зшивання з хлоридом кальцію.

Використання каоліну в другому типі біосорбенту має на меті підвищити механічну міцність гранул та збільшити кількість активних центрів сорбції, які мають краще затримувати забруднювачі.

Експериментальні дослідження проводилися протягом 30 діб з використанням модельних розчинів фосфатів з високою початковою концентрацією ($C_0 = 1000$ мг/л), що дозволило мінімізувати похибку при визначенні сорбційної ємності. Зміну концентрації фосфору вимірювали фотоколориметричним методом.

Адсорбційну ємність матеріалів розраховували за формулою:

$$q_t = \frac{(C_0 - C_t) \cdot V}{m}, \quad (1)$$

де q_t – питома сорбційна ємність, мг/г; C_0 , C_t – початкова та поточна концентрації фосфатів, мг/л; V – об’єм розчину, л; m – маса сорбенту, г.

Результати кінетичних досліджень представлені в табл. 1.

Таблиця 1 – Адсорбційна здатність біокомпозитів

Доба	C (P ₂ O ₅), мг/л		q _t , мг/г	
	БС 1	БС 2	БС 1	БС 2
4	692	685	3,34	2,02
10	723	699	0,24	1,32
22	737	680	-1,16	2,27
24	646	631	7,99	4,74
30	628	627	9,74	4,92

Аналіз даних показав, що біосорбент 1 продемонстрував вищу кінцеву сорбційну ємність, що пояснюється більшою часткою активної біомаси на одиницю маси гранули. Проте у перші 22 доби помітна значна нестабільність процесу та часткова десорбція. Натомість наш розроблений композитний біосорбент 2 показав стабільну та монотонну динаміку поглинання фосфатів протягом усього періоду дослідження. Хоча його питома ємність є нижчою через велику масову частку каоліну, він є перспективнішим для тривалого використання в реальних умовах завдяки своїй структурній стійкості.

Дослідження підтвердили ефективність іммобілізованих консорціумів мікрободоростей і бактерій для видалення фосфатів. Додавання каоліну та нітрифікувальних бактерій стабілізує адсорбцію й запобігає десорбції на початкових етапах. Біокомпозити є перспективним засобом для запобігання евтофікації водойм та очищення стічних вод від сполук фосфору.

Список літератури

1. Голодовська О. Ю., Руда М. В., Петрушка І. О., Мальований М. С. Басейновий принцип управління екологічною безпекою Західного Бугу (на прикладі Львівської області) : монографія. Київ : Видавець Яроченко Я. В., 2024. 144 с. <https://doi.org/10.51500/7826-57-5>
2. Villalobos T., Suárez-Isla B., Garcia C. Health and Environmental Impacts of Cyanobacteria and Cyanotoxins from Freshwater to Seawater. *Toxins*. 2025. Vol. 17(3), P. 126. <https://doi.org/10.3390/toxins17030126>
3. Microalgae-based wastewater treatment: Mechanisms, challenges, recent advances, and future prospects / A. Abdelfattah та ін. *Environmental Science and Ecotechnology*. 2022, 100205. <https://doi.org/10.1016/j.esc.2022.100205>
4. Microbial biosorbent for remediation of dyes and heavy metals pollution: A green strategy for sustainable environment / M. Tripathi та ін. *Frontiers in Microbiology*. 2023, Vol. 14. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1168954>

ВИЗНАЧЕННЯ ФОСФАТІВ У ГРУНТАХ ФОТОМЕТРИЧНИМ МЕТОДОМ

*Бульченко Р. М., студ. гр. І-32/2пх; Пшеничний Р. М., доц. каф. ТПХ,
Сумський державний університет, м. Суми*

Родючість ґрунтів є однією з найважливіших умов розвитку сільського господарства та забезпечення людства продуктами харчування. Значну роль у цьому відіграє наявність у ґрунті поживних елементів, серед яких особливе місце посідає фосфор. Саме він беру участь у процесах росту та розвитку рослин, формуванні кореневої системи, цвітінні та утворенні плодів. Крім того, саме цей елемент відповідає за перенесення енергії на клітинному рівні. Якщо фосфору вдосталь, рослина вчасно зацвітає, формує насіння та швидше дає врожай.

Надмірне внесення добрив призводить до зайвих витрат. Знаючи точні цифри можна уникнути екологічних проблем. Адже надлишок фосфатів вимивається у водойми, спричиняючи їхнє замулення та масове розмноження водоростей, що губить водну екосистему.

На концентрацію фосфатів у землі впливає декілька факторів. Наприклад кислотність, у надто кислих ґрунтах фосфор міцно зв'язується із залізом та алюмінієм, а в лужних – із кальцієм. А при температурі нижче +12°C фізіологічні процеси сповільнюються, і рослина не може всмоктувати елемент.

Для аналізу рухомих форм фосфатів використовується декілька різних методів, залежно від типу ґрунту:

Метод Кірсанова – для визначення фосфатів у кислих ґрунтах та ґрунтах опідзоленого ряду, розкритих та вмішувальних породах зони Полісся. В методі Кірсанова використовується 0,2 н. розчин соляної кислоти. Цей метод є найшвидшим методом в порівнянні з рештою. [1].

Метод Мачигіна – для лужних, карбонатних ґрунтів з рН близько 9,0. Кислотні методи не працюють, адже кислота нейтралізується вапном. У методі Мачигіна використовується розчин вуглекислого амонію [2].

Метод Чирикова – для сірих лісових ґрунтів та некарбонатних чорноземів [3].

Наведені методи мають певні відмінності, проте суть методів полягає у вимірюванні інтенсивності забарвлення розчину. Принцип базується на взаємодії фосфат-іонів із молібдатом амонію в кислому середовищі. У результаті утворюється фосфоромолібденова комплексна сполука, яка після відновлення переходить у забарвлену форму, відому як «молібденова синь». Далі за допомогою фотоколориметра або спектрометра вимірюють оптичну густану розчину при певній довжині хвилі.

Оскільки рухливість фосфатів значною мірою залежить від параметрів ґрунту, при виборі методики для аналізу слід звертати увагу на такі показники: тип ґрунту, вміст мінеральних та органічних речовин, рН, температура, аерація, вологість ґрунту [4].

Фотометричний метод має багато переваг. Він дозволяє визначити навіть дуже низькі концентрації фосфатів, є доступним для лабораторій та широко використовується у практиці агрохімічних досліджень.

Для визначення вмісту фосфору було обрано метод Чирикова в модифікації ЦИНАО. Його суть полягає в екстракції рухомих сполук фосфору розчином оцтової кислоти з концентрацією 0,5 моль/дм³.

Для кількісного визначення побудовано калібрувальний графік при довжині хвилі 710 нм та у діапазоні концентрацій P₂O₅ від 0,002 до 0,01 г/дм³. Отримана залежність апроксимується рівнянням лінійної регресії:

$$y = 26,85x + 0,0175, \quad (1)$$

де y – оптична густина; x – концентрація P₂O₅ у розчині, г/дм³;

Після отримання витяжки з ґрунту та додавання амоній гідромолібдату виконано фотометричний аналіз. На основі вимірних значень оптичної густини розраховано вміст фосфору в чотирьох досліджуваних зразках ґрунту (табл. 1).

Таблиця 1 – Результати аналізу

Номер зразка	Оптична густина	Концентрація P ₂ O ₅ в розчині, г/дм ³	Масова частка P ₂ O ₅ у ґрунті, мг/кг
1	0,101	0,003	75
2	0,285	0,010	250
3	0,301	0,011	275
4	0,156	0,005	125

Аналіз отриманих даних показує, що вміст рухомого фосфору в досліджуваних пробних точках варіюється в межах 75-275 мг/кг, що дозволяє оцінити рівень забезпеченості ґрунту поживними елементами.

Список літератури

1. ДСТУ 4405:2005 Якість ґрунту. Визначення рухомих сполук фосфору і калію за Методом Кірсанова в модифікації ННЦ ІГА.
2. ДСТУ 4114-2002 Ґрунти. Визначення рухомих сполук фосфору і калію за модифікованим методом Мачигіна.
3. ДСТУ 4112-2002 Ґрунти. Визначення рухомих сполук фосфору і калію за модифікованим методом Чирикова.
4. Prasad, R., & Chakraborty, D. (2019). Phosphorus basics: Understanding phosphorus forms and their cycling in the soil (ANR-2535). Alabama Cooperative Extension System. https://www.aces.edu/wp-content/uploads/2019/04/ANR-2535-Phosphorus-Basics_041719L.pdf

ЯКІСТЬ СИРІВ ЯК ПОКАЗНИК ХАРЧОВОЇ ЦІННОСТІ ТА БЕЗПЕЧНОСТІ МОЛОЧНИХ ПРОДУКТІВ

Ольховик А. В., студ. гр. Х.м-51; Пономарьова Л. М., зав. каф. ТПХ,
Сумський державний університет, м. Суми

Сири є однією з найважливіших категорій молочних продуктів, що характеризуються високою харчовою та біологічною цінністю. Сири посідають важливе місце у структурі харчування населення завдяки високій концентрації поживних речовин та добрим показникам засвоюваності. Вони містять значну кількість повноцінних білків, молочного жиру, мінеральних речовин, зокрема кальцію і фосфору, а також біологічно активних компонентів, необхідних для збалансованого харчування людини. Якість сирів є комплексною характеристикою, що відображає їх харчову цінність, безпечність та споживчі властивості. Вона визначається комплексом фізико-хімічних, мікробіологічних та органолептичних показників, які формуються на різних етапах технологічного процесу – під час виробництва, ферментації та дозрівання продукту [1, 2].

Формування структури, смаку та аромату сирів значною мірою зумовлене складними біохімічними процесами, що відбуваються під дією ферментів та мікроорганізмів. У процесі дозрівання сирів відбуваються реакції протеолізу, ліполізу та метаболізму лактози, які визначають текстуру, ароматичний профіль і харчову цінність продукту. Як зазначається у фундаментальній праці [1] контроль цих біохімічних процесів є одним із ключових факторів забезпечення стабільної якості та безпечності сирів [1].

Сучасні наукові дослідження у галузі молочної науки значною мірою зосереджені на вивченні ролі мікробіоти сирів у формуванні їх якості та безпечності. Зокрема, склад мікроорганізмів значною мірою залежить від технології виробництва, типу молочної сировини та умов дозрівання, що безпосередньо впливає на сенсорні характеристики та стабільність продукту [2, 3]. Також встановлено, що використання спеціалізованих заквасочних культур, зокрема бактерій роду *Lactobacillus*, сприяє покращенню органолептичних властивостей сирів та оптимізації процесів дозрівання [4].

У сучасних умовах розвитку харчової промисловості значна увага приділяється підвищенню безпечності та стабільності якості сирів. Новітні дослідження спрямовані на впровадження інноваційних методів зберігання та пакування, зокрема вакуумного пакування, високого гідростатичного тиску та інтелектуальних пакувальних матеріалів, що дозволяє зменшити мікробіологічні ризики та подовжити термін зберігання продукції [5]. Крім того, сучасні технологічні дослідження демонструють, що зміни фізико-хімічних властивостей сирів під час зберігання істотно впливають на їх функціональні та сенсорні характеристики [6].

Оцінювання якості сирів в лабораторних умовах ґрунтується на визначенні комплексу фізико-хімічних показників, що характеризують їх

харчову цінність, технологічні властивості та відповідність нормативним вимогам. Хімічні методи аналізу дають змогу встановити склад продукту, контролювати перебіг біохімічних процесів під час дозрівання та оцінювати стабільність якості сирів у процесі зберігання. Найважливішими показниками є вміст вологи, жиру, білка, кухонної солі, кислотність, а також концентрація продуктів біохімічного розпаду, що формуються під час ферментації та дозрівання сирної маси [7, 8].

Таким чином, дослідження якості сирів залишається актуальним напрямом у галузі харчових технологій і молочної науки. А застосування комплексу хімічних методів аналізу забезпечує всебічне оцінювання складу та якості сирів, дозволяє контролювати технологічні процеси їх виробництва і дозрівання, а також гарантувати безпечність і стабільність характеристик готової продукції.

Список літератури

1. Bettera, L., et al. (2023). Lactic acid bacteria in cow raw milk for cheese production: Which and how many? *Frontiers in Microbiology*, 13, Article 1092224. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.1092224>
2. Centeno, J. A., & Carballo, J. (2023). Current advances in cheese microbiology. *Foods*, 12(13), 2577. <https://doi.org/10.3390/foods12132577>
3. McSweeney, P. L. H., O'Mahony, J. A., Cotter, P. D., & Everett, D. W. (Eds.). (2025). *Cheese: Chemistry, physics and microbiology* (5th ed.). Academic Press.
4. Falih, M. A., et al. (2024). Enhancing safety and quality in the global cheese industry: A review of innovative preservation techniques. *Heliyon*, 10(23), e40459. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e40459>
5. Fox, P. F., Guinee, T. P., Cogan, T. M., & McSweeney, P. L. H. (2017). *Cheese: Chemistry, physics and microbiology* (4th ed.). Academic Press.
6. Liu, T., et al. (2024). Changes of physicochemical and functional properties of processed cheese made with natural cheddar and mozzarella cheeses during refrigerated storage. *Scientific Reports*, 14(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-024-53748-z>
7. Walsh, A. M., et al. (2020). Meta-analysis of cheese microbiomes highlights contributions to multiple aspects of quality. *Nature Food*, 1(8), 500–510. <https://doi.org/10.1038/s43016-020-0129-3>
8. Walstra, P., Wouters, J. T. M., & Geurts, T. J. (2006). *Dairy science and technology* (2nd ed.). CRC Press.

«ЗЕЛЕНІ» ПОВЕРХНЕВО-АКТИВНІ РЕЧОВИНИ

Чудеса К. В., студентка; Пономарьова Л. М., зав. каф. ТПХ,
Сумський державний університет, м. Суми

«Зелені» поверхнево-активні речовини (ПАР) — це сполуки, які зменшують поверхневий натяг рідин та характеризуються високою екологічною безпечністю. Основна відмінність «зелених» ПАР від традиційних синтетичних полягає у тому, що вони характеризуються високою бірозкладністю, низькою токсичністю, та отримуються переважно з відновлюваної природної сировини [1, 2]. Завдяки цим властивостям «зелені» ПАР розглядають як перспективну альтернативу нафтохімічним поверхнево-активним речовинам у різних галузях промисловості.

За хімічною природою та механізмом дії сучасні «зелені» ПАР поділяють на кілька типів: аніонні, катіонні, неіонні та амфотерні. Найбільш поширені біо-ПАР, отримані з жирних кислот, амінокислот та мікробних метаболітів, таких як ліполітичні ферменти, риботсахариди або гліколіпіди (табл. 1).

Таблиця 1 – Класифікація зелених ПАР за походженням

Тип ПАР	Джерело	Приклади	Основні галузі застосування
Аніонні	Рослинні олії	Лаурилсульфати	Косметика, побутова хімія
Катіонні	Мікробні продукти	Кватернерні амонієві сполуки	Антибактеріальні засоби
Неіонні	Жирні спирти та полігліколіди	Полісорбати, гліколіпіди	Харчова промисловість, косметика
Амфотерні	Аміни та амінокислоти	Бетаїни	Косметика, емульгатори

Їхні молекули складаються з гідрофільної частини та гідрофобного ланцюга, що забезпечує здатність формувати міцелярні структури та стабілізувати емульсії [3, 4]. Біосурфактанти характеризуються вищою здатністю знижувати поверхневий натяг водних систем порівняно з традиційними синтетичними поверхнево-активними речовинами, що сприяє ефективнішому змочуванню та емульгуванню поверхонь (рис. 1).

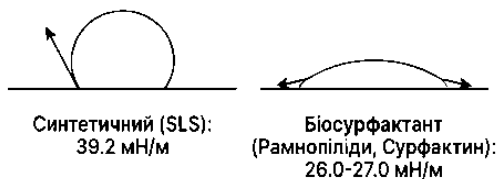


Рисунок 1 – Порівняння здатності синтетичних та біологічних поверхнево-активних речовин знижувати поверхневий натяг води

Біо-ПАР вже сьогодні застосовують у багатьох галузях: харчова промисловість (емульгатори), косметика (м'які мийні засоби), фармацевтика (носії лікарських препаратів), екологічні технології (ремедіація ґрунтів та води від органічних забруднювачів). Важливим є їхнє використання у сільському господарстві для зменшення токсичного впливу пестицидів та підвищення ефективності розподілу препаратів на поверхні рослин [2, 6]. Зелений синтез ПАР передбачає застосування принципів «зеленої хімії», тобто використання нетоксичних реагентів, мінімізацію відходів, енергоефективних процесів та відновлюваних ресурсів. Наприклад, біосинтез ліпофільних ПАР часто відбувається шляхом ферментації мікроорганізмами з відходів харчової промисловості, що робить процес економічно та екологічно вигідним [3, 5].

Порівняно з традиційними синтетичними ПАР, «зелені» мають низку переваг: висока біорозкладність >90% за 28 днів; низька токсичність для водних організмів та людини; сумісність з відновлюваними ресурсами і стійкістю до природних умов [1, 4]. Незважаючи на переваги, існують обмеження: висока вартість виробництва, складність масштабування та залежність від умов ферментації. Вирішення цих проблем передбачає вдосконалення технологій біосинтезу та оптимізацію процесів виділення і очищення ПАР [3, 6].

Отже, «зелені» ПАР є перспективним напрямом хімії та біотехнології. Вони дозволяють замінити токсичні синтетичні мийні засоби на безпечні аналоги, одночасно зменшуючи екологічний слід та підвищуючи ефективність промислових і побутових процесів. Подальші дослідження спрямовані на зниження собівартості виробництва та оптимізацію властивостей біо-ПАР.

Список літератури

1. Османова О. В. (2023). Екологічні аспекти застосування синтетичних мийних засобів. *Матеріали конференції Харківського політехнічного інституту*.
2. Nagtode, V. S., Divakar, G., & Bhutada, S. R. (2023). Green surfactants (biosurfactants): A petroleum-free substitute for sustainability. *ACS Omega*, 8(13), 11795–11815. <https://doi.org/10.1021/acsomega.3c00591>
3. Nasser, M. (2024). Advances in the production of biosurfactants as green ingredients in sustainable formulations. *Frontiers in Chemistry*, 12, Article 1382547. <https://doi.org/10.3389/fchem.2024.1382547>
4. Romero Vega, G., & Gallo Stampino, P. (2025). Bio-based surfactants and biosurfactants: An overview and main characteristics. *Molecules*, 30(4), Article 863. <https://doi.org/10.3390/molecules30040863>
5. Stubbs, S., Yousaf, S., & Khan, I. A. (2022). A review on the synthesis of bio-based surfactants using green chemistry principles. *International Journal of Green Chemistry and Technology*, 4(1), 1–12.
6. Markam SS, Raj A, Kumar A, Khan ML. (2024) Microbial biosurfactants: Green alternatives and sustainable solution for augmenting pesticide remediation and management of organic waste. *Curr Res Microb Sci*. Aug 13;7:100266.

ОЦІНКА ТЕХНОГЕННОГО ЗАБРУДНЕННЯ ҐРУНТІВ ВАЖКИМИ МЕТАЛАМИ ВНАСЛІДОК ВІЙСЬКОВИХ ВИБУХІВ

*Крупська А. М., студ. гр. Х.м-51; Большаніна С. Б., доц. каф. ТПХ,
Сумський державний університет, м. Суми*

Унаслідок повномасштабної війни значні території України зазнають інтенсивного антропогенного навантаження, що призводить до деградації ґрунтового покриву. Особливо уразливими є родючі чорноземи, які виконують важливу екосистемну функцію – забезпечують родючість, беруть участь у біогеохімічних циклах та підтримують стабільність агроландшафтів. Вибухи боеприпасів, ракетних систем залпового вогню та ударних безпілотників спричиняють механічні та хімічні зміни ґрунтів, що негативно впливають на їхню екологічну та агрономічну цінність [1].

Метою роботи було дослідити зміни елементного складу ґрунтів у місцях військових вибухів у Сумській області з використанням рентгенофлуоресцентного аналізу. Зразки ґрунту відбирали у кратерах вибухів, спричинених системами залпового вогню та FPV-дронами, а також на контрольних ділянках на відстані 25 м від місця вибуху [2]. Аналіз елементного складу проводили за допомогою портативного рентгенофлуоресцентного спектрометра, що дозволяє визначати концентрації металів у ґрунтах без попередньої хімічної обробки зразків.

Результати дослідження показали, що контрольні зразки ґрунтів характеризуються природним геохімічним фоном і містять незначні концентрації важких металів. У таких зразках більшість токсичних елементів (Pb, Cu, Co, As) перебували нижче межі виявлення приладу або визначалися у дуже низьких концентраціях. Основу елементного складу контрольних ґрунтів становили природні макро- та мікроелементи, зокрема Fe, Mn, Ti, Ca та K, концентрації яких відповідали типовим показникам для чорноземів досліджуваного регіону.

На відміну від контрольних ділянок, ґрунти, що зазнали впливу військових вибухів, продемонстрували помітні зміни елементного складу (Рис.1). У зразках із кратерів FPV-дронів зафіксовано підвищення концентрацій деяких важких металів, зокрема свинцю (Pb) та кобальту (Co). Вміст кобальту в окремих випадках перевищував 100 мг/кг, що може бути пов'язано з матеріалами конструкції безпілотників або компонентами вибухових пристроїв. Також спостерігалось зростання концентрацій заліза та титану, що свідчить про надходження металевих частинок у ґрунт під час вибуху.

Найбільш виражені зміни елементного складу виявлено у ґрунтах, що зазнали впливу систем залпового вогню. У цих зразках зафіксовано суттєве зростання концентрацій токсичних металів, зокрема цинку (Zn), свинцю (Pb), міді (Cu), хрому (Cr) та арсену (As). Концентрація свинцю в окремих зразках перевищувала 70 мг/кг, а вміст цинку досягав понад 200 мг/кг. Підвищені

концентрації барію, заліза та титану також можуть бути пов'язані з уламками боєприпасів і продуктами детонації [2].

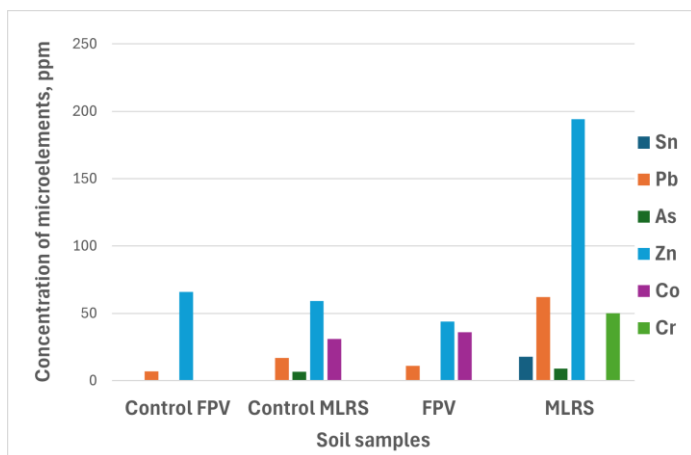


Рисунок 1 – Елементний склад зразків ґрунту до ураження (Control FPV, Control MLRS) і після ураження FPV - дронами і MLRS - системами залпового вогню

Отримані результати свідчать про значну просторову неоднорідність розподілу металів у ґрунтах після вибухів. У межах однієї ділянки концентрації деяких елементів можуть значно перевищувати природний фон, тоді як у сусідніх точках залишаються близькими до контрольних значень.

Таким чином, результати рентгенофлуоресцентного аналізу підтверджують, що військові вибухи є важливим джерелом техногенного забруднення ґрунтів важкими металами. Найбільш значні зміни спостерігаються у місцях вибухів систем залпового вогню, де формується широкий спектр токсичних елементів.

Отримані результати підкреслюють необхідність подальшого моніторингу та розробки ефективних методів очищення і відновлення ґрунтів у районах, що постраждали від військових дій.

Список літератури

1. Крупська А.М., Большанина С.Б., Визначення гідролітичної кислотності ґрунту, який зазнав впливу бойових дій/VII Всеукраїнської науково-практичної конференції «Стан і перспективи розвитку хімічної, харчової та парфумерно-косметичної галузей промисловості: матеріали», 30 травня 2025 р. – м. Хмельницький – с.18-21.

2. Bolshanina S, Krupska A., Szewczuk-Karpisz K., Yanovska G., et al. (2026). Alteration of physicochemical soil properties induced by military explosions. *Environmental Problems*, 11(1), 101–110. <https://doi.org/10.23939/ep2026.01.101>

ВИЗНАЧЕННЯ НІТРАТІВ В ОВОЧАХ ПОТЕНЦІОМЕТРИЧНИМ МЕТОДОМ

Запорожець Р. О., студ.гр. І-32/2ПХ; Пшеничний Р. М., доц. каф. ТПХ,
Сумський державний університет, м. Суми

Потенціометричний аналіз є одним із найбільш затребуваних методів контролю в агропромисловому секторі, оскільки його використання дозволяє проводити велику кількість автоматизованих вимірювань на годину. Основою методу є застосування високоселективних датчиків для вимірювання концентрації іонів у широкому діапазоні.

Підготовка зразків для аналізу овочів на визначення кількості нітрат-іонів проводиться за методом Бейкера-Томпсона і включає промивання, гомогенізацію з розбавленням водою, екстракцію за допомогою розчину $Al_2(SO_4)_3$ та фільтрацію через мембранний фільтр. Отриманий розчин зберігають при температурі $4^\circ C$ до початку аналізу [1].

Загальний принцип методу полягає у вимірюванні електрорушійної сили (ЕРС) гальванічного елемента у досліджуваному розчині. Гальванічний елемент складається з двох частин: індикаторного електрода чутливого до іонів та електрода порівняння. Зв'язок між потенціалом та концентрацією іонів описується рівнянням Нернста:

$$E = const - 0,059 \lg[C(NO_3^-)].$$

Процес починається з калібрування: вимірюються показники відомих стандартних розчинів для побудови графіка залежності електричного потенціалу (E) від концентрації іона (pC). Для забезпечення точності вимірювань у різних зразках використовується метод постійної іонної сили. Після калібрування розчинів, згідно з методом градуювального графіка, проводиться аналіз стандартних розчинів іонів нітрату та електроліту, вимірювання ЕРС гальванічного елемента та побудова графіків у координатах E, мВ–pNO₃. Вимірявши потенціал досліджуваної проби, за графіком визначають pNO₃, концентрацію і масу нітрат-іону [2].

Список літератури

1. Andac, M., Eren, H., & Coldur, F. (2011). Determination of nitrate in leafy vegetables by flow injection analysis with potentiometric detection. *Journal of Food and Drug Analysis*, 19(4), 457–462. DOI: 10.38212/2224-6614.2210.
2. Пшеничний Р. М. Методичні рекомендації до лабораторних та семінарських занять з дисципліни фізико-хімічні методи аналізу. Суми: СумДУ, 2022. 41 с.

ВПЛИВ РОСЛИННОГО ОПАДУ НА СКЛАД ТА ВЛАСТИВОСТІ ҐРУНТІВ ПАРКОВИХ ЗОН МІСТА СУМИ

*Гончаренко Л. І., студ. гр. І-22/Іпх; Диченко Т. В., ст. викл. каф. ТПХ,
Сумський державний університет, м. Суми*

В сучасних умовах урбанізації збереження екологічного стану міських ґрунтів є важливою складовою функціонування зелених зон. Ґрунти паркових територій зазнають значного антропогенного впливу, що призводить до змін їх фізико-хімічних властивостей, зокрема вмісту органічної речовини та кислотності. Важливу роль у цих процесах відіграє рослинний опад, який є основним джерелом органічної речовини та впливає на перебіг гуміфікації [1].

Метою роботи було дослідження впливу рослинного опаду різного типу (листяного та хвойного) на склад і властивості ґрунтів паркових зон міста Суми на прикладі парку «Казка» та парку ім. І. М. Кожедуба.

Практична частина дослідження включала відбір ґрунтових зразків у двох паркових зонах. У кожному парку було відібрано по дві проби: під листяними деревами та під хвойними насадженнями. Зразки піддавали стандартній підготовці (сушіння, подрібнення, просіювання). У лабораторних умовах визначали кислотність ґрунту потенціометричним методом (співвідношення ґрунт : вода = 1 : 9) та вміст органічної речовини двома методами – титриметричним і методом Волклі–Блека (табл. 1).

Таблиця 1 – Значення рН ґрунтів досліджуваних ділянок

Місце відбору	Тип насаджень	рН
Парк ім. Кожедуба	Листяні	8,75
Парк ім. Кожедуба	Хвойні	6,33
Парк «Казка»	Листяні	8,55
Парк «Казка»	Хвойні	8,14

Аналіз даних показує, що ґрунти під листяними насадженнями в обох парках мають слабколужну реакцію. Водночас під хвойними насадженнями спостерігається зниження значення рН, особливо у парку ім. Кожедуба, де середовище стає слабокислим (табл. 2). Це пояснюється накопиченням органічних кислот у процесі розкладання хвойного опаду [2].

Таблиця 2 – Вміст органічної речовини (титриметричний метод)

Місце відбору	Тип насаджень	Вміст, %
Парк ім. Кожедуба	Листяні	0,87
Парк ім. Кожедуба	Хвойні	1,51
Парк «Казка»	Листяні	1,77
Парк «Казка»	Хвойні	1,68

За результатами титриметричного методу встановлено, що вміст органічної речовини під хвойними насадженнями є вищим у парку ім. Кожедуба. У парку «Казка» різниця між типами насаджень є менш вираженою, що може свідчити про більш інтенсивну мінералізацію органічних залишків (табл. 3).

Таблиця 3 – Вміст органічної речовини (метод Волклі–Блека)

Місце відбору	Тип насаджень	Вміст, %
Парк ім. Кожедуба	Листяні	1,80
Парк ім. Кожедуба	Хвойні	1,93
Парк «Казка»	Листяні	3,42
Парк «Казка»	Хвойні	4,31

Метод Волклі–Блека показав вищі значення органічної речовини у всіх зразках. Найбільший вміст зафіксовано у ґрунтах парку «Казка», особливо під хвойними насадженнями. Це може бути пов'язано з накопиченням слабозрозкладених органічних залишків та меншою швидкістю їх мінералізації.

Порівняння двох методів показало, що метод Волклі–Блека є більш чутливим і дозволяє визначити загальний органічний вуглець ґрунту, включаючи стабільні гумусові сполуки [3]. Титриметричний метод, у свою чергу, відображає переважно легше окиснювану частину органічної речовини.

Отримані результати підтверджують залежність між типом рослинного опаду та властивостями ґрунту. Хвойний опад сприяє накопиченню органічної речовини та зниженню рН, тоді як листяний опад забезпечує швидший кругообіг поживних елементів.

Виявлені відмінності між досліджуваними ділянками свідчать про те, що на властивості ґрунтів впливає не лише тип рослинного опаду, а й умови функціонування паркових екосистем.

Практичне значення роботи полягає у можливості використання результатів для оптимізації догляду за міськими зеленими зонами. Зокрема, доцільним є часткове збереження рослинного опаду як природного джерела органічної речовини та використання його для мульчування.

Список літератури

1. Позняк С. Ґрунтознавство і географія ґрунтів : підручник. Львів : ЛНУ ім. Ів. Франка, 2010. 270 с.
2. Paul, E. A. (2015). *Soil Microbiology, Ecology and Biochemistry*. Academic Press.
3. Walkley, A., Black, I. A. (1934). An examination of the degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science*, 37(1), 29–38. <https://doi.org/10.1097/00010694-193401000-00003>

ХІМІЧНІ МЕТОДИ ПЕРЕРОБКИ ХАРЧОВИХ ВІДХОДІВ

*Кочура Є. К., студ. гр. І-22/Іпх; Пономарьова Л. М., зав. каф. ТПХ,
Сумський державний університет, м. Суми*

Харчові відходи становлять значну частину твердих побутових відходів і є важливим джерелом екологічних ризиків. За оцінками міжнародних організацій, до 30–40 % вироблених харчових продуктів у світі не споживається та перетворюється на відходи [1]. Їх накопичення призводить до утворення парникових газів, зокрема метану, а також до забруднення ґрунтів і водних ресурсів [2].

Проблема має не лише екологічний, а й економічний вимір. Втрати харчових продуктів означають неефективне використання енергії, води, земельних і трудових ресурсів, залучених на всіх етапах виробництва та постачання. За різними оцінками, глобальні економічні збитки від харчових відходів сягають сотень мільярдів доларів щороку. Водночас значна частина населення світу стикається з нестачею продовольства, що підсилює дисбаланс між виробництвом і споживанням.

Додаткову актуальність проблемі надає зростання обсягів урбанізації та зміна моделей споживання. У містах формується висока концентрація органічних відходів, які потребують ефективних систем збору та переробки. За відсутності належного управління вони потрапляють на полігони, де відбувається їх анаеробне розкладання з інтенсивним виділенням метану. Це ускладнює досягнення кліматичних цілей і підвищує навантаження на інфраструктуру поводження з відходами.

Хімічні методи переробки дозволяють не лише утилізувати ці відходи, але й отримувати цінні продукти. Одним із основних методів є гідроліз, який забезпечує розкладання складних органічних сполук на простіші компоненти, що можуть бути використані у виробництві кормів або біохімічних продуктів [3]. Окиснювальні процеси, зокрема із застосуванням пероксиду водню або озону, сприяють зниженню токсичності відходів та їх мінералізації [4]. Перспективним напрямом є також переетерифікація жирів і олій, що дозволяє отримувати біодизель із харчових відходів [5]. Цей метод активно використовується у сучасних технологіях альтернативної енергетики [6]. Крім того, застосування кислотного або лужного гідролізу дозволяє ефективно переробляти білковмісні та вуглеводні відходи [7].

Порівняльний аналіз (табл. 1) показує, що хімічні методи характеризуються високою ефективністю та швидкістю процесів [8], проте потребують оптимізації з точки зору енерговитрат і екологічної безпеки [9].

Таблиця 1 – Порівняльна характеристика хімічних методів переробки

№	Метод	Сутність процесу	Переваги	Недоліки
1	Гідроліз	Розкладання органічних речовин	Простота, ефективність	Агресивні реагенти
2	Окиснення	Руйнування сполук окисниками	Зниження токсичності	Вартість
3	Переестерифікація	Перетворення жирів у біодизель	Отримання палива	Очищення
4	Піроліз	Термічний розклад без кисню	Енергоносії	Висока температура

Використання комбінованих технологій, які поєднують хімічні та біологічні підходи, дозволяє підвищити ефективність переробки та зменшити негативний вплив на довкілля [10].

Список літератури

1. Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2021). Food waste index report. FAO. <https://www.fao.org/platform-food-loss-waste/flw-data/en/>
2. United Nations Environment Programme. (2021). Food waste and climate change. UNEP. <https://www.unep.org/resources/report/unep-food-waste-index-report-2021>
3. Smith, J. (2020). Waste processing technologies. Elsevier.
4. Tchobanoglous, G. (2014). Wastewater engineering. McGraw-Hill.
5. Zhang, Y. (2021). Biodiesel production from waste oils. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-981-16-1230-5>
6. Demirbas, A. (2008). Biodiesel: A realistic fuel alternative. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-84628-995-8>
7. Ковальчук, О. В. (2022). Переробка органічних відходів. Київ.
8. Metcalf & Eddy. (2014). Wastewater engineering. McGraw-Hill.
9. European Commission. (2020). Waste management review. Brussels. https://environment.ec.europa.eu/topics/waste-and-recycling_en
10. Chen, H. (2014). Biotechnology of lignocellulose. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-94-007-6898-7>

**СЕКЦІЯ «ЕКОЛОГІЯ І ОХОРОНА
НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА»**

РОЛЬ ЦИФРОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ У ВИЯВЛЕННІ ЕКОЛОГІЧНИХ ЗАГРОЗ

Твердохлебова Н. Є., доцент кафедри безпеки праці та навколишнього середовища, НТУ «ХПИ», м. Харків

Використання цифрових технологій у сфері виявлення екологічних загроз відкриває нові горизонти для підвищення точності, швидкості та ефективності екологічного моніторингу. Завдяки супутниковим системам, сенсорним мережам, дронам, штучному інтелекту та машинному навчанню з'явилася можливість отримувати об'єктивну картину стану довкілля в реальному часі, виявляти потенційні загрози на ранніх етапах і прогнозувати розвиток критичних ситуацій.

Штучний інтелект і машинне навчання дедалі частіше використовуються для вирішення складних екологічних проблем і стають потужним інструментом для відстеження змін у довкіллі, раннього виявлення загроз промислових регіонів і прийняття рішень у сфері охорони природи.

Сучасні екологічні системи генерують величезні обсяги даних із різних джерел – супутникових знімків, сенсорних мереж, безпілотників, камер спостереження, метеостанцій тощо. Самостійно обробити такі обсяги даних складно, тому на допомогу приходять алгоритми штучного інтелекту. Вони вміють виявляти приховані залежності між показниками, що дозволяє заздалегідь передбачити появу небезпечних ситуацій або зміни в природному середовищі.

Наприклад, алгоритми комп'ютерного бачення використовуються для автоматичного аналізу знімків місцевості з дронів або супутників, що дозволяє виявляти нелегальні звалища, факти вирубки лісу, затоплення або ерозію ґрунту. Крім того, такі системи можуть розпізнавати типи рослинності, оцінювати її стан і фіксувати відхилення від норми, що може свідчити про хвороби або вплив забруднювачів.

Методи машинного навчання застосовуються для прогнозування розвитку екологічних процесів.

Наприклад, можна моделювати розповсюдження диму від пожеж, шкідливих викидів у повітрі або забруднення у водоймах. Це дозволяє вчасно інформувати відповідні служби та громади про потенційну небезпеку. Особливу цінність має здатність таких систем адаптуватися до нових умов. Це дає змогу ефективніше працювати у змінному середовищі, де фактори ризику постійно змінюються. Для розробки й реалізації таких рішень активно використовуються спеціалізовані платформи. Зокрема, Google Earth Engine надає доступ до величезного масиву геопросторових даних, а IBM Environmental Intelligence Suite та Microsoft AI for Earth пропонують інструменти для інтеграції екологічних моделей у реальні сценарії управління. Серед популярних засобів і бібліотек для побудови моделей машинного навчання можна відзначити TensorFlow, PyTorch, scikit-learn і

XGBoost, які дозволяють працювати з великими масивами даних і будувати складні аналітичні моделі.

Загалом, впровадження штучного інтелекту в екологічний моніторинг сприяє більш точному виявленню ризиків, оперативнішому реагуванню на надзвичайні ситуації, скороченню витрат на екологічні дослідження та підвищенню загальної ефективності природоохоронних заходів. Втім, впровадження цих технологій стикається з низкою практичних, технічних і організаційних бар'єрів, що потребують комплексного вирішення.

Однією з ключових проблем є вартість впровадження високотехнологічного обладнання та програмного забезпечення. Для багатьох регіонів, особливо в умовах обмеженого бюджету на охорону довкілля, витрати на закупівлю дронів, супутникових даних, створення сенсорних мереж або розробку систем штучного інтелекту є надто високими. Часто бракує спеціалістів, здатних не лише встановити та налаштувати нове обладнання, а й інтерпретувати отримані дані для прийняття рішень.

Не менш суттєвою проблемою залишається недостатній рівень інтеграції між різними інформаційними системами та структурами, які займаються екологічним контролем [1, 2]. Дані, зібрані з різних джерел, нерідко мають різну структуру, формат і ступінь деталізації, що ускладнює їхнє об'єднання для подальшого аналізу. Крім того, в умовах швидкої цифровізації гостро постає питання кібербезпеки: будь-яке втручання у системи моніторингу може призвести до викривлення даних або збоїв у роботі систем оповіщення.

Ще одним викликом є правова та етична неврегульованість. Використання безпілотників або сенсорів у громадських місцях викликає питання щодо приватності й збору персональних даних, а автоматизовані системи прийняття рішень потребують чіткої нормативної бази. Важливо також забезпечити прозорість алгоритмів, які застосовуються у прогнозуванні екологічних загроз, щоб уникнути хибних рішень.

Попри перелічені труднощі, перспективи впровадження новітніх технологій у сфері екологічного моніторингу залишаються обнадійливими. Поступове зниження вартості цифрових технологій, розвиток відкритих даних і державних ініціатив щодо цифрової трансформації створюють сприятливі умови для масштабування інновацій.

Список літератури

1. Твердохлебова Н. Є. Сучасні вимоги до спеціалістів з урахуванням цифровізації суспільства // Штучний інтелект: сталий розвиток освіти, науки, індустрії : збірник тез доповідей Міжнар. наук.-практ. конф. (м. Харків, 11–12 грудня 2025 р.) / відп. за вип. Долгопол О. О. Харків, 2025. С. 164–167.
2. Твердохлебова Н. Є., Євтушенко Н. С. Регіональні аспекти управління екологічною безпекою в умовах сталого розвитку. *Сучасні технології у промисловому виробництві* : матеріали 9-ї Всеукр. наук.-техн. конф., м. Суми, 23-26 квітня 2024 р. Суми, 2024. С. 176–177.

ОСОБЛИВОСТІ ВПЛИВУ ВІЙСЬКОВИХ ДІЙ НА ДОВКІЛЛЯ

*Кузьоменська К.-В. М., аспірант; Аблієва І. Ю., проф. каф. ЕПТ;
Батальцев С. В., ст. викл. каф. ЕПТ, Сумський
державний університет, м. Суми*

Однією з ключових особливостей сучасного техногенного навантаження на довкілля України є довготривалі наслідки воєнних дій, що спричиняють масштабні негативні зміни в екосистемах. Збройні конфлікти, незалежно від їхніх масштабів та застосовуваних засобів, мають руйнівний характер не лише через прямі економічні збитки господарському комплексу, а й внаслідок порушення стійкості природних комплексів на значних площах. Деградація екосистем постає одним із найпоширеніших та найнебезпечніших екологічних наслідків воєнних дій.

Значний масив екологічних проблем безпосередньо пов'язаний із трансформацією ґрунтового покриву, який визначає рівень стійкості всієї біосфери. Це зумовлено не лише специфікою ґрунтів як природних об'єктів з високим рівнем організації та великою кількістю екологічних функцій, а й їхньою унікальною здатністю акумулювати наслідки антропогенного навантаження і відображати процеси геохімічних перебудов.

Під час воєнних дій ґрунти зазнають інтенсивного впливу надзвичайно широкого спектра трансформуючих факторів. Їхнє взаємне накладання формує складну екологічну ситуацію за рахунок розвитку прямих, вторинних та комбінованих ефектів, що неминуче призводить до деградації ґрунтів і супутніх ценотичних компонентів.

Мета дослідження полягає у вивченні основних закономірностей трансформації техноприродних геосистем під впливом військового чинника, а також у розробці рекомендацій щодо запобігання та мінімізації негативних наслідків для довкілля. Відповідно до мети було здійснено оцінку стану природного середовища в районах ведення бойових дій, виокремлено специфічні чинники техногенного впливу на його компоненти та обґрунтовано методи відновлення пошкоджених природних комплексів.

В ході виконання дослідження було отримано такі результати:

1) для встановлення чинників впливу на екобезпеку в зонах ведення бойових дій детально вивчено географічні особливості відповідних територій;

2) узагальнено та охарактеризовано методологічні підходи до вивчення природних систем України, які деградували під руйнівним тиском військової агресії;

3) розглянуто специфіку застосування методик для експертної діагностики стану водних об'єктів та ґрунтового покриву на трансформованих ділянках;

4) запропоновано нове конструктивне рішення лабораторного стенда, яке дозволяє досліджувати результативність електромагнітної обробки води.

ЗАСТОСУВАННЯ НИЗЬКОТЕМПЕРАТУРНИХ ЕВТЕКТИЧНИХ РОЗЧИННИКІВ ДЛЯ МОДИФІКАЦІЇ АДСОРБЕНТІВ

Красногорський Б. О., студент; Трус І. М., доцент; Воробйова В. І., професор; Бондарєва А. І., старший викладач, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ

Наразі гостро стоїть питання підвищення антропогенного впливу на навколишнє середовище. Збільшення чисельності населення призводить до розширення промислового сектора – найбільшого джерела відходів, викидів і скидів у навколишнє середовище. Накопичення нафтопродуктів, важких металів, барвників і фенолів створює значне навантаження на навколишнє середовище і загрожує цілісності екосистем. З'являється необхідність модернізації методів очищення стічних вод.

Сорбція є одним із універсальних методів очищення, що характеризується простим принципом дії. Сорбція – це процес поглинання або зв'язування речовини сорбентом на поверхні або в об'ємі. Метод характеризується простотою, економічною доступністю і універсальністю, проте потребує подальшого вдосконалення. Використання глибоко-евтектичних розчинників для модифікації сорбентів є перспективним напрямком розвитку сучасних методів очищення повітря, стічних вод і ґрунтів. Низькотемпературні евтектичні розчинники (НЕР) [1] – це суміші двох або більше компонентів, в таких пропорціях, при яких досягається мінімальна можлива температура плавлення, яка значно нижча, ніж температура кожного із компонентів окремо. Вони відносяться до нового покоління «зелених» розчинників [2], розглядаються як альтернатива традиційним органічним розчинникам, які є токсичними і леткими.

Застосування сорбентів, модифікованих НЕР має низку переваг. По-перше, підвищення сорбційної здатності матеріалу. Насичуючи сорбуючий матеріал НЕР, ефективно збільшується кількість активних центрів сорбента. Активні центри – це ділянки сорбента, з якими зв'язується молекули або іони забруднювачів. По-друге, збільшення селективності сорбентів. Селективність сорбента до конкретного виду забруднення можна підвищити шляхом модифікації необхідними функціональними групами ($-\text{OH}$, $-\text{COOH}$, $-\text{NH}_2$, $-\text{SH}$). По-третє, екологічність НЕР та легкість синтезу. Більшість НЕР складаються із біорозкладних компонентів, які при потраплянні в навколишнє середовище не будуть накопичуватись, а будуть швидко розкладатися мікроорганізмами. Синтез НЕР дуже простий, змішування компонентів у відповідних співвідношеннях при помірному нагріванні [3]. Це значно зменшує собівартість НЕР в порівнянні з іншими розчинниками. Крім того, важливою є здатність до регенерації та повторного використання і відновлюваність, адже значна частина компонентів НЕР є природними відновлювальними джерелами. Суттєвою проблемою для навколишнього

середовища є постійне зростання кількості нових типів забруднювачів. Сорбенти не можуть достатньо ефективно видаляти деякі барвники і відходи фармацевтичних засобів [4], кількість і різноманітність яких збільшується.

У табл. 1 наведено характеристики модифікованих сорбентів в порівнянні з їх традиційними варіантами.

Таблиця 1 – Переваги модифікованих сорбентів порівняно з традиційними сорбентами

Переваги НЕР модифікованих сорбентів	Обмеження традиційних сорбентів
Можливість збільшення кількості активних центрів сорбента до необхідних значень	Кількість активних центрів обмежена природою і структурою матеріалу
Можливість модифікації структури сорбента, від якої значною мірою залежить ефективність сорбції	Структура матеріалу є лімітуючим фактором для більшості сорбентів
Підвищення селективності матеріалу до конкретних видів забруднювачів	Неповне видалення забруднювачів з води
Можливість адаптації сорбентів для видалення нових типів забруднювачів	Низька ефективність видалення нових видів забруднювачів більшістю адсорбентів

Використання НЕР для модифікації сорбентів є перспективним напрямком розвитку сучасних технологій очищення води. Такий підхід дозволяє підвищити ефективність видалення забруднювачів і сприяє зменшенню негативного впливу на довкілля.

Список літератури

1. Smith E. L., Abbott A. P., Ryder K. S. Deep eutectic solvents (DESs) and their applications. *Chemical Reviews*. 2014. № 114. P. 11060–11082.
2. Del Monte, F.; Carriazo, D.; Serrano, M.C.; Gutiérrez, M.C.; Ferrer, M.L. Deep Eutectic Solvents in Polymerizations: A Greener Alternative to Conventional Syntheses. *ChemSusChem*. 2014 (7). P. 999–1009.
3. Ramón D. J., Guillena G. (ed.). Deep eutectic solvents: synthesis, properties, and applications. – 2020.
4. Lawal I. A., Klink M., Ndungu P. Deep eutectic solvent as an efficient modifier of low-cost adsorbent for the removal of pharmaceuticals and dye. *Environmental research*. 2019. 179. – P. 108837.

Робота виконана у межах науково-дослідної роботи «Розробка функціональних біополімерів із відновлювальної сировини для створення інноваційних технологій водоочищення та водокористування» (держреєстрація № 0126U001341).

МОНІТОРИНГ ГАЗОТРАНСПОРТНОЇ СИСТЕМИ МІСТА

Бойко О. С., аспірант; Пляцук Л. Д., зав. каф. ЕПТ; Васькін Р. А., доц. каф. ЕПТ, Сумський державний університет, м. Суми

Актуальність теми. Енергетична стабільність є ключовим фактором економічного розвитку будь-якої держави. Україна, володіючи однією з найбільших газотранспортних систем у світі, забезпечує як власні потреби в енергоносіях, так і транзит природного газу до країн Європейського Союзу. Проте інфраструктура ГТС України була побудована переважно у середині ХХ століття, що призводить до високих ризиків технічних збоїв, серед яких особливо небезпечними є аварійні скиди газу.

Скиди газу, спричинені аваріями, мають значний негативний вплив на навколишнє середовище. Основний компонент природного газу (метан) є потужним парниковим газом, глобальний потенціал потепління якого у 25 разів перевищує вуглекислий газ. Крім того, витоки газу спричиняють локальне забруднення ґрунтів, водних об'єктів і атмосферного повітря. У багатьох випадках створюють загрозу через можливість вибухів.

Магістральні газопроводи – це основні артерії газотранспортної системи, які проходять великими відстанями через різні типи ландшафтів. Вони піддаються впливу багатьох ризиків, таких як зсуви ґрунту, стороннє втручання, механічні пошкодження або природні катастрофи. Для ефективного виявлення витоків та інших аномалій запропоновано використовувати автономні пристрої виявлення, які будуть розміщені на певних відстанях вздовж газопроводів. Особливості застосування: моніторинг у ключових точках; ефективність розміщення; мережеве підключення; автономність і стійкість.

Пропоновані рішення із застосуванням автономних IoT модулів вздовж магістральних ліній та на території газосховищ є ефективними з точки зору швидкого виявлення потенційних проблем та зниження витрат на обслуговування системи моніторингу, що дозволить системі працювати в автономному режимі протягом тривалого часу.

Однією з головних переваг є можливість масштабування системи – модулі можуть бути легко інтегровані в існуючу інфраструктуру моніторингу, що дозволяє розширювати зону покриття без значних капіталовкладень. Крім того, варіант із сонячними панелями дозволяє використовувати систему в районах, де немає можливості забезпечити доступ до електромережі, що є важливою умовою для віддалених і важкодоступних об'єктів.

Система також пропонує ефективний підхід до моніторингу завдяки можливості періодичного вимірювання і передачі даних кожні 10, 30, або 60 хвилин. Це дозволяє знизити енергоспоживання та продовжити термін роботи на одному заряді акумулятора. Наприклад, для передачі даних кожно годину, пристрій виявлення здатний працювати автономно до 2,5 років, що значно знижує потребу в частому обслуговуванні.

СИСТЕМНИЙ ПІДХІД ДО ТЕХНОЛОГІЇ ВІДНОВЛЕННЯ ҐРУНТІВ, ПОРУШЕНИХ ВНАСЛІДОК ВІЙСЬКОВИХ ДІЙ

*Вакал В. С., докторант кафедри екології та природозахисних технологій,
Сумський державний університет, м. Суми*

На сьогодні українські ґрунти потерпають не тільки від техногенного забруднення внаслідок господарської діяльності людини, але й від військової агресії РФ. Широке застосування різних видів озброєння вже нанесло значну шкоду довкіллю, а особливо землям сільськогосподарського призначення у вигляді фізичного, хімічного, біологічного та екологічного забруднення. Основу фізичного забруднення складає мінування територій, її захаращеність будівельними матеріалами від оборонних споруд та залишками пошкодженої і згорілої техніки та боєприпасів. Хімічна деградація ґрунту відбувається за рахунок залишкових кількостей вибухових речовин під час вибухів, важких металів, нафтопродуктів тощо, що суттєво знижує поживну цінність ґрунтової маси. Біологічне забруднення обумовлене термічним впливом при вибухах різного виду боєприпасів, що безпосередньо впливає та, в ряді випадків, знищує мікробіоту родючого шару й призводить до втрати органічного вуглецю з нього. Екологічне забруднення характеризується втратою родючого гумусу, пошкодженням ландшафту при вибухах засобів ураження з утворенням вирв та перемішуванням родючого шару ґрунту і материнської породи. Зниження впливу фізичного й екологічного забруднень на родючий шар ґрунту потребує певних зусиль, та вони не є довгостроковими. Водночас, критичними викликами для безпечного ведення сільськогосподарської діяльності в довгостроковій перспективі є, в основному, зниження рівня забруднення токсичними елементами родючого шару ґрунту та відновлення мікробіологічних процесів в ньому. Саме цей напрямок акумулює в собі можливість відновлення родючого шару та зниження впливів всіх видів забруднення ґрунту, порушеного внаслідок військових дій. Якщо валовий вміст токсикантів перевищує їх ГДК, то такі землі підлягають консервації. В іншому випадку відновлення ґрунтів, порушених внаслідок військових дій, можливе шляхом застосування агрохімікатів, головним завданням яких є ремедіація верхнього шару й насичення його органічним вуглецем для самовідновлення екосистеми в цілому. При цьому, ключову роль в розробленні і застосуванні нових агротехнологій мають зіграти органо-мінеральні добрива, які характеризуються наявністю органічного субстату та мінеральних компонентів для стартового розвитку рослин. Саме такий напрямок досліджень дав позитивний результат в ході тестових експериментів з органо-мінеральними добривами на основі дигестату та мінеральних азотно-фосфорно-калійних добрив.

БІОПОЛІМЕРИ ЯК АЛЬТЕРНАТИВА НАФТОХІМІЧНИМ ПЛАСТИКАМ

*Гончаренко Л. І., студ. гр. І-22/Іпх; Пономарьова Л. М., зав. каф. ТПХ,
Сумський державний університет, м. Суми*

Сучасне виробництво пластмас базується на нафтохімічних полімерних матеріалах, які мають високу механічну міцність і низьку собівартість, але спричиняють значний негативний вплив на довкілля через невідновність ресурсної бази та тривалий період розкладання [1]. У відповідь світова наукова спільнота та промисловість активізують розробки біополімерів – матеріалів із відновних джерел, що потенційно здатні зменшити вуглецевий слід, енергетичні витрати та пластикове забруднення [2].

Біополімери – полімерні матеріали, отримані з відновних біологічних ресурсів. На відміну від традиційних поліетилену та поліпропілену, вони здатні частково чи повністю біорозкладатися при певних умовах [3].

Таблиця 1. — Аналітичне порівняння технологічних підходів

Критерій	Нафтохімічні пластики	Біополімери (PLA, PHA)
Сировинна база	Викопні ресурси	Відновні біомаси
Вуглецевий слід (LCA)	Високий	Суттєво нижчий
Енерговитрати виробництва	Низькі–середні	Вищі (через ферментацію/ферміт)
Біорозкладність	Ні	Так (за умов компостування)
Механічні властивості	Високі	Варіюються, нижчі
Масове виробництво	Деякі десятиліття	Початкові стадії

Аналіз літературних джерел демонструє, що PHA має ширший спектр застосувань завдяки кращій біорозкладності та механічним властивостям, але виробництво цього полімеру є найменш економічно ефективним [5]. PLA вимагає нижчих інвестицій, але має обмеження по температурному діапазону застосування [4].

У світовому масштабі технології виробництва біополімерів вже впроваджуються у промислову практику, але зберігаються високі витрати на ферментацію, очищення та формування продуктів [4, 5]. Показники сталості демонструють потенціал, але реальна *економічна життєздатність* ще не досягнута на рівні нафтохімії.

В Україні розвиток зеленої хімії та біополімерів перебуває у початковій стадії: є окремі дослідження з PLA і PHA, але немає масштабованого виробництва та чітких національних стратегій зі сталого виробництва біоматеріалів. Основні прогалини: відсутність промислових ліній із замкнутим циклом виробництва біополімерів; нестача фінансування та стимулів для комерціалізації; обмежена інтеграція LCA у державну політику

[6]. Ці прогалини збігаються зі світовими бар'єрами, але в Україні вони посилюються відсутністю інфраструктури для біорозкладання та компостування.

Попри активний розвиток біополімерів, зберігаються суттєві наукові й технологічні обмеження. Однією з ключових проблем є висока енергоємність ферментаційних процесів і складність очищення продукту, що підвищує собівартість PHA та PLA. Потребують удосконалення каталізатори й технології полімеризації для покращення термостійкості та механічних властивостей матеріалів без збільшення екологічного навантаження.

Недостатньо розробленими залишаються інтегровані моделі оцінки сталості (LCA та S-LCA), адаптовані до національного контексту, а також економічні моделі життєвого циклу, що дозволили б обґрунтувати комерційну доцільність масштабування виробництва. В Україні особливо відчутною є відсутність пілотних промислових проєктів, які могли б продемонструвати реальну інтеграцію біополімерів у виробничі сектори.

Біополімери є перспективною альтернативою нафтохімічним пластикам завдяки нижчому вуглецевому сліду та потенційній біорозкладності, особливо у сфері упаковки та одноразових виробів. Проте їх широке впровадження стримується технологічними обмеженнями, високою собівартістю та недостатнім масштабуванням.

Для України розвиток цієї галузі потребує державної підтримки, інвестицій та впровадження методології LCA у стратегії сталого виробництва. Перспективними є гібридні матеріали, використання відходів біомаси, вдосконалення ферментаційних процесів та інтеграція принципів циркулярної економіки [5, 6].

Список літератури

1. Life cycle inventory and impact assessment data of Ingeo PLA production. (2020). NatureWorks LLC, 167–180.
2. Auras, R., Harte, B., & Selke, S. (2004). An Overview of Polylactides as Packaging Materials. *Macromolecular Bioscience*, 4(9), 835–864.
3. Siracusa, V., Rocculi, P., & Rosa, M. D. (2008). Biodegradable polymers for food packaging: a review. *Trends in Food Science & Technology*, 19(12), 634–643. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2008.07.003> (date of access: 17.03.2026).
4. Narancic, R. (2020). Biodegradable plastics: A review of environmental and sustainability metrics. *Current Opinion in Biotechnology*.
5. Koller D. PHA biopolyesters: Biotechnological production and commercialization. *Biotechnology Journal*. 2021.
6. Глущенко Андрій. (2025). Аналіз бар'єрів та передумов для впровадження циркулярної економіки в Україні Analysis of barriers and prerequisites for the circular economy implementation in Ukraine. *Економіка і регіон/ Economics and region*. 22-30.

ОПТИМІЗАЦІЯ ГІДРОДИНАМІЧНИХ УМОВ РОБОТИ ФЕРМЕНТАТОРА

Гонкало Д. В., аспірант; Васькін Р. А., доц. каф. ЕПТ; Пляцук Л. Д., зав. каф. ЕПТ, Сумський державний університет, м. Суми

Анаеробне зброджування органічних субстратів є одним із ключових процесів отримання біогазу, ефективність якого значною мірою залежить від гідродинамічних умов у ферментаторі. Нерівномірне перемішування призводить до утворення застійних зон, локальних градієнтів температури та концентрації, що негативно впливає на активність мікроорганізмів і знижує вихід біогазу. Водночас надмірна інтенсивність перемішування супроводжується підвищеними енергетичними витратами та може порушувати структуру мікробних угруповань.

У процесі зброджування субстратів, таких як гній та рослинні рештки, спостерігається підвищена в'язкість середовища, що ускладнює масоперенос і сприяє утворенню осаду та плаваючих кірок. Це призводить до зменшення ефективного об'єму реактора та погіршення умов газовиділення. У більшості ферментаторів застосовуються різні системи перемішування, проте їх робота часто не забезпечує повної гомогенізації середовища.

Важливим фактором є забезпечення ефективного теплопереносу, оскільки анаеробні мікроорганізми чутливі до змін температури. Наявність холодних або перегрітих зон у реакторі призводить до зниження швидкості біохімічних процесів і нестабільності роботи установки. Рівномірний розподіл температури досягається за рахунок раціонального вибору режимів перемішування та конструктивних параметрів ферментатора.

Значний вплив на гідродинамічні умови має тип перемішувального обладнання. Використання механічних мішалок забезпечує інтенсивне перемішування, однак потребує значних витрат енергії, тоді як газові системи є менш енергоємними, але не завжди ефективними для густих субстратів. Гідравлічне перемішування може бути компромісним рішенням, проте вимагає додаткового обладнання.

Якщо аналізувати вплив гідродинаміки на ефективність процесу, то оптимізація параметрів перемішування дозволяє покращити масо- і теплоперенос, запобігти утворенню застійних зон і забезпечити рівномірний розподіл компонентів у реакторі. Так, серед основних підходів застосовуються регулювання швидкості обертання мішалок, циклічний режим перемішування, зміна конфігурації потоків, а також використання методів математичного моделювання для оцінки розподілу швидкостей і концентрацій. Тож оптимізація гідродинамічних умов роботи ферментатора дозволяє підвищити стабільність процесу, знизити енергетичні витрати та збільшити вихід біогазу.

ЕФЕКТИВНЕ ОЧИЩЕННЯ ГАЗОПИЛОВИХ ВИБРОСІВ ВІД ДРІБНОДИСПЕРСНОГО ПИЛУ

*Демченко Є. Р., студ. гр. ТС-31/1; Баранов В. М., аспірант; Гурець Л. Л.,
проф. каф. ЕПТ, Сумський державний університет, м. Суми*

У сучасних умовах розвитку промисловості проблема очищення газових викидів від пилу є надзвичайно актуальною. Забруднення атмосферного повітря твердими частинками негативно впливає на здоров'я людей, стан довкілля та екосистеми. Одним із найбільш ефективних способів очищення газів від пилу є використання рукавних фільтрів, які забезпечують високий ступінь очищення навіть від дрібнодисперсних частинок [1].

Рукавний фільтр являє собою апарат, у якому очищення газу відбувається шляхом його проходження через спеціальні тканинні елементи – рукави. Під час цього процесу пил осідає на поверхні або в порах фільтруючого матеріалу [2], тоді як очищений газ виходить назовні. З часом на поверхні тканини утворюється шар пилу, який додатково підвищує ефективність очищення. Для підтримання стабільної роботи фільтра пил періодично видаляється шляхом механічного струшування або імпульсної продувки стисненим повітрям. Основними перевагами рукавних фільтрів є високий ступінь очищення (до 99%) [3], здатність уловлювати дуже дрібні частинки та універсальність застосування в різних галузях промисловості.

Для виконання розрахунку рукавного фільтра необхідно задати вихідні параметри. Для виконання розрахунку приймемо такі параметри:

- об'ємна витрата газу: $Q = 50 \text{ м}^3/\text{год}$;
- швидкість фільтрації: $W = 1 \text{ м/хв}$ (середнє значення);
- температура та склад газу – нормальні умови;
- тип пилу – середньодисперсний.

Для подальших обчислень цю величину доцільно перевести у м^3 за хвилину.

Переведемо витрату в $\text{м}^3/\text{хв}$: $Q = 50/60 = 0,83 \text{ (м}^3/\text{хв)}$.

Швидкість фільтрації приймається на рівні 1 м/хв , що відповідає середнім експлуатаційним умовам для рукавних фільтрів при очищенні газів від пилу середньої дисперсності.

Наступним етапом є визначення необхідної площі фільтруючої поверхні. Вона розраховується як відношення витрати газу до швидкості фільтрації: $F = Q/W = 0,83 / 1,0 = 0,83 \text{ (м}^2)$. Отже, необхідна площа фільтруючої поверхні становить $0,83 \text{ м}^2$. Це означає, що саме така площа фільтруючого матеріалу необхідна для ефективного очищення заданого газового потоку.

Далі визначається кількість рукавів, необхідних для забезпечення цієї площі. Для розрахунку приймаємо стандартні геометричні параметри рукава: діаметр $0,2 \text{ м}$ і висоту 2 м . Площа поверхні одного рукава визначається як добуток числа π , діаметра та висоти: $F_1 = \pi \cdot d \cdot h = 3,14 \cdot 0,2 \cdot 2,0 = 1,256 \text{ (м}^2)$.

Кількість рукавів: $n = F/F_1 = 0,83/1,256 = 0,66$. Порівнюючи загальну необхідну площу з площею одного рукава, отримуємо значення менше одиниці, що означає, що для забезпечення очищення достатньо одного рукава.

Однак у практичних умовах зазвичай встановлюють більше одного рукава навіть при невеликій продуктивності системи. Це пояснюється необхідністю підвищення надійності роботи обладнання, забезпечення рівномірного розподілу навантаження, а також можливістю проведення технічного обслуговування без зупинки всього процесу очищення. Крім того, запас площі фільтрації дозволяє компенсувати поступове забруднення фільтруючого матеріалу.

Отже, проведений розрахунок показав, що для очищення газового потоку продуктивністю $50 \text{ м}^3/\text{год}$ необхідна площа фільтрації становить $0,83 \text{ м}^2$, що може бути забезпечено одним рукавом стандартних розмірів. Рукавні фільтри є високоефективними пристроями очищення газів, які широко застосовуються у промисловості завдяки своїй надійності, ефективності та простоті експлуатації. Їх використання дозволяє суттєво зменшити викиди пилу в атмосферу та сприяє покращенню екологічного стану навколишнього середовища.

Список літератури

1. Ратушняк Г. С., Лялюк О. Г. Засоби очищення газових викидів. Навчальний посібник. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2008. – 207 с.
2. Очищення повітря / В. Є. Бекетов // Енциклопедія Сучасної України / Редкол.: І. М. Дзюба, А. І. Жуковський, М. Г. Железняк [та ін.] ; НАН України, НТШ. — К. : Інститут енциклопедичних досліджень НАН України, 2022.
3. United States Environmental Protection Agency. Air Pollution Control Techniques. <https://www.epa.gov/air-emissions-factors-and-quantification/ap-42-compilation-air-emissions-factors>

ТЕХНОЛОГІЯ ПОВОДЖЕННЯ З ВІДХОДАМИ РУЙНАЦІЇ

*Нейман В. І., студ. гр. ТС-21/1; Фалько В. В., ст. викл. каф. ЕПТ,
Сумський державний університет, м. Суми*

Продовження війни в Україні призводить до колосальних руйнувань міст, селищ, сіл, та подальшого накопичення відходів руйнації, що є найгострішою проблемою сьогодення. Під ризиком абсолютно всі без виключення населені пункти, вся інфраструктура України, особливо часто страждають прифронтові території. Складна ситуація з відходами руйнації на Київщині, Харківщині, Сумщині та Чернігівщині.

Станом на 5 липня 2025 року в країні пошкоджено по над 137 тис. об'єктів та знищено понад 20 тис, утворилося понад 6,4 млн тон відходів від руйнувань.

Відходи руйнації – це уламки будівель, споруд та матеріали, що утворилися внаслідок бойових дій, терористичних актів або демонтажу, які втратили свої властивості.

Такі відходи накопичуються щоденно, постійно розбираються завали, населені пункти очищуються від уламків зруйнованих об'єктів. За походженням вони поділяються на відходи, що утворилися внаслідок пошкодження (руйнування) об'єктів, і на відходи, що утворилися в результаті демонтажу пошкоджених (зруйнованих) об'єктів. Відходи руйнації утворюються без контролю і містять будівельні, металеві, електронні та електричні відходи, деревину, меблі, скло, пластик, медичні, харчові відходи і багато інших матеріалів. Вони можуть містити небезпечні токсичні, легкозаймісті, вибухонебезпечні, біологічні компоненти, що становить загрозу населенню та навколишньому середовищу

Відходи руйнації можливо використовувати для відновлення пошкоджених об'єктів і при виробництві будівельних матеріалів, перероблюючи кучі будівельного сміття на користь за правильного сортування, а саме перероблений бетон для нового бетону, дорожнього будівництва, цеглу для підсіпки доріг, пластик для ізоляційних матеріалів, метал після переплавки використовувати за призначенням, деревину для виготовлення ДСП.

В країнах Євросоюзу використовують нові передові технології переробки відходів бетону, однією з яких є технологія ADR, це механічна система сортування та класифікації частинок мокрою подрібненого бетону за розміром. Вона використовує кінетичну енергію для розриву водного зв'язку, що утворюється вологою, пов'язаною з дрібними частинками. Найважливішою особливістю технології ADR є сталий розвиток та доступність з точки зору енергоефективності порівняно з традиційними технологіями, розробленими раніше. Інноваційними особливостями ADR є її здатність класифікувати заповнювачі незалежно від їхньої вологості, а також її гнучкість до різних вхідних матеріалів (наприклад, вапняково-бетонних

відходів, відходів легкого бетону). Додатковою важливою особливістю технології ADR є її мобільність. Її можна транспортувати на одній вантажівці, щоб переробка заповнювача здійснювалася на місці знесення. Крім того, це дає можливість спільно використовувати один і той самий об'єкт різними компаніями як для переробки будівельних відходів знесення, так і для переробки надлишків бетону з будівельного майданчика. Загальна схема, що показує роботу та розділення бетону за допомогою ADR, показана на рисунку 1.

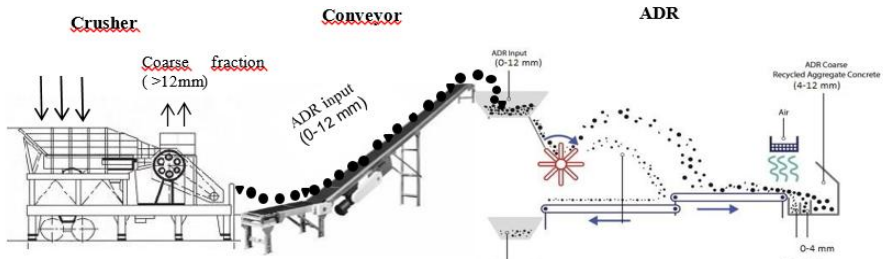


Рисунок 1 – Спрощена схема дробарки, конвеєра та принципу роботи ADR [1]

ADR, по суті, сортує вхідні бетонні відходи (0-12 мм) на три потоки продукції: це грубий продукт (4-12 мм), продукт повітряного ножа (1-4 мм) та продукт ротора (<1 мм). Продукт повітряного ножа відокремлюється від грубої фракції за допомогою повітряного сита, таким чином, до складу цього продукту входять легші забруднювачі, такі як деревина та пластик. Усі грубі фракції >4 мм є чистими та можуть бути використані для заміни до 100% чистого заповнювача в бетоні. Інша частина дрібної фракції (<4 мм) буде подаватись у систему нагрівання, де дрібний заповнювач нагрівається, активується та класифікується відповідно до розміру частинок для отримання чистого піску та наддрібних частинок. Понад 90% грубої фракції складається з заповнювачів розміром 4-12 мм, ці заповнювачі є чистими та можуть бути повністю повторно використані в будівельній галузі [1].

На Сумщині впроваджують систему управління відходами руйнації, що включає їх збирання, сортування, тимчасове зберігання та переробку. Застосування технології ADR дозволяє зменшити екологічну шкоду та витрати на нові матеріали.

Список літератури

1. D5.1 – Demonstration of new advanced recycling technologies for EoL concrete waste, waste building glass and insulating mineral wool waste. URL: <https://ec.europa.eu/research/participants/documents/downloadPublic?documentIds=080166e5c4842365&appId=PPGMS>

ВПЛИВ ДОБАВОК ЕЛЕКТРОПРОВІДНИХ МАТЕРІАЛІВ НА ІНТЕНСИФІКАЦІЮ ВИДАЛЕННЯ АНТИБІОТИКІВ ІЗ ДИГЕСТАТУ

*Парамонов А. В., аспірант; Аблєєва І. Ю., доц. каф. ЕПТ,
Сумський державний університет, м. Суми*

Анаеробне зброджування є перспективною технологією переробки органічних відходів із отриманням біогазу та дигестату. Однак присутність антибіотиків у субстратах (гній тварин, мул стічних вод) суттєво ускладнює процес: інгібується мікробна активність, накопичуються фармацевтичні речовини. Середня ефективність деградації антибіотиків в анаеробних умовах становить 40–68% залежно від типу субстрату [1].

Серед технологій інтенсифікації процесу значну увагу привертає пряме міжвидове перенесення електронів (DIET), що реалізується шляхом додавання електропровідних матеріалів (ЕМ). Вуглецеві (вугілля) та залізовмісні (магнетит, залізо) ЕМ підвищують швидкість перенесення електронів, стимулюють ферментативну активність і змінюють мікробний консорціум біореактора [2]. Додавання вуглецевих ЕМ збільшувало ефективність деградації антибіотиків на 137–223%, а біологічно відновлений оксид графену забезпечував видалення фармацевтичних сполук і зростання виходу біометану до 40%. Залізовмісні ЕМ утворюють реакційноздатні форми кисню та поліпшують умови для синтрофних мікроорганізмів, відповідальних за гідроліз β-лактамного кільця [3].

Ефективність ЕМ залежить від типу субстрату та режиму зброджування. Термофільні умови (50–60 °C) у поєднанні з ЕМ демонструють синергетичний ефект: різниця між мезофільним і термофільним режимами у видаленні антибіотиків сягає 20–40%. Модифіковане K₂CO₃ біовугілля з питомою поверхнею до 1600 м²/г одночасно виступає адсорбентом антибіотиків і електропровідним медіатором DIET, забезпечуючи подвійний механізм видалення поллютантів [4].

Список літератури

1. Tu S.-F. et al. Valorization of solid digestate through biochar production for toluene adsorption and enhanced energy recovery as solid recovered fuel // *Waste Management*. 2025. Vol. 202. Article 114845.
2. Yu J. et al. Low toxicity mechanistic insights into Z-scheme WO₃/BiFeO₃/DSB photocatalysts for efficient ampicillin degradation // *npj Clean Water*. 2025. Vol. 8. Article 34. <https://doi.org/10.1038/s41545-025-00442-w>
3. Albero B. et al. Analysis of organic contaminants and in vitro cytotoxicity to test the suitability of external organic matter processing. *ACS Environ. Au*. 2025. Vol. 5. P. 376–386. <https://doi.org/10.1021/acsenvironau.4c00092>
4. Lu H.-C. et al. Microplastic in Australian processed organics: abundance, characteristics and potential transport to soil ecosystem. *Manag.* 2025. Vol. 375. Article 124359. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2025.124359>

ГРАНУЛЬОВАНИЙ ДИГЕСТАТ У ТЕХНОЛОГІЇ ОЧИЩЕННЯ ҐРУНТІВ, ЗАБРУДНЕНИХ ВАЖКИМИ МЕТАЛАМИ

*Сінко І. О., аспірантка; Аблєєва І. Ю., доц. каф. ЕПТ,
Сумський державний університет, м. Суми*

Військові дії спричиняють комплексні забруднення довкілля та трансформують звичні процеси перебігу речовин. Контамінація важкими металами токсично впливає на властивості ґрунтів, їх структуру, врожайність, що призводить до скорочення сільськогосподарських площ земель, придатних до використання. Надалі забруднюючі речовини трофічними шляхами поширюються та накопичуються в живих організмах, спричиняючи в майбутньому важкі, незворотні захворювання. Таким чином, наслідки забруднення для навколишнього середовища значно масштабніші, складніші та небезпечніші з перспективою довготривалої втрати земель, негативного впливу на стан здоров'я, із можливою небезпекою успадкування мутацій наступними поколіннями. Тому при виборі технології очищення ґрунтів варто враховувати її вплив на віддалені наслідки забруднень.

Джерелами забруднення довкілля важкими металами під час бойових дій є боеприпаси та вибухові речовини, згоріла військова й цивільна техніка, вибухи паливно-мастильних матеріалів, наслідки детонації боеприпасів, що не вибухнули, залишки від руйнування промислових, енергетичних об'єктів, складів, цивільної та військової інфраструктури, пошкоджені транспортні засоби, витоки мастил, акумуляторних рідин та інших технічних речовин, а також вторинні джерела забруднення у вигляді пожеж, повеней, зсувів після обстрілів, розповсюдження пилу від вибухів, змив забруднених частинок із поверхні ґрунту дощовими та талими водами, накопичення важких металів у рослинності з подальшим відмиранням і потраплянням у землю та ін.

Технології очищення ґрунтів повинні бути екологічно безпечними як для довкілля, так і для людини. Серед оптимальних способів розглядають застосування гранульованого біогазового дигестату з добавками, що сприяють іммобілізації важких металів, тобто трансформують їх у більш стабільну форму, що знижує їхню рухливість, біодоступність, фітодоступність та вимивання металу, оскільки його кількість у водорозчинних фракціях ґрунту зменшується.

Іммобілізація відбувається за рахунок хелатування [1] іонів важких металів органічними полімерами та карбоксильними, фенольними групами дигестату. Внаслідок цього важкі метали зв'язуються з органікою і стають менш доступними. Іншою стороною є те, що зазвичай нейтральний або слабколужний рН дигестату підвищує рН ґрунту, чим сприяє утворенню гідроксильних або карбонатних сполук іонів металів, які є дуже мало розчинними, що ще сильніше зменшує їх рухомість і доступність. Таким чином контамінант вилучається з трофічних ланцюгів живлення, що перешкоджає їх потраплянню до живих організмів та попереджає

поширенню токсичної дії в навколишньому середовищі.

У якості добавок доцільно використовувати глинисті адсорбенти (цеоліти), вуглецеві сорбенти (біовуглець), гумінові/фульвові кислоти [2], фосфатні та вапнові добавки, біосурфактанти та ін. Вони забезпечують сорбцію важких металів, зв'язують та стабілізують їх. Фосфати формують з металами нерозчинні форми. Бікарбонати підвищують рН ґрунту, сприяють осадженню металів у вигляді гідроксидів чи карбонатів. Силікони (кремнезем) сприяють створенню стабільних силікатних комплексів. Біогумусові речовини підсилюють органічне зв'язування металів.

Для технології формування гранул використовується дигестат на основі різних типів субстратів: дигестати із вхідною сировиною на базі тваринних та харчових відходів містить у середньому 26,5 г/кг N, 34 г/кг P, 12,6 г/кг K, із гною тварин та силосу – 25 г/кг N, 8,4 г/кг P, 76 г/кг K; 29,7 г/кг N, 4,8 г/кг P, 17 г/кг K [3]. Також продукт може містити мікроелементи, необхідні для життєдіяльності рослин і ґрунтових мікроорганізмів. Частина з них є складовою органічних комплексів, що підвищують доступність для рослин та сприяє зв'язуванню важких металів у менш рухомі форми. До того ж ще можуть бути присутні органічні кислоти, амінокислоти, білкові сполуки, залишки целюлози, які додатково сприяють підвищенню ефективності застосування гранул для очищення забруднених ґрунтів від важких металів

Отже, бойові дії призводять до появи складних, комплексних та довготривалих забруднень усіх сфер взаємодії живого в довкіллі. Для очищення ґрунтів, забруднених важкими металами внаслідок військової агресії, запропоновано застосовувати гранульований біогазовий дигестат із добавками, що забезпечують іммобілізацію забрудників, що сприяє їх знерухомиленню та перетворенню на менш біодоступні для живого форми. Крім того, органічна частина гранул виступає біодобрином, що містить макро- та мікроелементи, які сприяють покращенню властивостей ґрунтів, структури, вологоутримувальну здатність, аерацію та стимулює розвиток ґрунтової мікрофлори, що, у свою чергу, добре впливає на ріст і розвиток рослинності на забрудненій ділянці.

Список літератури

1. Meng F., Wang Y., Wei Y. Advancements in Biochar for Soil Remediation of Heavy Metals and/or Organic Pollutants. *Materials*. 2025. Vol. 18, no. 7. P. 1524. Doi: 10.3390/ma18071524.
2. Zhang X., Wang X.Q., Wang D.F. Immobilization of Heavy Metals in Sewage Sludge during Land Application Process in China: A Review. *Sustainability*. 2017. Vol. 9. P. 2020. Doi: 10.3390/su9112020.
3. Sipko I., Ablicieva I. A systematic approach to the formation of quality and environmental safety of biofertilizer from digestate. *Journal Environmental Problems*. 2024. Vol. 9, no. 3. P. 123–135. DOI: <https://doi.org/10.23939/ep2024.03.123>

СТВОРЕННЯ ПУНКТИВ РОЗДІЛЬНОГО ЗБИРАННЯ ПОБУТОВИХ ВІДХОДІВ, ЯК СКЛАДОВА РОЗВИТКУ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ВІДХОДАМИ У СУМСЬКІЙ ОБЛАСТІ

*Настасенко М. Т., студентка; Лазненко Д. О., доц. каф. ЕПТ,
Сумський державний університет, м. Суми*

Проблема управління побутовими відходами сьогодні є однією з найбільш актуальних як для Сумської області, так і для України в цілому. В Сумській області система управління побутовими відходами все ще значною мірою базується на їх захороненні. Такий підхід є застарілим і не відповідає сучасним європейським практикам, де основний акцент робиться на зменшенні утворення відходів, їх повторному використанні та переробленні. У результаті на полігонах та звалищах накопичуються значні обсяги відходів і створюють додаткове навантаження на довкілля.

У 2024 році було затверджено Національний план управління відходами до 2033 року, яким встановлено, що ключовими напрямками реалізації державної політики у сфері управління відходами є запобігання їх утворенню та скорочення обсягів захоронення. Цільові показники управління відходами, встановлені Національним планом, мають переноситися в Регіональні плани управління відходами, а потім в місцеві, та є обов'язковими для виконання.

Забезпечення виконання встановлених цільових показників щодо підготовки до повторного використання та рециклінгу побутових відходів вимагає створення та підтримання функціонування ефективної системи управління побутовими відходами на рівні областей і територіальних громад.

У Сумській області зараз здійснюється оновлення Регіонального плану управління відходами.

Регіональним планом управління відходами Сумської області, серед інших рішень, доцільно передбачити створення органами місцевого самоврядування пунктів роздільного збирання побутових відходів згідно із Законом України «Про управління відходами». Рекомендації з облаштування таких пунктів містяться у методичних рекомендаціях з організації збирання та перевезення побутових відходів, затверджених наказом Міністерства розвитку громад та територій України № 1172 від 23.10.2024.

В пунктах роздільного збирання побутових відходів можуть збиратися ресурсоцінні відходи, небезпечні відходи у складі побутових, великогабаритні та ремонтні відходи, відходи електричного та електронного обладнання та інші види відходів. В таких пунктах доцільно передбачити також збирання відходів, що можуть бути направлені на повторне використання без попереднього оброблення, або із застосуванням підготування до повторного використання.

При організації пунктів роздільного збирання варто передбачити функції інформаційно-просвітницького впливу на населення щодо просування ідей екологічного споживання та мінімізації обсягів утворення відходів.

ВИЛУЧЕННЯ ТЕХНІЧНИХ КАТІОННИХ ПОВЕРХНЕВО-АКТИВНИХ РЕЧОВИН ІЗ ВОДИ ЗА ПРИСУТНОСТІ ЕКОБЕЗПЕЧНОГО АДСОРБЕНТУ (ФЛОТАЦІЙНОГО НОСІЯ)

Волювач О. В., с. н. с. НДЧ; Стрельцова О. О., зав. каф. фізичної та колоїдної хімії, Одеський національний університет ім. І. І. Мечникова, м. Одеса

Потрапляючи з технологічними водними розчинами у поверхневі води, поверхнево-активні речовини (ПАР) через здатність до піноутворення та здатність до солубілізації більш токсичних речовин неорганічної (іони важких металів) та органічної (фенольні сполуки тощо) природи становлять загрозу для навколишнього середовища і живих організмів [1-4]. У зв'язку з цим потребується удосконалення існуючих або розробка нових інноваційних методів очищення води від ПАР.

На підставі одержаних нами експериментальних даних проведено узагальнення колоїдно-хімічних закономірностей вилучення деяких широко розповсюджених у різних галузях промисловості технічних ПАР катіонного типу: цетазолу, ГПХ-3А. Вибір в якості адсорбенту порошку крохмалю при вилученні із водних розчинів технічних ПАР методом флотації, обумовлений його доступністю та екологічною безпечністю.

Для визначення оптимальної дози крохмалю досліди проводили при незмінній концентрації (50 мг/л) ПАР при рН 6 і температурі 18-20 °С. Як видно з табл. 1, ступінь флотаційного вилучення цетазолу та ГПХ-3А досягає максимального значення при дозі крохмалю 1 мг на 1 мг ПАР. Введення надлишкової кількості крохмалю не спричиняє погіршення процесу очищення води від технічних катіонних ПАР, що є дуже важливим для технологів у випадку передозування реагенту.

Таблиця 1 – Ступінь флотаційного вилучення цетазолу та ГПХ-3А за присутності порошку крохмалю (час флотації 8–10 хв)

Доза крохмалю, мг на 1 мг ПАР	цетазолу	ГПХ-3А
0,0	76	80
0,1	80	84
0,5	86	85
1,0	93	92
2,0	93	92
5,0	94	92

При однаковій дозі реагенту (1 мг крохмалю на 1 мг ПАР) ступінь флотаційного вилучення катіонних технічних ПАР не змінюється при подальшому підлучуванні розчинів до рН 8. Вибір значень рН середовища 6-8 обумовлений тим, що саме такі значення рН мають більшість технологічних водних розчинів, що потребують глибокого очищення від катіонних ПАР. У випадку аварійного зливу у стічні води технологічних

розчинів з $\text{pH} > 8$ ефективність процесу вилучення катіонних ПАР збільшується.

Досліди по флотаційному вилученню цетазолу та ГПХ-3А за допомогою реагенту (1 мг крохмалю на 1 мг ПАР), проведені на серії модельних розчинів, які містять неорганічні електроліти (KCl , K_2SO_4 , Na_3PO_4) від 100 до 8200 мг/л (такі кількості електролітів звичайно містяться у стічних водах текстильних підприємств), показали, що додаткова мінералізація розчинів лише сприяє більшому вилученню із них катіонних технічних ПАР. Ступінь вилучення ПАР при відсутності піни складає 99–100%.

Список літератури

1. Gyanaranjan Jena, Kasturi Dutta, Achlesh Daverey. Surfactants in water and waste water (grey water): Environmental toxicity and treatment options. *Chemosphere*. 2023. Vol. 341, Article № 140082.

2. Holmberg K., Jonsson B., Kronberg B., Lindman B. Surfactants and Polymers in Aqueous Solutions. England: J. Wiley & Sons, 2003. 528 p.

3. Phillip Johnson, Anna Trybała, Victor M Starov, Valerie Pinfield. Effect of synthetic surfactants on the environment and the potential for substitution by biosurfactants // *Advances in Colloid and Interface Science*. 2020. Vol. 288 (10). DOI:10.1016/j.cis.2020.102340

4. Науково-дослідна робота «Обґрунтування прогнозу потенційної небезпеки азотовмісних ПАР для людини та навколишнього середовища і розробка їх нешкідливих рівнів вмісту у воді, водних об'єктах» (номер держреєстрації – 0121U113997, терміни виконання: 2022–2026 рр.).

Робота виконана у межах науково-дослідної роботи (НДР) №322 «Наукове обґрунтування і удосконалення фізико-хімічних методів вилучення і концентрування деяких цінних компонентів та полутантів з розчинів» (номер держреєстрації – 0122U002300, термін виконання: 2022–2026 рр., науковий керівник НДР №322: д-р хім. наук, проф. Стрельцова О. О.).

УТИЛІЗАЦІЯ РОСЛИННОЇ ЗОЛИ ШЛЯХОМ ВИРОБНИЦТВА СКЛАДНИХ ОРГАНО-МІНЕРАЛЬНИХ ДОБРІВ

Ізмоденова Т. І., НДІ мінеральних добрив і пігментів; Гурець Л. Л., проф. каф. ЕПТ, Сумський державний університет, м. Суми

Аналіз біоенергетики країни показує, що залучення в якості палива відходів сільськогосподарського виробництва, супроводжується утворенням великої кількості золи, і це призводить до антропогенного забруднення навколишнього середовища. Через накопичення значної кількості рослинної золи в підприємствах переробної промисловості та в аграрних господарствах, виникає питання щодо поводження з нею, зберігання, транспортування, утилізація і використання.

Збереження рослинної золи на золовідвалах, спричиняє додаткові витрати підприємств та збільшує антропогенне навантаження на екосистему. Золовідвали є відкритими системами і в їх зонах формуються несприятливі екологічні умови: відчуження територій, запилення з поверхні внаслідок високої дисперсності золошлакового пилу, забруднення атмосферного повітря, міграція забруднюючих речовин крізь профіль ґрунту. Вимивання рухомих компонентів золи та попадання їх у воду збільшує мінералізацію ґрунтових вод. Частково рослинну золу утилізують - вивозом на поля (для нейтралізації кислих ґрунтів), або використовують в якості добрива (фасованого, гранульованого, в суміші з компостом чи вапном). Існує досвід використання рослинної золи в будівельній та металургійній промисловості.

Але, перспективним напрямком утилізації рослинної золи є виробництво комплексних органіко-мінеральних добрив. Агрохімічна цінність таких добрив проявляється в можливості використання їх для підвищення продуктивності сільськогосподарських рослин, відтворення та підвищення рівня родючості ґрунту через відновлення вмісту життєво важливих елементів живлення рослин [1]. Також, можливість утилізації рослинної золи шляхом впровадження її у виробництво екологічно безпечних добрив, дозволить суттєво знизити техногенне навантаження на довкілля.

Нами було проведено аналіз хімічного складу та фізико-хімічних властивостей золи різних видів решток сільськогосподарських рослин. За результатами досліджень була зроблена класифікація золоматеріалів для подальшої їх утилізації: а) зола деревини з високим вмістом Са і невисокими – Mg, K, P, S придатна у виробництві будівельних матеріалів та агромеліорації; б) зола соломи соняшника, озимого ріпаку, сої та гречки з високим вмістом Са і K, при невисоких показниках питомої ваги Mg, P, S придатна для виробництва калійних, а при збагаченні на фосфор, фосфорно-калійних добрив та агромеліорації; в) зола соломи злакових культур з високим вмістом K і P та невисоким вмістом Са, Mg придатна для виробництва фосфорно-калійних добрив.

За результатами хімічних та фізико-хімічних досліджень нами було визначено якісну і екологічно безпечну золу решток сільськогосподарських рослин найбільш придатну в якості калієвмісної сировини для виробництва комплексних органо-мінеральних добрив, якою є зола лущиння соняшника, що характеризується максимальним вмістом поживних для рослин речовин (калієм і фосфором) та невисокою вірогідністю присутності важких металів. Проведені дослідження по збагаченню цієї золи фосфоровмісними компонентами, дали нам змогу визначитися з фосфоровмісною сировиною, яка відповідає всім характеристикам, необхідним для безпечного та енергоощадного виробництва комплексних органо-мінеральних добрив. Також було відпрацьовано процес одержання модифікованих зольних НРК-добрив за технологією окатування на тарілчастому і компактування на валковому грануляторах. Це дало змогу вдосконалити їх склад та отримати модифіковані зольні НРК-добрива пролонгованої дії [2].

Нами були проведені вегетативні та польові досліді з використанням модифікованих зольних НРК-добрив (на основі моноамонійфосфату), в порівнянні тільки з моноамонійфосфатом (еталонний варіант). Цими дослідями доведено, що модифіковані зольні НРК-добрива володіли високою ефективністю в якості стартових добрив. При порівнянні показників вмісту фосфору в рослинах, отриманих на фоні внесення модифікованих зольних НРК-добрив відносно еталону (в еквіваленті P_2O_5 по 45 і 60 кг/га), кількість фосфору у 100 проростках озимої пшениці на чорноземі типовому була відносно більшою відповідно на 1,6-1,8 і 1,5-1,8 мг, на дерново-опідзоленому ґрунті - на 0,9-3,0 і 1,2-1,9 мг. Рівень вмісту калію в рослинах завжди був вищим, в порівнянні з еталонним варіантом.

Отримані результати досліджень показали, що модифіковані зольні НРК-добрива, збагачені фосфором, в тому числі водорозчинним, можуть повністю замінити амофос та комплексні складні добрива без зміни ефективності систем живлення рослин. Доведено, що за рівнем біологічної ефективності системи удобрення були на рівні систем з використанням традиційних і мінеральних добрив в еквівалентних кількостях по вмісту елементів живлення, що дає змогу використовувати модифіковані органо-мінеральні добрива на рівні з традиційними мінеральними добривами або бути повноцінною їх заміною. І це суттєво може призвести до зниження техногенного навантаження на ґрунти.

Список літератури

1. Utilization of Renewable Energy Waste (Wood Ash and Straw) in the Production of Mineral Fertilizers / L. Hurets, T. Izmodenova, V. Vakal, S. Vakal, M. Malovanyu. *Journal of Ecological Engineering*. Poland, 2024. 25(4). 332–339.
2. Застосування золи від спалювання сільськогосподарських залишків у виробництві добрив / Л. Л. Гурець та ін. *Зб. наук. праць НУ кораблебудування імені адмірала Макарова*. Миколаїв. 2024. № 1(494). С. 139–150.

ЗАСТОСУВАННЯ НИЗЬКОТЕМПЕРАТУРНИХ ЕВТЕКТИЧНИХ РОЗЧИННИКІВ В ТЕХНОЛОГІЯХ ОЧИЩЕННЯ ВОДИ

Попович С. Л., студентка; Трус І. М., доцент, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ

Наразі важливість прісної води є беззаперечною, а факт зменшення її запасів є дуже тривожним для всієї світової спільноти, адже вода є основним ресурсом життєдіяльності. Постає питання очищення стічних вод, які утворюються внаслідок антропогенного навантаження на водні ресурси. Промисловість, енергетика та урбанізація призводять до накопичення у стічних і природних водах іонів важких металів, нафтопродуктів, фармацевтичних препаратів, барвників та інших токсичних сполук [1].

На даний момент традиційні методи очищення води мають значні технічні, економічні та екологічні проблеми, оскільки їх використання потребує споживання великих об'ємів хімічних речовин, і як наслідок утворення вторинних відходів. Тому логічним є пошук альтернативних методів, які є більш ефективними та екологічно безпечними. Одним із перспективних напрямів розвитку сучасних технологій водоочистки є використання глибоко-евтектичних розчинників, які відносять до класу «зелених» розчинників.

Глибоко-евтектичні розчинники являють собою суміші двох або більше компонентів, здатних утворювати систему водневих зв'язків, унаслідок чого температура плавлення суміші істотно знижується порівняно з температурами плавлення окремих складових [2]. Особливо привабливими є так звані низькотемпературні евтектичні розчинники, що загально визнані у світі як абсолютно безпечні (Generally Recognized as Safe), повністю відповідають принципам зеленої хімії та вважаються розчинниками 4 покоління для хімічної технології XXI сторіччя [3].

Завдяки високій полярності та розчинності, НЕР проявляють селективність до неорганічних та органічних забруднювачів. Вони утворюють комплексні сполуки з іонами важких металів (Cu^{2+} , Zn^{2+} , Pb^{2+} , Cd^{2+} , Cr^{3+}), що забезпечує їх ефективне видалення з водних розчинів у процесах екстракції, а також сприяють видаленню фенолів, барвників, поверхнево-активних речовин та нафтопродуктів [4, 5]. Також НЕР використовуються для модифікації сорбентів та як компоненти мембранних систем, що підвищує адсорбційну здатність матеріалів, інтенсифікує масообмін та забезпечує можливість регенерації цінних компонентів [5].

Основними перевагами низькотемпературних глибоко-евтектичних розчинників є екологічна безпека, низька токсичність, відсутність легких сполук, легкість синтезу та можливість повторного використання. В таблиці наведені дані щодо порівняння застосування традиційних методів очищення води та при використанні інноваційних технологій.

Таблиця 1 – Обмеження традиційних методів очищення води та переваги «зелених» технологій

Обмеження традиційних методів	Переваги застосування НЕР
Неповне видалення забруднювачів, зокрема фармацевтичних препаратів та йонів важких металів, що зберігаються в очищеній воді	Селективна екстракція стійких органічних і неорганічних забруднювачів завдяки налаштовуваним властивостям НЕР
Утворення значних об'ємів вторинних відходів при застосуванні реагентних методів	Мінімізація утворення вторинних відходів та можливість повторного використання НЕР
Високі енергетичні та хімічні витрати при застосуванні мембранних, окислювальних та реагентних методів	Зменшення енергоспоживання та кількості реагентів у процесах екстракції з використанням НЕР
Обмежена ефективність щодо новітніх забруднювачів, зокрема слідових органічних речовин	Можливість цілеспрямованого підбору складу НЕР для підвищення ефективності видалення нових типів забруднювачів

Отже, застосування НЕР у технологіях очищення води є перспективним напрямом, що поєднує високу ефективність видалення забруднювачів із відповідністю сучасним екологічним вимогам.

Список літератури

1. Федорова, К. Вода – найцінніший природний ресурс. *Вісник Одеського національного морського університету*. 2020. № 60. 124-131.
2. Smith E. L., Abbott A. P., Ryder K. S. Deep eutectic solvents (DESs) and their applications. *Chemical Reviews*. 2014. № 114. P. 11060–11082.
3. Воробйова В., Васильєв Г., Трус І., Скиба М., Гнатко О. Екстракція поліфенольних сполук із продуктів переробки винограду низькотемпературним евтектичним розчинником бетаїн-молочна кислота. *Технічні науки та технології*. 2022. № 4 (30). С. 140-147.
4. Dai Y., van Spronsen J., Witkamp G., Verpoorte R., Choi Y. Natural deep eutectic solvents as new green solvents for the extraction of bioactive compounds. *Analytica Chimica Acta*. 2013. – № 766. P. 61–68.
5. Zhang Q., Vigier K., Royer S., Jérôme F. Deep eutectic solvents: syntheses, properties and applications. *Chemical Society Reviews*. 2012. № 41. P. 7108–7146.

Робота виконана у межах науково-дослідної роботи «Розробка функціональних біополімерів із відновлювальної сировини для створення інноваційних технологій водоочищення та водокористування» (держреєстрація № 0126U001341).

ПРИРОДООРІЄНТОВАНІ РІШЕННЯ В УРБАНІСТИЦІ: АНАЛІЗ ПОТЕНЦІАЛУ ЗЕЛЕНИХ ДАХІВ

*Пляцук Є. Д., студент; Яхненко О. М., ст. вкл. каф. ЕПТ,
Сумський державний університет, м. Суми*

Кліматичні зміни та стрімка урбанізація спричинили низку соціальних та екологічних викликів для міських територій. Одним з перспективних шляхів подолання цих криз є впровадження природоорієнтованих рішень, які інтегрують живі системи в антропогенний ландшафт. Дахи складають до 25% горизонтальних поверхонь міста, їх озеленення має великий потенціал для розширення «зеленої інфраструктури» міста.

Конфігурації зелених дахів різняться залежно від географічного розташування, вимог і цілей будівництва. Виділяють три їх групи. Відмінність між ними полягає в глибині субстрату і видах рослин.

Найчастіше створюють «екстенсивні» дахи з субстратом потужністю до 20 см, що дозволяє висаджувати лише невибагливі у догляді посухостійкі рослини. Цей тип дахів більш поширений, бо має меншу вагу, нижчі витрати на будівництво, вимагає менші зусилля по догляді. «Інтенсивні» зелені дахи мають субстрат від 30 см і різноманітний склад рослин, включають кущі і деякі дерева. Комбінацію двох попередніх складає напівінтенсивний зелений дах з проміжною глибиною субстрату, що дозволяє вміщувати невеликі чагарники.

Зелені дахи в першу чергу суттєво пом'якшують наслідки високих температур і кардинально змінюють енергетичний баланс будівлі. Трав'яні поверхні під прямим сонячним промінням залишаються на 24°C холоднішими за бетон, що забезпечує зниження температури зовнішнього кровельного покриття на 15–40°C.

Зелені дахи сприяють декарбонізації міст, скорочуючи емісію вуглецю. Це відбувається двома шляхами. Перший шлях – безпосереднє поглинання вуглекислого газу рослинами в процесі фотосинтезу. Ефективність цього процесу залежить від стану і виду рослин, інтенсивності сонячного світла, швидкості вітру та положення криші. Крім CO₂ зелені дахи здатні вловлювати кілька забруднюючих речовин, включаючи O₃, NO₂ та SO₂. Рослини з неглибокою кореневою системою в зелених насадженнях мають меншу здатність уловлювати газоподібні забруднюючі речовини та частинки пилу в атмосфері. Великі рослини з глибоким корінням, можуть поглинати більше забруднюючих речовин з повітря, але стикаються з багатьма проблемами при будівництві та експлуатації зелених насаджень протягом усього терміну їхньої служби. Другий шлях – опосередковане зменшення викидів CO₂ за рахунок зниження потреби в кондиціонуванні повітря. При цьому зменшується споживання електроенергії, що веде до колосального скорочення викидів. В масштабах міського планування ця економія оцінюється приблизно у 65 000 тон вуглецю на рік.

Зелені дахи зменшують об'єм зливових стоків, утримуючи опади у своїх шарах і знімаючи навантаження з міської каналізації. Гідрологічна ефективність звичайно залежить від клімату і ефективніша в сухому кліматі. Важливо враховувати, що зелені дахи змінюють і якість стоку. Якість стоку залежить від складу та віку субстрату. Вищий вміст органічних речовин у субстраті може призводити до підвищення концентрації забруднюючих речовин у стоковій воді, що вимагає фахового підходу до вибору компонентів та методів удобрення.

Зелений дах функціонує як додатковий звукоізоляційний шар, а також як поглинач звукових хвиль, що проходять через конструкції будівлі. Різниця в звукопередачі між звичайним дахом та зеленим становить до 10, 20 і більше 20 децибел у низькочастотному, середньочастотному та високочастотному діапазонах відповідно. Товстіші субстрати та рослини з більш глибокою кореневою системою посилюють шумозаглушення, у той час як вміст вологи в субстраті не викликає істотних змін.

Зелені простори зелених дахів здатні надавати доквілля для біорізноманіття. У щільно забудованому середовищі, де природні оселища фрагментовані або повністю знищені, такі покрівлі стають біокоридорами для комах-запилювачів та птахів. Завдяки різноманітності флори — від сукулентів на екстенсивних дахах до чагарників на інтенсивних — створюються специфічні мікроніші, що підтримують локальну фауну, надають прихисток рідкісним видам, забезпечують їх кормовою базою.

Також, зелені дахи покращують міську естетику та сприяють розвитку рекреаційної діяльності у міських районах.

Попри значні початкові інвестиції, системи зелених дахів є економічно вигідними у довгостроковій перспективі. Аналіз чистої приведеної вартості свідчить, що за рахунок поглинання вуглецю, подовження терміну експлуатації покрівлі та економії енергії, такі проекти стають прибутковими вже з 10-го року експлуатації.

Отже, впровадження систем зелених покрівель є одним із доволі ефективних методів трансформації міського середовища. Їхня роль виходить далеко за межі естетичного покращення архітектури; це стратегічний інструмент боротьби з глобальним потеплінням на різних рівнях.

Список використаних джерел

1. Nguyen, C. N., Muttli, N., Tariq, M. A. U. R., & Ng, A. W. (2021). Quantifying the benefits and ecosystem services provided by green roofs—A review. *Water*, 14(1), 68.
2. Theodoridou, I., Vatitsi, K., Stefanidou, M., Vanian, V., Fanaradelli, T., Macha, M., ... & Chalioris, C. (2025). Nature-Based Solutions for Urban Buildings—The Potential of Vertical Greenery: A Brief Review of Benefits and Challenges of Implementation. *Urban Science*, 9(10), 398.

ВИКОРИСТАННЯ БІОЧАРУ ДЛЯ РЕМЕДІАЦІЇ ҐРУНТІВ ТА ОЧИЩЕННЯ ВІД ВАЖКИХ МЕТАЛІВ

*Прихожай М. Д., студентка; Яхненко О. М., ст. викл. каф. ЕПТ,
Сумський державний університет, м. Суми*

Внаслідок воєнних дій стан земельних ресурсів України значно погіршився. Процес деградації об'єднує механічне руйнування структури ґрунту, фізичні зміни, а також суттєве хімічне та біологічне забруднення, що проявляється пригніченням життєдіяльності екосистем.

Доволі небезпечним чинником є забруднення важкими металами. Це небезпечні забруднювачі, які не розкладаються в природі та надовго залишаються в ґрунті. Вони легко потрапляють у воду та рослини, руйнуючи біологічні процеси ґрунту, знижуючи його родючість і пригнічуючи корисні мікроорганізми. По трофічним ланкам можуть надходити і до організму людини. Така тривала токсичність створює серйозні ризики як для екосистем, так і для здоров'я людей.

Основні важкі метали, які потрапляють у ґрунт внаслідок воєнних дій є: свинець, кадмій, мідь, цинк, нікель та хром. Військові дії є джерелом надходження цих токсичних елементів у ґрунт – з уламків боєприпасів, гільз, залишків вибухових речовин, фрагментів бронетехніки та паливно-мастильних матеріалів.

Ремедіація земель, уражених військовими конфліктами та забруднених токсичними сполуками, є критично важливою для забезпечення продовольчої безпеки та відновлення сільськогосподарського потенціалу.

Враховуючи стійкість цих забруднювачів до природного розкладу та їхню потенційну загрозу для здоров'я населення через харчові ланцюги та водні джерела, їхня нейтралізація є обов'язковою передумовою для досягнення екологічної стабільності держави.

Отже розробка і застосування інноваційних методів нейтралізації важких металів набуває стратегічного значення для країни.

Один з альтернативних методів ремедіації – використання біочару — високовуглецевого пористого матеріалу, отриманого шляхом термічного безкисневого розкладання органічної біомаси, який завдяки своїй високій питомій поверхні, розвиненій пористості та наявності активних функціональних груп виступає ефективним агентом для відновлення та очищення ґрунтів.

Біочар при потраплянні в ґрунт покращує його фізичні та хімічні властивості, підвищуючи вміст органічного вуглецю та забезпечуючи стабільну фіксацію поживних елементів, таких як азот, фосфор і кальцій.

Завдяки своїй високопористій структурі та великій питомій поверхні, біочар значно покращує водоутримувальну здатність та аерацію ґрунту.

Біочар здатний не лише нейтралізувати кислі ґрунти завдяки своїй лужності, а й закріпити важкі метали для зменшення їхньої рухливості, біодоступності та токсичності.

Виділяють кілька можливих механізмів взаємодії біочару з важкими металами: електростатичну взаємодію, іонний обмін, комплексоутворення та осадження.

Завдяки електростатичному притяганню між зарядженими компонентами біочару та іонами важких металів, останні ефективно вилучаються з ґрунтового розчину, зменшуючи їхню концентрацію та здатність до переміщення.

Іонний обмін відбувається шляхом заміщення іонів важких металів із забрудненого ґрунтового розчину на ті катіони, які раніше були прикріплені до функціональних груп біочару.

Комплексоутворення є процесом утворення стійких хімічних зв'язків між іонами важких металів та активними функціональними групами, розташованими на поверхні біочару.

Найбільш надійним для довгострокової фіксації забруднювачів вважається механізм осадження (преципітації), який перетворює розчинні іони металів у стабільні нерозчинні мінеральні фази, буквально «закриваючи» токсини у твердій структурі.

Крім того, біочар відіграє критичну роль у відновленні біологічної активності, створюючи у своїх порах захищене середовище для ґрунтових мікроорганізмів, які, у свою чергу, допомагають очищувати ґрунт, повертаючи йому життя та родючість.

Таким чином, впровадження технологій з використанням біочару представляє собою ефективний та екологічно безпечний підхід, що забезпечує подвійний позитивний ефект: зменшення концентрації токсичних важких металів та відновлення агрохімічних властивостей і стійкості ґрунтів України.

Список використаних джерел

1. Solokha, M.; Demyanyuk, O.; Symochko, L.; Mazur, S.; Vynokurova, N.; Sementsova, K.; Mariychuk, R. Soil Degradation and Contamination Due to Armed Conflict in Ukraine. *Land* 2024, 13, 1614. URL: <https://www.mdpi.com/2073-445X/13/10/1614>.
2. Biochar for soil remediation: A comprehensive review of current research on pollutant removal / T.-B. Nguyen et al. *Environmental Pollution*. 2023. Vol. 337. P. 122571. URL: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.122571>
3. Biochar-Based Remediation of Heavy Metal-Contaminated Soils: Mechanisms, Synergies, and Sustainable Prospects / Y. Wei et al. *Nanomaterials*. 2025. Vol. 15, no. 19. P. 1487. URL: <https://doi.org/10.3390/nano15191487>.
4. Meng F., Wang Y., Wei Y. Advancements in Biochar for Soil Remediation of Heavy Metals and/or Organic Pollutants. *Materials*. 2025. Vol. 18, no. 7. P. 1524.

ПРОБЛЕМА ЗАБРУДНЕННЯ СТІЧНИХ ВОД МІКРОПЛАСТИКОМ І СПОСОБИ МІНІМІЗАЦІЇ ЕКОЛОГІЧНОГО РИЗИКУ

*Чухіль Є. Р., студент; Яхненко О. М., ст. викл. каф. ЕПТ,
Сумський державний університет, м. Суми*

Мікропластик представляє собою тверді полімерні частинки розміром менше 5 мм і утворюється внаслідок фізичного та хімічного руйнування великих пластикових виробів або виробляється одразу такого розміру (мікрогранули у косметиці, синтетичні мікрОВОЛОКНА). Упродовж останніх десятиліть ці частинки виявлені практично в усіх компонентах навколишнього середовища: у поверхневих і ґрунтових водах, ґрунті, атмосферному повітрі та системах централізованого водопостачання.

Стічні води є одним із ключових векторів транспортування мікропластику до природних водойм, навіть після проходження через очисні споруди певна частка частинок залишається у воді і потрапляє у довкілля.

Це зумовлює необхідність поглибленого вивчення проблеми та розроблення більш ефективних технологій очищення.

Основними джерелами мікропластику у стічних водах є побутові та промислові скиди. До побутових відносять прання синтетичного одягу. Так, одне завантаження пральної машини може вивільняти від 700 тис. до 1,9 млн мікрОВОЛОКОН поліестеру і нейлону. Іншим джерелом є використання косметики з полімерними мікрогранулами та механічне зношення пластикових виробів у побуті.

Промислові джерела охоплюють текстильне виробництво, харчову промисловість і підприємства з переробки полімерів.

Окрему категорію становить вторинний мікропластик, що утворюється безпосередньо у водному середовищі внаслідок фотодеградації та механічного подрібнення великих пластикових відходів. Значна частина мікропластику також надходить до каналізаційних систем з дощовими і талими водами, які змивають частинки з доріг, сільськогосподарських угідь і несанкціонованих звалищ.

Накопичення мікропластику у водних екосистемах спричиняє широкий спектр негативних наслідків. По-перше, частинки здатні адсорбувати на своїй поверхні токсичні органічні сполуки та важкі метали, посилюючи їхній шкідливий вплив. По-друге, мікропластик слугує субстратом для розвитку патогенних мікроорганізмів і може переносити антибіотикорезистентні гени між мікробними популяціями. По-третє, потрапляючи до організму гідробіонтів, частинки спричиняють механічне ушкодження тканин і порушення гормонального балансу. Оскільки понад 90 % риб виявляються забрудненими мікропластиком, ця проблема безпосередньо стосується і харчового ланцюга людини.

Сучасні очисні споруди здатні видалити значну частку мікропластику, проте повного його усунення не гарантують. Механічне попереднє очищення

решітки та відстійники забезпечує ефективність від 16,5 до 98,4 % залежно від розміру частинок; при цьому дрібні фракції (менше 100 мкм) традиційними методами практично не затримуються. Найвищі показники видалення демонструє мембранний біореактор (МБР): його ефективність за різними даними сягає 99,9 %. Флотація розчиненим повітрям і швидка піщана фільтрація досягають 95 % і 97 % відповідно.

Серед хімічних методів виділяють коагуляцію-флокуляцію з природними полісахаридами та електролітичне окиснення, що забезпечує деградацію полістиролу до 89 %. Біологічні підходи – застосування мікроводоростей і спеціалізованих мікробних консорціумів, здатних руйнувати полімерні ланцюги, перебувають на стадії активного дослідження і демонструють перспективні результати. Попри досягнуті успіхи, навіть після третинного очищення стічної води можуть містити залишковий мікропластик, що у значних обсягах надходить до природних водойм.

Поряд із традиційними підходами активно розвиваються новітні технології видалення мікропластику. Перспективним напрямом є застосування магнітних наночастинок оксиду заліза (Fe_3O_4), які завдяки великій питомій поверхні ефективно адсорбують мікропластик і легко вилучаються з води за допомогою магнітного поля. Фотокаталітична деградація з використанням TiO_2 під дією УФ-випромінювання дозволяє не лише вловлювати, а й руйнувати полімерні ланцюги безпосередньо у водному середовищі. Технологія електрокоагуляції поєднує переваги електрохімічного та коагуляційного очищення і демонструє ефективність до 99 % за нижчих експлуатаційних витрат порівняно з МБР. Більшість методів не впроваджені у промислових масштабах і потребують оптимізації.

Отже, забруднення стічних вод мікропластиком є актуальною екологічною проблемою, вирішення якої потребує комплексного підходу. Наявні технології очищення здатні суттєво знизити концентрацію мікропластику, проте жодна з них не забезпечує повного видалення, особливо нанорозмірних фракцій. Завданнями є вдосконалення технологій третинного очищення, стандартизація методів моніторингу, превентивні заходи (зниження обсягів виробництва і споживання одноразового пластику).

Список використаних джерел

1. Bodzek M., Pohl A., Rosik-Dulewska C. Microplastics in wastewater treatment plants: Characteristics, occurrence and removal technologies // *Water*. – 2024. – Т. 16. – №. 24. – С. 3574.
2. Sheriff I., Yusoff M. S., Halim H. B. Microplastics in wastewater treatment plants: A review of the occurrence, removal, impact on ecosystem, and abatement measures // *Journal of Water Process Engineering*. – 2023. – Т. 54. – С. 104039.
3. Talvitie J. et al. Solutions to microplastic pollution—Removal of microplastics from wastewater effluent with advanced wastewater treatment technologies // *Water research*. – 2017. – Т. 123. – С. 401-407.

НЕПАРАМЕТРИЧНИЙ АЛГОРИТМ ВИЗНАЧЕННЯ ЗОН ГРАДУ

Чуряк А. М., аспірант; Пляцук Л. Д., зав. каф. ЕПТ; Козій І. С., проректор з науково-педагогічної роботи, Сумський державний університет, м. Суми

Атмосфера Землі постійно впливає на життя та діяльність людей. Ми багато в чому залежимо від складу та стану приземного шару — погоди, процесів і явищ, що її супроводжують.

Одним із небезпечних метеорологічних явищ (DMP) є град як форма твердих опадів, що складається з кульок або шматків льоду неправильної форми, які окремо називаються градинами.

Град може завдати серйозної шкоди, особливо автомобілям, літакам, світловим люкам, спорудам зі скляними дахами, домашній худобі та, найчастіше, сільськогосподарським посівам. Пошкодження дахів градом часто залишаються непоміченими доти, доки не будуть виявлені подальші структурні пошкодження, такі як протікання або тріщини. Важко розпізнати пошкодження від граду на черепичних і плоских дахах.

Збитки, завдані градом народному господарству України, є дуже значними, особливо в південних районах. Іноді інтенсивність градових опадів може досягати катастрофічних розмірів – 1000–1500 мм/год. Тому в Україні та за кордоном проводяться роботи з захисту посівів від граду. Наприклад, добре відомо, що в Молдові захист від граду охоплює посіви площею 1 млн 300 тис га.

Проведені експерименти показали, що градові опади з максимальним діаметром 0,8–10,0 см за будь-якої можливості в природних умовах за діелектричною структурою градин легко відрізняються від дощових з найбільшою відбивною здатністю на довжинах хвиль між 3,2 і 10 см, що коефіцієнт відбивної здатності під час дощу є постійним і різко знижується в осередках граду, що дозволяє:

- 1) виділення осередків граду під час дощу за допомогою калібрування обох каналів, 2-канального MPL по дощу;
- 2) визначити просторове положення осередку та просторове поширення граду;
- 3) виявити тенденції трансформації обсягу та конфігурації осередків і розміру граду в них.

Індекс сильного граду. Для визначення наявності сильного граду було застосовано підхід, аналогічний алгоритму VII (тобто вертикальна інтеграція відбивної здатності), та внесено зміни, які мають покращити його й без того успішну роботу. Перша зміна передбачає перехід від алгоритму на основі сітки до алгоритму на основі комірок з використанням результатів алгоритму SCIT. Перевага системи на основі комірок полягає в тому, що усувається проблема, пов'язана з тим, що ядро граду перетинає межу сітки і, отже, не може бути точно виміряне.

Моделювання виявлення зони граду імітує завдання виявлення сигналу, відбитого від зони граду. На практиці град часто спостерігається на тлі опадів. Тому альтернативні гіпотези:

- 1) опади;
- 2) град та опади.

Для моделювання було взято вибірку вхідного сигналу, яка раніше використовувалася при побудові гістограм. У цей спосіб забезпечується однозначний поділ ситуацій на «градові» та «неградові». Штучне збільшення розміру вибірки шляхом моделювання дозволяє оцінити надійність.

Таким чином, завданням моделювання є: отримання випадкових чисел із заданими статистичними характеристиками, що імітують перший вимірюваний параметр $x = lg(Z)$; отримання випадкових чисел із заданими статистичними характеристиками, що моделюють другий вимірюваний параметр $y = L_{DR}$; обчислення дискримінантної функції, яка залежить як від інформативних параметрів $y = f(x, y)$; визначення статистичних характеристик дискримінантної функції $p(y)$ у ситуаціях, що відповідають 1) наявності граду та 2) відсутності граду (тобто є лише злива); оцінка достовірності виявлення зон граду при заданому пороговому рівні прийняття рішень та отримання ними значення порогового рівня.

Для оцінки потужності непараметричного алгоритму необхідно задати модель розподілу інформативних параметрів для ситуацій відсутності граду (дошових хмар) та наявності граду (граду й дощу). Нехай відбиття від дошових хмар характеризується двовимірним нормальним розподілом

$$f(x_1, x_2) = \frac{1}{2\pi\sigma^2\sqrt{1-r^2}} \exp\left\{-\frac{x_1^2 + x_2^2 - 2rx_1x_2}{2\sigma^2(1-r^2)}\right\}$$

з коефіцієнтом кореляції $= 0,5$ та дисперсією $rW_0 = \sigma^2$.

Результати статистичного моделювання непараметричного тесту виявлення граду, отримані при різних значеннях ймовірності помилкової тривоги. У цьому випадку інформативним параметрам було надано фізичну інтерпретацію $x_1 = L_{DR}$ та $x_2 = Z_{dBZ}$

Звісно, параметричний алгоритм забезпечує вищу надійність виявлення. Надійність непараметричного алгоритму виявлення зростає зі збільшенням параметра, але на практиці навряд чи можна знайти ситуації, для яких це значення перевищує 0,5.

ТЕХНОЛОГІЧНІ ПІДХОДИ ДО ОЧИЩЕННЯ ҐРУНТІВ ВІД PFAS

*Пірімов Р. В., студент; Аблєєва І. Ю., доц. каф. ЕПТ,
Сумський державний університет, м. Суми*

Пер- та поліфторалкільні речовини (PFAS) є групою стійких органічних забруднювачів, які широко використовуються в промисловості завдяки своїм водо- та жиростійким властивостям. Через надзвичайну хімічну стабільність, зумовлену міцними зв'язками вуглець-фтор, ці сполуки фактично не розкладаються за природних умов. У результаті цього відбувається їх накопичення в ґрунтах, воді та біоті. PFAS також характеризуються високою мобільністю та здатністю до біоаккумуляції, що створює довготривалі екологічні та токсикологічні ризики, включаючи вплив на імунну, ендокринну та репродуктивну системи організмів [1].

Очищення ґрунтів від PFAS є складним завданням, що потребує використання спеціалізованих технологій. Одним із базових підходів є фізичне вилучення забрудненого ґрунту (excavation) з подальшою його утилізацією або обробкою поза місцем (ex situ). Хоча цей метод є ефективним у короткостроковій перспективі, він має високі витрати, пов'язані з транспортуванням і захороненням, а також створює ризик вторинного забруднення під час перевезення або зберігання [2]. Крім того, цей підхід не є сталим у довгостроковій перспективі через обмеженість полігонів для небезпечних відходів.

Серед фізико-хімічних методів широко застосовується сорбція з використанням активованого вугілля (зокрема гранульованого та порошкоподібного) або спеціалізованих іонообмінних смол. Ці матеріали здатні ефективно зв'язувати PFAS завдяки гідрофобним та електростатичним взаємодіям, зменшуючи їх мобільність у ґрунті та перешкоджаючи вимиванню у підземні води. Однак такі методи не руйнують забруднювачі, а лише концентрують їх, що потребує подальшої регенерації сорбентів або їх безпечної утилізації. Ефективність сорбції залежить від довжини вуглецевого ланцюга PFAS: довголанцюгові сполуки утримуються краще, ніж коротколанцюгові [3].

Термічні технології, зокрема високотемпературне спалювання (понад 1000 °C) або термодеструкція in situ, дозволяють руйнувати молекули PFAS шляхом розриву зв'язків C–F. Вони є одними з найбільш ефективних методів повного знищення цих речовин, проте для їх реалізації необхідні високі енергетичні затрати, що робить їх дорогавартісними. Додатковою проблемою є необхідність точного контролю процесу, оскільки при неповному згорянні можуть утворюватися токсичні побічні продукти, включаючи фторовані гази [3].

Інноваційним напрямком є застосування методів хімічного окиснення та відновлення, включаючи використання активованих персульфатів, фотокаталізу (наприклад, на основі діоксиду титану), плазмових технологій

та електрохімічних процесів. Ці методи спрямовані на генерацію високореактивних радикалів (наприклад, сульфат- або гідроксильних), які здатні руйнувати сильні вуглець-фторні зв'язки. Однак їх ефективність значною мірою залежить від складу ґрунту, рН, наявності органічної речовини та типу PFAS. Часто такі технології потребують комбінування з попереднім концентруванням забруднювачів [4].

Біоремедіація, яка активно використовується для інших органічних забруднювачів, наразі має обмежене застосування щодо PFAS через їхню біологічну інертність. Проте сучасні дослідження зосереджені на пошуку специфічних мікроорганізмів, ферментів або консорціумів, здатних до дефторування або трансформації окремих класів PFAS. Перспективним напрямом є також використання генетично модифікованих мікроорганізмів і ферментативних систем, хоча ці підходи поки досліджують в умовах експериментальних та лабораторних випробувань [4].

Окрему увагу привертають технології стабілізації ґрунтів (*in situ immobilization*), які передбачають внесення реагентів (наприклад, органо-мінеральних сумішей, біовугілля або спеціальних полімерів), що зменшують рухливість PFAS і перешкоджають їх потраплянню у ґрунтові води. Такий підхід є доцільним у випадках, коли повне видалення забруднення технічно або економічно неможливе. Водночас необхідно враховувати довготривалу стабільність таких систем і потенційні зміни умов середовища.

Таким чином, ефективне очищення ґрунтів від PFAS зазвичай потребує інтегрованого підходу з використанням кількох технологій з урахуванням типу ґрунту, рівня та складу забруднення, гідрогеологічних умов і економічних факторів. Сучасні тенденції розвитку спрямовані на створення більш екологічно безпечних, енергоефективних та економічно доцільних рішень, а також на розробку технологій, що забезпечують повне руйнування PFAS, а не лише їх перенесення між середовищами.

Список літератури

1. Buck, R. C., Franklin, J., Berger, U., Conder, J. M., Cousins, I. T., De Voogt, P., Jensen, A. A., Kannan, K., Mabury, S. A., & Van Leeuwen, S. P. (2011). Perfluoroalkyl and polyfluoroalkyl substances in the environment: Terminology, classification, and origins. *Integrated Environmental Assessment and Management*, 7(4), 513–541. <https://doi.org/10.1002/ieam.258>.
2. Interstate Technology & Regulatory Council (ITRC) (2020). PFAS Technical and Regulatory Guidance Document.
3. Ross, I., McDonough, J., Miles, J., Storch, P., Kochunaryanan, P. T., Kalve, E., Hurst, J., Dasgupta, S. S., & Burdick, J. (2018). A review of emerging technologies for remediation of PFASs. *Remediation Journal*, 28(2), 101–126.
4. Wang, Z., DeWitt, J. C., Higgins, C. P., & Cousins, I. T. (2017). A Never-Ending Story of per- and Polyfluoroalkyl Substances (PFASs)? *Environmental Science & Technology*, 51(5), 2508–2518. <https://doi.org/10.1021/acs.est.6b04806>.

УПРАВЛІННЯ ВІДХОДАМИ ТА ЇХ ВПЛИВ НА ЛАНДШАФТИ ЧЕРНІГІВЩИНИ

*Іваненко К. М., доцент, кафедра харчових технологій та екології,
НУ «Чернігівська політехніка», м. Чернігів*

На сьогодні в Чернігівській області, як і по всій Україні, домінуючим способом управління побутовими відходами залишається їх вивезення та захоронення на полігонах та сміттєзвалищах. Значний негативний вплив на об'єкти довкілля області здійснюють: промислові токсичні відходи, відходи, які утворилися в результаті реформування аграрного сектору економіки – непридатні та заборонені до використання хімічні засоби захисту рослин [1].

У більшості населених пунктів області функціонує унітарна (валова) система збору твердих побутових відходів, що унеможливило вилучення відходів, які мають ресурсну цінність безпосередньо на об'єктах їх утворення.

Чернігівська область має умовно чистий статус за забрудненням, але слабке управління відходами призводить до проблем: у 2024 році зібрано 242 тис. тонн відходів, а стихійні сміттєзвалища забруднюють ґрунти та повітря. За 4 роки екологічної карти зафіксовано 319 звернень про несанкціоновані звалища, переважно в Чернігові та прилеглих районах.

Загальна площа, яку займають полігони та звалища ТПВ в Чернігівській області, складає понад 575 гектарів.

Якщо аналізувати їх вплив на ландшафти області, то навіть попередні операції з відходами перед операціями з видалення, згідно кодів D1-D12, суттєво впливають на ландшафт. Так, серед інших проводиться розміщення на поверхні чи в землі, у тому числі захоронення тощо; оброблення ґрунтом, у тому числі біологічний розклад рідких або мулових відходів у ґрунті тощо; закачування на глибину, у тому числі закачування відходів відповідної консистенції у свердловини, соляні куполи або природні резервуари тощо; скидання на поверхню рідких і шламових (мулових) відходів тощо; захоронення на спеціально обладнаних полігонах, у тому числі захоронення у відокремлених секціях, закритих та ізольованих одна від одної та від навколишнього природного середовища, тощо. Тож будівництво нових об'єктів інфраструктури відновлення та видалення відходів дозволить знизити як негативний вплив на стан екосистем, так і безпосередньо ландшафтів області

Список літератури

1. Доповідь про стан навколишнього природного середовища в Чернігівській області за 2024 рік. -Чернігівська обласна державна адміністрація. Департамент екології та природних ресурсів, 2025.- 221 с. https://eco.cg.gov.ua/web_docs/2145/2016/03/docs/%20за%202024%20рік%20_2_025_09_02_14_40_30.pdf

ЦІННІСТЬ ЛАНДШАФТНОГО РІЗНОМАНІТТЯ І ПРІОРИТЕТИ ЩОДО ЙОГО ЗБЕРЕЖЕННЯ У ЗАПОВІДНИКУ «МИХАЙЛІВСЬКА ЦІЛИНА»

*Кривець А. А., студентка; Аблієва І. Ю., доц. каф. ЕПТ,
Сумський державний університет, м. Суми*

Серед актуальних екологічних проблем постає питання збереження цілісних ландшафтних комплексів, а не тільки їх компонентів. Ландшафтне різноманіття заповідника «Михайлівська цілина», яке змінюється протягом року від ранньої весни до пізньої осені, служить ключовою основою його природної стійкості [1]. Така організація природи зумовлює високу життєздатну екосистему, де принцип «різноманіття як основа стабільності» забезпечує оптимальні умови для існування виняткових лучних степів у межах лісостепової зони.

Відповідно до результатів дослідження розподілу біомаси, ландшафтні комплекси Заповідника відзначаються збалансованим співвідношенням надземної та підземної фракцій [1:1]. Висока продуктивність природних угруповань у сприятливих умовах показує, що вони мають майже природний характер. Існування в ландшафті луків та боліт мають ключове значення, проте пріоритетом залишається збереження саме цілинних лучних степів, тому головною задачею є раціональне використання території для запобігання деградації цих ділянок [2].

Для оцінки стану біогеоценозів, досліджували структуру біомаси та зміни різноманіття рослинних угруповань. Воно включало основні типи урочищ: від зволених боліт до посушливих тирсових степів [3]. Отримані результати показали, що збереження єдиного ландшафтного малюнка дозволяє підтримувати високу продуктивність системи, а також зберігати єдину в Україні напів природну ділянку лучних степів у лісостеповій ландшафтній смузі. На мою думку, майбутнє регулювання структури фітомаси є вкрай важливим, оскільки активне розростання чагарників та експансія інвазійних видів дерев загрожують первинному вигляду цілини, тому застосування біотехнічних заходів з видалення чагарників є важливим для відновлення природного балансу степу.

Список літератури

1. Гетьман В. І. Екологічні чинники продуктивності і біорізноманіття степових ландшафтних комплексів "Михайлівської цілини". Проблеми ландшафтного різноманіття України : Зб. наук. пр. Київ, 2000. 250 с.
2. Larionov M. S. The modern dangers for vegetation cover of the nature reserve "mykhailivska tsilyna". Population ecology of plants: current state, growth points. 2022. Vol. 2. P. 72–78.
3. Tkachenko V. S., Fitsailo T. V. Structural changes in phytosystems of meadow steppe of "mykhailivska tsilyna" reserve in XX and early XXI centuries. Visit biosferneho zapovidnyka «Askaniia Nova». 2016. No. 18. P. 34.

ВИЗНАЧЕННЯ РІВНЯ ВОЄННО-ТЕХНОГЕННОГО ЗАБРУДНЕННЯ РОДЮЧОГО ШАРУ ҐРУНТУ

*Качаловський А. С., аспірант; Ступаков В. С., аспірант; Вакал В. С.,
докторант, кафедра екології та природозахисних технологій,
Сумський державний університет, м. Суми*

Техногенне навантаження на довкілля від промислової діяльності людини у теперішній час додатково ускладнюється забрудненням ґрунтів внаслідок ведення бойових дій в Україні. Вибухи різних бойових засобів (ракет, бомб, артилерійських снарядів, мін тощо) несуть потенційну локальну і загальнодержавну загрозу, перш за все, сільському господарству. Закордонні й вітчизняні дослідження родючих шарів ґрунту з зони бойових конфліктів показують в ряді випадків значне підвищення вмісту важких металів та інших токсикантів [1]. Це, перш за все, Cd, Pb, Zn, Mn, Cu, Mo, Ni, B, As. Для оцінки екологічної небезпеки локального забруднення хімічним елементом ділянки ґрунту автором [1] запропоновано визначати фактор забруднення на основі індексів забруднення:

$$\Phi = \sqrt[n]{K_{Cd} \times K_{Pb} \times K_{As} \times K_{Zn} \times K_{Cu} \times K_n},$$

де: K – коефіцієнт перевищення місцевого контролю, як відношення концентрації забруднювача в ґрунті вирви до його значення у ґрунті на контрольній площадці; індекс коефіцієнта – окремий хімічний елемент.

Проведені нами дослідження показують, що водорозчинні форми токсикантів мають значно менше значення ніж його валовий вміст у ґрунті. Тому, не ігноруючи ролі важких металів у забрудненні довкілля, доцільно в початковий період відновлення порушених внаслідок військових дій, відновлювати сільськогосподарське виробництво орієнтуючись на вміст тільки водорозчинних форм токсичних речовин. А також розраховувати індекси забруднення як відношення водорозчинних форм токсичних речовин до ГДК. Даний висновок підтверджується результатами тестових досліджень. Але потребує проведення окремих додаткових вегетаційних дослідів з визначенням впливу рН ґрунту на рухомість важких металів в широкому діапазоні його значень, що характерно для мінеральних і органічних добрив. Окремі дослідження з визначення впливу родючості ґрунту та вмісту органічного вуглецю в ньому на перехід важких металів у рослини дозволять уточнити безпечність вирощеної сільськогосподарської продукції.

Список літератури:

1. Михайлюк В. І. Хімічний склад ґрунтів вирв у зонах вибухів мін і снарядів: оцінка воєнно-техногенного забруднення. *Вісник ОНУ. Сер.: Географічні та геологічні науки*. 2025. Т. 30, 1(46). С. 32.

ЕКОЛОГІЧНІ РИЗИКИ МІГРАЦІЇ PFAS ІЗ ҐРУНТІВ У РОСЛИННІ ОРГАНІЗМИ

*Карташева Д. М., студентка; Аблєєва І. Ю., доц. каф. ЕПТ,
Сумський державний університет, м. Суми*

Пер- та поліфторалкільні речовини (PFAS) – широкий клас синтетичних органічних сполук, що налічує понад 12000 структурних аналогів. Завдяки надзвичайно міцному зв'язку С–F вони набули широкого застосування у виробництві антипригарного покриття, вогнегасних пін, текстилю та медичних виробів [1, 2]. Водночас висока хімічна стабільність зумовлює їх стійке накопичення у довкіллі, що дало підставу відносити PFAS до так званих «вічних хімікатів». Особливої актуальності набуває питання їх міграції із забруднених ґрунтів у рослини – потенційного початкового ланцюга харчового шляху для людини та тварин.

Повномасштабне вторгнення росії в Україну з лютого 2022 року суттєво загостило проблему PFAS-забруднення ґрунтів на значних площах сільськогосподарських угідь. Використання авіаційних вогнегасних пін на основі AFFF, руйнування промислових об'єктів і нафтопереробних підприємств, а також забруднення від спаленої техніки призводять до локального, а подекуди й регіонального поширення PFAS у ґрунтовому покриві. За попередніми оцінками, постраждало щонайменше 5 млн га орних земель, причому повноцінний моніторинг залишається ускладненим через бойові дії. Це створює серйозний ризик акумуляції «вічних хімікатів» у сільськогосподарських культурах і подальшого їх надходження у харчовий ланцюг місцевого населення в повоєнний період [4].

Основним шляхом поглинання PFAS рослинними організмами є пасивне та активне кореневе засвоєння з ґрунтового розчину. Визначальну роль відіграє коефіцієнт розподілу ґрунт–вода (K_d): коротколанцюгові сполуки (C4–C7) характеризуються нижчою сорбційною здатністю щодо органічної речовини ґрунту й тому залишаються більш мобільними у ґрунтовому профілі. Встановлено, що транслокаційний фактор – відношення концентрації PFAS у надземній частині рослини до концентрації у коренях – суттєво варіює залежно від виду культури, хімічної структури сполуки та рН ґрунту [1, 2]. Так, для перфтороктанової кислоти (PFOA) і перфтороктансульфонової кислоти (PFOS) в умовах нейтрального середовища він може становити 0,1–0,8, тоді як для перфторбутанової кислоти (PFBA) і перфторгексанової кислоти (PFHxA) перевищувати 1,0, що свідчить про активний транспорт цих сполук до листків і плодів [1, 2].

Значний вплив на біодоступність PFAS має вміст органічного вуглецю (TOC) і глинистих фракцій у ґрунті: зростання цих показників знижує рухливість довголанцюгових кислот. Натомість лужне середовище прискорює мобілізацію аніонних форм PFAS, зменшуючи їх адсорбцію [2, 3].

Певну роль відіграє також мікробіота ризосфери, здатна змінювати форму існування сполук і опосередковано впливати на їх засвоєння.

Фітоакумуляція PFAS формує кілька взаємопов'язаних ризиків: забруднені рослини стають джерелом надходження токсикантів до організму людини, рослинна біомаса слугує вектором їх перенесення у трофічних ланцюгах – від фітофагів до вищих споживачів, підсилюючи ефект біомагніфікації, а накопичення PFAS у ґрунтовій мікробіоті гальмує природні процеси деструкції органіки [3]. Перфторовані кислоти виявляють фітотоксичний ефект за концентрацій вище 10–50 мкг/кг сухої маси ґрунту, пригнічуючи проростання насіння, фотосинтетичну активність і мінеральне живлення культур [2]. Принципово, що традиційні агротехнічні заходи – вапнування, промивання ґрунту, ротація культур – лише перерозподіляють PFAS між компонентами агроєкосистеми, не руйнуючи їх, що вимагає якісно інших підходів до управління ризиком [3].

Міграція PFAS із ґрунтів у рослинні організми є комплексним процесом, що визначається фізико-хімічними властивостями сполук, характеристиками ґрунтового середовища та біологічними особливостями рослин, і саме сукупність цих чинників формує ступінь екологічного ризику для агроєкосистем і здоров'я населення. З огляду на масштаби забруднення внаслідок воєнних дій в Україні, розроблення комплексного моніторингу PFAS у ґрунтово-рослинному покриві постраждалих регіонів є пріоритетним завданням повоєнної екологічної відбудови, а застосування біочару та активованого вугілля як ґрунтових а мелорантів – одним із найперспективніших інструментів його практичної реалізації.

Список літератури

1. Blaine, A. C., Rich, C. D., Hundal, L. S., Lau, C., Mills, M. A., Harris, K. M., & Higgins, C. P. (2013). Uptake of Perfluoroalkyl Acids into Edible Crops via Land Applied Biosolids: Field and Greenhouse Studies. *Environmental Science & Technology*, 47(24), 14062–14069. <https://doi.org/10.1021/es403094q>
2. Ghisi, R., Vamerali, T., & Manzetti, S. (2018). Accumulation of perfluorinated alkyl substances (PFAS) in agricultural plants: A review. *Environmental Research*, 169, 326–341. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2018.10.023>
3. Islam, M. A., Parvin, M. I., Nguyen, C., Alam, M. R., Kwong, P., Zhou, J. L., Hessel, V., & Ahmed, M. B. (2025). Per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) contamination in agriculture and its potential conflict with circular economy. *Environmental Pollution*, 385, 127036. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2025.127036>
4. Koban, L. A., & Pfluger, A. R. (2022). Per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) exposure through munitions in the Russia–Ukraine conflict. *Integrated Environmental Assessment and Management*, 19(2), 376–381. <https://doi.org/10.1002/ieam.4672>

ЗАСТОСУВАННЯ АЕРАЦІЇ УЛЬТРАТОНКИМИ БУЛЬБАШКАМИ ДЛЯ ІНТЕНСИФІКАЦІЇ ПРОЦЕСУ БІОЛОГІЧНОГО ОЧИЩЕННЯ СТІЧНИХ ВОД

*Гуденець В. М., аспірант; Пляцук Л. Д., зав. каф. ЕПТ,
Сумський державний університет, м. Суми*

Аерація є критично важливим процесом у біологічному очищенні стічних вод, проте традиційні методи часто мають низьку ефективність переносу кисню. Для вирішення задач з водопідготовки та очищення води протягом останніх років активно досліджуються, впроваджуються та застосовуються методи (технології) насичення води та інших рідин бульбашками субмікронного розміру (повітря, кисню чи інших газів).

В наукових оглядах, статтях та звітах такі бульбашки в рідині спочатку отримали назву «нанобульбашки» (Nanobubbles) або «об'ємні нанобульбашками» (Bulk Nanobubbles), а після затвердження міжнародного стандарту ISO 20480-1:2017 їх також почали називати «ультратонкими бульбашками» (Ultrafine Bubbles). В стандарті зазначено, що бульбашки діаметром менше 1 мкм слід називати «ультратонкими бульбашками». Крім того, бульбашки діаметром від 1 до 100 мкм називаються мікробульбашками. Мікробульбашки у воді виглядають каламутними, як молоко, тоді як ультратонкі бульбашки прозорі, оскільки вони не розсіюють видиме світло [1].

Технології створення нанобульбашок досліджуються та впроваджуються відносно недавно, проте вже є багато досліджень та звітів щодо їх властивостей, методів генерування та перспективного впровадження в різних галузях діяльності. Зокрема в огляді «Основи та застосування нанобульбашок» [2] розглянуто сучасні методи, що використовуються для створення нанобульбашок, а також напрямки їх застосування: медичний/біомедичний, сільськогосподарський та природоохоронний, зокрема впровадження у системах очищення води та стічних вод.

Таким чином, на сьогодні достатньо актуальними є дослідження щодо особливостей застосування аерації ультратонкими бульбашками для інтенсифікації процесу біологічного очищення стоків різного походження, зокрема, дослідження способів та режимів аерації, швидкості переносу кисню, взаємодії бульбашок з мікроорганізмами та впливу на якість активного мулу, енергоефективності та експлуатаційній доцільності.

Список літератури

1. Keiji Yasuda. Characteristics of Ultrafine Bubbles (Bulk Nanobubbles) and Their Application to Particle-Related Technology: KONA Powder and Particle Journal, 25 March 2023. DOI: 10.14356/kona.2024004
2. Anastasios W.Foudas, Ramonna I.Kosheleva, Evangelos P.Favvas, Margaritis Kostoglou, Athanasios C.Mitropoulos, George Z.Kyzas. Fundamentals and applications of nanobubbles: A review. November 2022 Chemical Engineering Research and Design 189(4). DOI: 10.1016/j.cherd.2022.11.013

Наукове видання

СУЧАСНІ ТЕХНОЛОГІЇ У ПРОМИСЛОВОМУ ВИРОБНИЦТВІ

МАТЕРІАЛИ

**ХІІІ Всеукраїнської
науково-технічної конференції
(м. Суми, 21–24 квітня 2026 р.)**

**Відповідальний за випуск О. Г. Гусак
Комп'ютерне верстання: М. В. Муштай, І. В. Павленко
Обкладинка: М. В. Муштай**

Стиль та орфографія авторів збережені.

Формат 60×84/16. Ум. друк. арк. 14,85. Обл. вид. арк. 18,25.

Видавець і виготовлювач

**Сумський державний університет,
вул. Харківська, 116, м. Суми, 40007, Україна.**

**Свідоцтво про внесення суб'єкта господарювання до Державного реєстру видавців,
виготовлювачів та розповсюджувачів видавничої продукції ДК № 8193 від 15.10.2024.**