

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

А. Я. Карвацький

ІНЖИНІРИНГ ІННОВАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ТА ОБЛАДНАННЯ

КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ З НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ

*Рекомендовано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
як навчальний посібник для студентів,
які навчаються за спеціальністю 131 «Прикладна механіка»,
спеціалізацією «Інжиніринг паковань та пакувального обладнання»*

Електронне мережне навчальне видання

Київ
КПІ ім. Ігоря Сікорського
2022

Рецензент: *Коржик М. В., к-т техн. наук, доц.*

Відповідальний редактор *Мікульонок І. О., д-р техн. наук, проф., с.н.с.*

*Гриф надано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського (протокол № 3 від 01.12.2022 р.)
за поданням Вченої ради інженерно-хімічного факультету (протокол № 10 від 27.10.2022 р.)*

Електронне мережне навчальне видання

Карвацький Антон Янович, д-р техн. наук, проф., с.н.с.

ІНЖИНІРИНГ ІННОВАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ТА ОБЛАДНАННЯ

Конспект лекцій з навчальної дисципліни

Інжиніринг інноваційних технологій та обладнання. Конспект лекцій з навчальної дисципліни [Електронний ресурс] : навч. посіб. для здобувачів ступеня магістра за спеціальністю 131 Прикладна механіка / укладач А. Я. Карвацький ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл: 6,28 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 180 с.

Подано загальні відомості про інжиніринг інноваційних технологій та обладнання, світові тенденції розвитку інжинірингу, типи та етапи інноваційних процесів, життєвий цикл продукції, планування інноваційної діяльності, принципи оцінки інноваційних проєктів та ризики їх реалізації. Розглянуто різні математичні моделі фізичних полів технологічних процесів та обладнання, що включають: стаціонарні і нестаціонарні задачі термомеханіки, багатодисциплінарні моделі, математичні моделі задач течії ньютонівської та неньютонівської рідини, математичні моделі дискретного опису руху сипкого матеріалу тощо. Наведено приклади практичного застосування методів інжинірингу інноваційних технологій та обладнання в промисловості.

Для студентів вищих навчальних закладів, які навчаються за спеціальністю «Прикладна механіка» та інших споріднених спеціальностей: машинобудування, будівельної та нафтопереробної галузей промисловості.

© А. Я. Карвацький, 2022

© КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022

ЗМІСТ

ОСНОВНІ ПОЗНАЧЕННЯ ТА СКОРОЧЕННЯ	7
ВСТУП	14
РОЗДІЛ 1 ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО ІНЖИНІРИНГ ІННОВАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ТА ОБЛАДНАННЯ	16
ТЕМА 1 МЕТА І ЗАВДАННЯ ДИСЦИПЛІНИ. БАЗОВІ ВИЗНАЧЕННЯ	16
Лекція 1.1(1) Мета і завдання дисципліни. Поняття інновації, інжинірингу та його видів. Розвиток міжнародного інжинірингу. Світові тенденції розвитку інжинірингу. Роль України на світовому ринку інжинірингових послуг	16
ТЕМА 2 ІННОВАЦІЇ	22
Лекція 2.1(2) Зміст, типи та етапи інноваційних процесів. Технічні, організаційні, інформаційні, соціальні, економічні аспекти інновації. Життєвий цикл продукції. Фактори формування адекватного розуміння потреб замовника. Стейкхолдери.	22
ТЕМА 3 ВИБІР НАПРЯМКУ ІННОВАЦІЙ	32
Лекція 3.1(3) Стратегія та вибір шляхів інноваційної діяльності. Планування інноваційної діяльності підприємства. Інноваційна політика і сталий розвиток підприємства. Питання Internet технологій.	32
ТЕМА 4 ІННОВАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ	40
Лекція 4.1(4) Скорочення тривалості виробничого циклу. Проектування нових видів продукції та обладнання для їх виготовлення. Принципи оцінки інноваційних проєктів. Теорія інноваційних процесів. Ризики інноваційних проєктів	40
РОЗДІЛ 2 НАУКОЄМНИЙ КОМП'ЮТЕРНИЙ ІНЖИНІРИНГ ЯК ОСНОВА СУЧАСНОГО ІНЖИНІРИНГУ ІННОВАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ТА ОБЛАДНАННЯ	58

ТЕМА 1 МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ФІЗИЧНИХ ПРОЦЕСІВ ТА ОБЛАДНАННЯ – ФУНДАМЕНТАЛЬНА ОСНОВА НАУКОЄМНОГО КОМП'ЮТЕРНОГО ІНЖИНІРИНГУ.	58
Лекція 1.1(5) Постановки задач стаціонарної теплопровідності і статичної пружності. Постановка задачі нестационарної теплопровідності. Постановка задачі динамічної пружності з врахуванням великих деформацій та контактної взаємодії механічної природи.	58
Лекція 1.2(6) Постановка нелінійної нестационарної термоелектричної задачі. Постановка зв'язаної нелінійної задачі термopужності	65
Лекція 1.3(7) Постановка задачі тепло-гідродинаміки під час ламінарної течії нестисливої ньютонівської рідини. Постановка задачі тепло-гідродинаміки під час турбулентної течії нестисливої ньютонівської рідини на базі стандартної моделі	70
Лекція 1.4(8) Фізичні рівняння для неньютонівської рідини. Моделі дилатантних (комполитних) речовин. Постановка задачі тепло-гідродинамічного стану рідини типу Bingham-Rapanastasiou. Математична модель процесу просочення поруватих середовищ	76
Лекція 1.5(9) Постановка задачі рухомого шару сипкого матеріалу. Математична постановка задачі для теоретичних досліджень ефективних теплофізичних властивостей сипких матеріалів. Алгоритм розв'язання задачі теоретичного визначення теплофізичних властивостей сипких матеріалів .	85
Лекція 1.6(10) Математична постановка задачі ізотермічного змішування двох потоків неньютонівської рідини. Математична постановка континуально-дискретної задачі неізотермічної двофазної течії (рідина – тверді частинки) . . .	91
Лекція 1.7(11) Математичне формулювання задач багатофазних потоків на базі моделей VOF і Ейлера	96
Лекція 1.8(12) Математичне формулювання задачі газифікації вуглецевмісного матеріалу на базі DPM для суміші реагуючих газів із врахуванням турбулентного режиму течії. Глобальні гетерогенні (поверхневі) та гомогенні (об'ємні) реакції	105

ТЕМА 2 ПРОГРАМНІ ПРОДУКТИ ЯК ЗАСОБИ ДЛЯ РЕАЛІЗАЦІЇ МЕТОДІВ НАУКОЄМНОГО КОМП'ЮТЕРНОГО ІНЖИНІРИНГУ В ПРАКТИЦІ РОЗРОБОК ІННОВАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ТА ОБЛАДНАННЯ.....	110
Лекція 2.1 (13) Програмні продукти ANSYS Workbench, склад, область застосування. Програмний код LIGGGHTS – LAMMPS Improved for General Granular and Granular Heat Transfer Simulations, характеристика, область застосування. Програмний код ParaView – An open-source, multi-platform data analysis and visualization application, характеристика, область застосування.	110
Лекція 2.2 (14) Приклади використання програмних продуктів Solidworks, ANSYS Workbench, LIGGGHTS, ParaView	115
РОЗДІЛ 3 ПРИКЛАДИ ПРАКТИЧНОГО ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДІВ ІНЖИНІРИНГУ ІННОВАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ТА ОБЛАДНАННЯ В ПРОМИСЛОВOSTІ	131
ТЕМА 1 РОЗРОБКА ІННОВАЦІЙНИХ КОНСТРУКЦІЙ ТА ТЕХНОЛОГІЧНИХ РЕГЛАМЕНТІВ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ЕЛЕКТРОКАЛЬЦИНАТОРІВ ДЛЯ ПРОЖАРЮВАННЯ АНТРАЦИТУ ТА НАФТОВОГО КОКСУ	131
Лекція 1.1 (15) Інноваційні конструкції та технологічні регламенти експлуатації електрокальцинаторів для прожарювання антрациту та нафтового коксу.	131
ТЕМА 2 РОЗРОБКА ІННОВАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЧНИХ РЕГЛАМЕНТІВ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ТА ОБЛАДНАННЯ ОБЕРТОВИХ ПЕЧЕЙ ДЛЯ ПРОЖАРЮВАННЯ АНТРАЦИТУ ТА НАФТОВОГО КОКСУ	145
Лекція 2.1 (16) Інноваційні технологічні регламенти експлуатації та обладнання обертових печей для прожарювання антрациту та нафтового коксу	145
ТЕМА 3 РОЗРОБКА ІННОВАЦІЙНИХ КОНСТРУКЦІЙ ТА ТЕХНОЛОГІЧНИХ РЕГЛАМЕНТІВ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ПЕЧЕЙ РІДГАМЕРА ДЛЯ ВИПАЛЮВАННЯ ВУГЛЕГРАФІТОВИХ ЕЛЕКТРОДНИХ ВИРОБІВ ...	152
Лекція 3.1 (17) Інноваційні конструкції та технологічні регламенти експлуатації печей Рідгамера для випалювання вуглеграфітових електродних виробів	152

ТЕМА 4 РОЗРОБКА ІННОВАЦІЙНОГО ОБЛАДНАННЯ ТА ТЕХНОЛОГІЧНИХ РЕГЛАМЕНТІВ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ПЕЧЕЙ КАСТНЕРА ДЛЯ ГРАФІТУВАННЯ ЕЛЕКТРОДНИХ ВИРОБІВ	163
Лекція 4.1 (18) Інноваційне обладнання та технологічні регламенти експлуатації печей Кастнера для графітування електродних виробів	163
СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	170
ДОДАТОК А Питання для самоконтролю	173

ОСНОВНІ ПОЗНАЧЕННЯ ТА СКОРОЧЕННЯ

Основні позначення

A_{fs} –	поверхня контакту m^2 ;
b –	джерельний член;
$\mathbf{b}$ –	вектор масових сил, наприклад, гравітаційних, Н/кг; вектор масової сили частинки, Н/кг;
c_p –	масова ізобарна теплоємність, Дж/(кг·К);
c_p^f –	масова ізобарна теплоємність рідкої фази, Дж/(кг·К);
c_v –	масова ізохорна теплоємність, Дж/(кг·К);
$\hat{\mathbf{C}}^4$ –	тензор 4-го рангу пружності, Па;
C_v –	об'ємна ізохорна теплоємність середовища, Дж/($m^3 \cdot K$);
$C_{\varepsilon 1}, C_{\varepsilon 2}, C_\mu$ –	коефіцієнти $k - \varepsilon$ моделі турбулентності;
$\hat{\mathbf{D}}$ –	тензор швидкості деформації, s^{-1} ;
e_{ij} –	коефіцієнт реституції між матеріалами частинок i та j ;
$\mathbf{e}_i, \mathbf{e}^k$ –	коваріантний і контраваріантний векторний базис (векторний супровід тензорів), відповідно;
E –	модуль пружності під час одновісного розтягу/стискання, Па;
E^* –	ефективний модуль пружності, Па;
E_a –	енергія активації течії, Дж/моль;
$\tilde{E}$ –	повна масова енергія, осереднена за Favre, Дж/кг;
f –	коефіцієнт сухого тертя;
$\mathbf{f}$ –	вектор об'ємних сил, наприклад, гравітаційних, Па/м;
F_s –	запас міцності;
$\mathbf{F}_P$ –	вектор зовнішньої сили в точці P , Н;
$\mathbf{F}_{ij}$ –	зовнішня сила, що діє на частинку i через контакт з частинкою j , Н;
$\mathbf{F}_{n,ij}, \mathbf{F}_{t,ij}$ –	нормальна і тангенціальна складові сили взаємодії між частинками, Н;
$\mathbf{F}$ –	вектор масових сил, Н/кг;
g^m –	компоненти вектора прискорення вільного падіння, m/s^2 ;
$\hat{\mathbf{g}}$ –	метричний тензор другого рангу; вектор прискорення вільного падіння, m/s^2 ;
G –	модуль зсуву, Па;

G^* –	ефективний модуль зсуву, Па;
h –	явна об’ємна ентальпія, Дж/м ³ ;
h_f –	явна або неізотермічна масова ентальпія рідини, Дж/кг;
i –	індекс частинки, відносно якої розглядається система рівнянь (14.1);
I_i –	момент інерції, кг·м ² ;
$\hat{\mathbf{I}}$ –	одиничний тензор другого рангу;
j –	індекс частинок, що перебувають у контакті з частинкою i ;
j_n –	нормальна складова вектора густини електричного струму, А/м ² ;
k –	турбулентна кінетична енергія, Дж/кг; величина середньої в’язкості рідини, Па·с; кількість частинок в контакті з частинкою i ;
k_n –	коефіцієнт пружності за нормальної контактної взаємодії, Н/м;
k_t –	коефіцієнт зсуву під час контактної взаємодії, Н/м;
K, n –	коефіцієнти моделі Herschel-Bulkley;
$\hat{\mathbf{K}} = \gamma \hat{\mathbf{I}}$ –	тензор поруватості середовища другого рангу;
m –	експоненціальний множник в рівня. (13.25), с.
$\mathbf{M}_{ij}$ –	момент опору коченню, Н·м;
n –	показник ступеня, який визначає клас рідини; загальна кількість частинок у системі;
$\mathbf{n}$ –	вектор зовнішньої нормалі до поверхні тіла;
p –	зовнішній гідростатичний тиск, Па;
$\bar{p}$ –	тиск, осереднений за Reynolds, Па;
$\mathbf{p} = p^i \mathbf{e}_i$ –	вектор напруження, що діє на поверхні середовища, Па;
$\mathbf{q}$ –	вектор густини теплового потоку, Вт/м ² ;
q_v –	об’ємна густина внутрішнього джерела теплоти неелектричної природи, Вт/м ³ ;
Q_{fs} –	об’ємна густина теплового потоку між фазами через поверхню їх контакту A_{fs} , Вт/м ³ ;
R –	газова стала, Дж/(моль·К);
R^* –	приведений радіус частинок, м;
S_u –	поверхня (або точка поверхні), на якій задано переміщення, м ² ;
S_{su} –	поверхня симетрії тіла, м ² ;

S_M –	вектор джерельного члену, що впливає на рух рідини завдяки гравітації і гідравлічного опору поруватого середовища $\hat{\mathbf{R}}$ (кг/(м ² ·с)) у вигляді складової $\mathbf{U} \cdot \hat{\mathbf{R}}$ (тензор $\hat{\mathbf{R}}$ є коефіцієнтом пропорційності в оберненому вигляді в законі фільтрації Дарсі – $\mathbf{U} = -\hat{\mathbf{R}}^{-1} \nabla p$), Н/м ³ ;
S_f, S_s –	векторні джерельні члени – об'ємна густина теплоти для рідини та твердої фази поруватого середовища, відповідно, Вт/м ³ ;
t –	час, с;
$\mathbf{t} = \frac{\mathbf{v}_t}{ \mathbf{v}_t }$ –	одиничний тангенціальний вектор;
T –	температура, К;
T_a –	абсолютна температура активації, К;
T_{ref} –	абсолютна температура відліку, К;
T_f, T_s –	абсолютна температура рідкої та твердої фаз, відповідно, К;
T_∞ –	абсолютна температура оточуючого середовища, К;
$\tilde{T}$ –	абсолютна температура, осереднена за Favre, К;
$\mathbf{T}_{ij}$ –	зовнішній крутний момент, пов'язаний з контактною взаємодією частинок i та j , Н·м;
u –	деякий потенціал;
$\mathbf{u}$ –	вектор переміщень, м;
U –	електричний потенціал, В;
$\mathbf{U}$ –	вектор швидкості потоку рідини, м/с;
$\mathbf{v} = v^i \mathbf{e}_i$ –	вектор швидкості $\left(\mathbf{v} = \frac{d\mathbf{u}}{dt} \right)$, м/с;
$\dot{\mathbf{v}} = \frac{d\mathbf{v}}{dt}$ –	вектор прискорення, м/с ² ;
$\tilde{\mathbf{v}}$ –	вектор швидкості, осереднений за Favre, м/с;
$\mathbf{v}_i$ –	вектор лінійної швидкості центра маси частинки, м/с;
$\mathbf{v}_{ij}$ –	відносна швидкість у точці контакту частинок, м/с;
$\mathbf{v}_n$ –	нормальна складова $\mathbf{v}_{ij}$;
$\mathbf{v}_t$ –	тангенціальна складова $\mathbf{v}_{ij}$;
V –	об'єм поруватого середовища, в якому враховується об'єми твердої фази та пор, м ³ ; об'єм, м ³ ;
V' –	об'єм пор поруватого середовища, м ³ ;
$x_i, i = 1, 2, 3$ –	декартові координати, м;

x, y, z –	декартові координати, м;
$\mathbf{x}$ –	радіус-вектор декартової системи координат (при $i = 1, 2$ маємо двовимірну систему координат (x^1, x^2) , а при $i = 1, 2, 3$ – тривимірну (x^1, x^2, x^3)), м;
α –	коефіцієнт тепловіддачі, Вт/(м ² ·К); коефіцієнт лінійного температурного розширення матеріалу, К ⁻¹ ; кут конусності, рад;
α_k –	динамічний кут природного укосу сипучого матеріалу, рад;
β –	коефіцієнт лінійного температурного розширення середовища, К ⁻¹ ; безрозмірний коефіцієнт демпфування;
χ –	коефіцієнт електропровідності, См/м;
δ –	символ Кронекера; початковий зазор у напрямку нормалі до поверхонь, що контактують, м;
ΔS_p –	елементарна площадка поверхні тіла в околі точки P , м ² ;
ε –	швидкість дисипації турбулентної кінетичної енергії, Дж/(кг·с);
$\hat{\mathbf{\varepsilon}}$ –	симетричний тензор другого рангу пружних деформацій;
$\hat{\mathbf{\varepsilon}}^e$ –	тензор малих пружних деформацій;
$\hat{\mathbf{\varepsilon}}^T$ –	тензор температурних деформацій;
$\dot{\hat{\mathbf{\varepsilon}}}$ –	тензор швидкості деформацій 2-го рангу, с ⁻¹ ;
γ –	поруватість твердого середовища або об'ємна частка пор; зсувна відносна деформація;
γ_n –	коефіцієнт демпфування в нормальному напрямі до поверхні контакту, кг/с;
γ_t –	коефіцієнт демпфування у тангенціальному напрямі до поверхні контакту, кг/с;
$\gamma_s = 1 - \gamma$ –	частка твердої фази в поруватому середовищі;
$\dot{\gamma}$ –	другий інваріант від $\hat{\mathbf{D}}$, с ⁻¹ ;
$ \dot{\gamma} $ –	другий інваріант від $\overline{\dot{\gamma}}$, с ⁻¹ ;
$\overline{\dot{\gamma}}$ –	швидкість деформації, с ⁻¹ ;
$\Gamma_{II}, \Gamma_{III}, \Gamma_{III}$ –	границі, на яких задано граничні умови першого, другого і третього родів для рівняння теплопровідності, відповідно;
$\Gamma_{UI}, \Gamma_{UII}$ –	границі, на яких задано граничні умови з потенціалу і густини струму для рівняння електропровідності, відповідно;

$\eta(\dot{\gamma})$ –	ефективна в'язкість рідини як функція другого інваріанта $\dot{\gamma}$ від $\dot{D}$, Па·с;
φ –	кут внутрішнього тертя або кут природного укусу, рад;
$\varphi_u(\mathbf{x})$ –	функція розподілу електричного потенціалу в Ω у початковий момент часу;
$\varphi_T(\mathbf{x})$ –	функція розподілу температури в Ω у початковий момент часу;
λ –	коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м·К); коефіцієнт Ламе, Па; коефіцієнт гідравлічного тертя;
λ_{eff} –	ефективний коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м·К);
λ_e^f –	ефективний коефіцієнт теплопровідності рідини, Вт/(м·К);
μ –	коефіцієнт Ламе, Па; коефіцієнт динамічної в'язкості, Па·с;
μ_{eff} –	ефективний коефіцієнт динамічної в'язкості, Па·с;
μ_r –	коефіцієнт тертя кочення;
μ_s –	коефіцієнт тертя ковзання;
μ_t –	коефіцієнт турбулентної в'язкості, Па·с;
ν –	коефіцієнт Пуассона; коефіцієнт кінематичної в'язкості, м ² /с;
π –	число Пі;
ρ –	густина, кг/м ³ ; об'ємна (насипна) густина, кг/м ³ ;
$\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$ –	компоненти вектора головних напружень, Па;
$\boldsymbol{\sigma}^{(n)}$ –	напруження в нормальному напрямку до поверхні контакту (вектор напруження), Па;
σ_n –	нормальне напруження на поверхні контакту, Па;
σ_τ –	тангенціальна складова напруження, Па;
σ_{eqvM} –	еквівалентне напруження за Мізесом, Па;
$[\sigma_T]$ –	границя текучості матеріалу, Па;
$\hat{\boldsymbol{\sigma}}$ –	симетричний тензор напруження другого рангу, Па;
$\sigma_k, \sigma_\varepsilon$ –	коефіцієнти $k - \varepsilon$ моделі турбулентності;
τ_0 –	початкове напруження зсуву, Па;
τ_{shear} –	критичне зсувне напруження (статичне напруження зсуву), Па;
$\bar{\boldsymbol{\tau}}_{eff}$ –	тензор 2-го рангу ефективних зсувних напружень, Па;
$\hat{\boldsymbol{\tau}}$ –	тензором в'язких напружень другого рангу, Па;
$\bar{\boldsymbol{\tau}}$ –	тензор напруження зсуву, Па;
$ \boldsymbol{\tau} $ –	другий інваріант від $\bar{\boldsymbol{\tau}}$, Па;

ω_i –	вектор кутової швидкості, рад/с;
Ω –	розрахункова область;
$\Omega \in R^3$ –	тривимірна розрахункова область;
ξ_n –	відносне нормальне перекриття частинок під час контактної взаємодії, м;
ξ_t –	відносне тангенціальне перекриття частинок, що почалось в момент часу τ_0 і продовжується до даного моменту часу τ , м.

Інші символи

«+» і «-» –	означає ліворуч і праворуч від поверхні контакту;
Δ –	оператор Лапласа;
∇ –	оператор Гамільтона (оператор градієнта), «набла»;
$\vec{\nabla} = \mathbf{e}^s \frac{\partial}{\partial x^s}$ –	оператор Гамільтона, м ⁻¹ ;
$(\cdot)$ –	оператор скалярного добутку векторів;
$(:)$ –	оператор подвійного скалярного добутку тензорів;
$\otimes$ –	оператор векторного добутку;
Pr_t –	турбулентне число Prandtl;
Re –	число Рейнольдса.

Основні індекси

0 –	відноситься до початкового значення;
b –	відноситься до границі тіла;
eff –	відноситься до ефективного значення;
f –	відноситься до рідини;
inlet, $inlet$ –	відноситься до вхідного перетину каналу;
n –	відноситься до нормальної складової;
outlet, $outlet$ –	відноситься до відхідного перетину каналу;
p –	відноситься до оточуючого середовища;
s –	відноситься до твердого тіла;
t –	відноситься до турбулентного стану рідини;
wall –	відноситься до стінки.

Основні скорочення

CAD –	Computer-Aided Design – Система автоматизованого проектування (САПР);
CAE –	Computer-aided engineering – загальна назва для програмних продуктів, призначених для розв'язання різних інженерних задач.

CFD–	Computational Fluid Dynamics – обчислювальна гідродинаміка;
DPM –	Discrete Phase Models;
FEA–	Finite Element Analysis;
RANS –	Reynolds averaged Navier-Stokes equations;
SIMPLE–	Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations – напівнеявний метод розв’язку рівнянь, які зв’язують тиск;
VOF –	Volume of Fluid;
VTK –	Visualization Toolkit;
ГУ –	граничні умови;
ДКР –	дослідно-конструкторська робота;
ЕВ –	електродні вироби;
ЕКП –	електроконтактна прокладка;
МСЕ –	метод скінченних елементів;
МСО –	метод скінчених об’ємів;
НДР –	науково-дослідна робота;
НДДКР–	науково-дослідна дослідно-конструкторська робота;
НДС–	напружено-деформований стан;
ПВЕ –	питомі витрати енергії;
ПЕО –	питомий електричний опір;
СГО –	стратегічна господарська одиниця;
ТЗ –	технічне завдання;
ТНК –	транснаціональна корпорація;
ТПВ –	технологічна підготовка виробництва.

ВСТУП

Дисципліна «Освітній компонент 3Ф-Каталог. Інжиніринг інноваційних технологій та обладнання» є найважливішою ланкою навчального процесу, яка об'єднує в логічно єдину систему фундаментальні та загально-інженерні дисципліни, методи та засоби наукоємного комп'ютерного інжинірингу з інноваційною діяльністю, носить практичне спрямування при підготовці фахівців вищої кваліфікації, що спеціалізуються в галузі інженерної механіки.

Наукоємний комп'ютерний інжиніринг – передбачає визначення працездатності та конкурентоспроможності об'єкту розробки як на етапі проектування, так і на протязі його життєвого циклу, за допомогою використання сучасних CAD-систем та обчислювальних програмних продуктів для числового аналізу його фізичних полів.

Предмет навчальної дисципліни «Інжиніринг інноваційних технологій та обладнання» – методологія інноваційної діяльності, методи та засоби наукоємного комп'ютерного інжинірингу в практиці розробок інноваційних технологій та обладнання.

Вивчення дисципліни дає можливість студентам навчитися сучасним методам проектування і виконання теоретичних досліджень процесів та обладнання для розробок інноваційних технологій з використанням сучасних CAD-CAE-систем.

Метою навчальної дисципліни є посилення процесу формування комплексу знань у студентів щодо методології інноваційної діяльності, методів та засобів наукоємного комп'ютерного інжинірингу в практиці розробок інноваційних технологій та обладнання.

Відповідно до мети підготовка магістрів за даною спеціальністю вимагає посилення формування таких компетентностей:

Інтегральну компетентність:

- здатність розв'язувати складні задачі і проблеми прикладної механіки або у процесі навчання, що передбачає проведення досліджень процесів, обладнання та/або здійснення інновацій в даній галузі та характеризується невизначеністю умов і вимог.

Загальні компетентності:

- здатність застосовувати знання у практичних ситуаціях;
- здатність вчитися та оволодівати сучасними знаннями;
- здатність генерувати нові ідеї (креативність);
- здатність використовувати інформаційні та комунікаційні технології;
- спираючись на знання проблем сталого розвитку вирішувати завдання інжинірингу технологічного обладнання;

- здатність використовувати методи математичного моделювання для вирішення задач при наукових дослідженнях, проектуванні, обслуговуванні, модернізації та утилізації.

Фахові компетентності:

- здатність до інжинірингу пакувального обладнання щодо забезпечення працездатності під дією експлуатаційних навантажень та впливу оточуючого середовища;
- здатність до пошуку і аналізу науково-технічної інформації щодо інжинірингу технологічного обладнання;
- здатність до освоєння нових видів техніки і технології у галузі пакування та споріднених галузях.

Згідно з вимогами програми навчальної дисципліни «Інжиніринг інноваційних технологій та обладнання», студенти після її засвоєння мають продемонструвати такі посилені програмні результати навчання:

- знання принципів і методів конструювання основного пакувального і допоміжного обладнання;
- знання методів і методик виконання проектних і перевірочних розрахунків пакувального обладнання та процесів;
- аналізувати спеціальну наукову і технічну літературу й іншу науково-технічну інформацію, з метою визначення перспективних напрямів досліджень і інноваційної діяльності у галузі;
- проектувати поточні лінії, застосовуючи методи комп'ютерного інжинірингу (програмних продуктів SolidWorks, ANSYS тощо).

Також вивчення дисципліни «Інжиніринг інноваційних технологій та обладнання» також дозволить студентам посилити здатність розв'язувати складні задачі і проблеми прикладної механіки під час навчання, що передбачає проведення досліджень процесів, обладнання та/або здійснення інновацій в даній галузі та характеризується невизначеністю умов і вимог.

РОЗДІЛ 1 ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО ІНЖИНІРИНГ ІННОВАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ТА ОБЛАДНАННЯ

Тема 1 Базові визначення. Тенденції розвитку інжинірингу

Лекція 1.1(1) Поняття інновації, інжинірингу та його видів. Розвиток міжнародного інжинірингу. Світові тенденції розвитку інжинірингу. Роль України на світовому ринку інжинірингових послуг

1.1 Поняття інновації, інжинірингу та його видів

Інновація (англ. innovation – нововведення) – ідея, новітній продукт у галузі техніки, технології, організації праці, управління, а також в інших сферах наукової та соціальної діяльності, засноване на використанні досягнень науки й передового досвіду, є кінцевим результатом інноваційної діяльності¹.

Поняття (термін) інновація – це результат системної діяльності, спрямованої на реалізацію досягнень науково-технічного прогресу та їх удосконалень, що сприяє кількісним та якісним змінам у внутрішньому середовищі підприємства та забезпечує підвищення ефективності й отримання конкурентних переваг.

Поняття інжинірингу виникло у Великій Британії в другій половині XIX століття. У той час Британія була найбільш передовою в науковому й технічному напрямках розвитку країною, і тому послуги інженерів були надзвичайно затребувані. Попит породив пропозицію: інженери спочатку поодиночі, а потім у певних об'єднаннях стали продавати свої послуги для зведення нових мануфактур і заводів, а також для технічної модернізації вже наявних. На той час термін інжиніринг означав надання послуг з будівництва, переоснащення та експлуатації промислових об'єктів та інфраструктури.

Новий поштовх у розвитку інжинірингових послуг дали високі темпи будівництва, що велися в європейських країнах після завершення Другої світової війни. Необхідність відновлення й будівництва нових великих об'єктів в європейських країнах, а далі і в країнах, що розвиваються, призвело до попиту на інжинірингові послуги з реалізації великих об'єктів під ключ. Замовникам була потрібна не тільки допомога в будівництві, але і

¹ URL : <https://uk.wikipedia.org/wiki/Інновація>.

Управління інноваціями: навч. посіб. для студентів ВНЗ / Н. І. Чухрай, Л. С. Лісовська ; М-во освіти і науки України, Нац. ун-т «Львів. політехніка». Львів: Вид-во Львів. політехніки, 2015. 280 с.

в експлуатації та навчанні обслуговуючого персоналу. Саме тому спектр інжинірингових послуг істотно розширився й доповнився, а ринок таких послуг розділився на внутрішній й світовий, профільний й непрофільний.

Ближче до 80-х років XX століття з'явилася потреба в систематизації та уніфікації інжинірингових послуг, в тому числі і на світовому рівні. Задовольняючи цю потребу, Європейська економічна комісія при ООН розробила різні нормативні документи, що стосуються інжинірингових послуг.

Натепер терміни «інжиніринг» й «управління проектами» тісно пов'язані як на теоретичному, так і на практичному рівнях. Під інжинірингом частіше розуміють той же менеджмент, але з глибоким напрямом у предметну галузь. За напрямками (видами) діяльності інжиніринг може бути фінансовий, будівельний, промисловий тощо. За характером діяльності інжиніринг підрозділяється на такі підгрупи:

- передпроектний інжиніринг вивчає потенційний ринок, проводить дослідження з технічного та економічного обґрунтування створення виробництва, розробляє плани розвитку міст та регіональних центрів, транспортної та іншої інфраструктури, консультує й веде наглядову діяльність над вказаними видами робіт;
- проектний інжиніринг розробляє архітектурні та генеральні плани, оцінює вартість проекту, розробляють кошторисну документацію на будівництво й експлуатацію будівлі або споруди, готує креслярську документацію, технічні специфікації і всю іншу документацію, потрібну для реалізації проекту, здійснює консультаційні та наглядові послуги з перерахованих видів робіт;
- післяпроектний інжиніринг пов'язаний з підготовкою договорів на проведення робіт, з організацією торгів, управлінням й наглядом за будівництвом, з проведенням актів прийому-здачі та випробувань об'єкта, з розробкою будівельних й технічних документів на готовий об'єкт, з підготовкою інженерно-технічних фахівців для роботи на збудованому об'єкті, з різною діяльністю зі здачі та його пуску;
- додаткові послуги, пов'язані зі специфікою кожного конкретного об'єкта.

Розглянемо основні види інжинірингу (інжинірингових фірм). У міжнародній практиці виділяють такі види інжинірингових фірм)²:

- інженерно-консультаційні – надають послуги без наступного постачання обладнання;

² URL : <https://uk.wikipedia.org/wiki/Інжиніринг>.

Інжиніринг пакувального обладнання. Конспект лекцій з навчальної дисципліни : навч. посіб. для студ. спеціальності 131 «Прикладна механіка», спеціалізації «Інжиніринг, комп'ютерне моделювання та проектування обладнання пакування» / А. Я. Карвацький. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. 142 с. URL : <http://ela.kpi.ua/handle/123456789/23915>

- інженерно-будівельні – можуть надавати весь перелік послуг, які пов'язані зі створенням промислових та інших об'єктів на умовах «під ключ»;
- консультативні – надають послуги з керування підприємствами, стосовно комп'ютерних технологій, організації виробництва, збуту, фінансів;
- інженерно-дослідницькі – зосереджуються на розробці технологічних процесів та технологій виробництва нових матеріалів.

За умови великомасштабного будівництва застосовують комплексний інжиніринг – сукупність послуг та поставок, необхідних для будівництва промислового підприємства або об'єкта інфраструктури.

Комплексний інжиніринг передбачає:

- консультаційний (чистий) інжиніринг – це проєктування об'єкта, розробка планів будівництва та контролю за проведенням робіт;
- технологічний інжиніринг – надання замовнику технологій, потрібних для будівництва об'єкта та його експлуатації (передача промислового досвіду та знань, надання технології та відповідних патентів);
- будівельний або загальний інжиніринг – проєктування, постачання обладнання, монтаж.

Інжинірингові послуги можуть мати різний ступінь глибини розроблення:

- базисний інжиніринг – це підготовка попередніх досліджень та маркетингових оцінок (створення генеральних планів, оцінка загальної вартості проєктів тощо);
- детальний інжиніринг – це розроблення докладної технічної документації, робочих креслень, комплексних планів роботи підприємства.

1.2 Розвиток міжнародного інжинірингу

У сучасному глобалізованому суспільстві виникає потреба в інжинірингових послугах, які постійно вдосконалюються та урізноманітнюються)³. Внаслідок цих процесів створюються та розвиваються міжнародні ринки інжинірингових послуг. Їх актуальність зумовлена, по-перше, стрімким розвитком науково-технічного прогресу, що призводить до збільшення торгівлі суміжними видами устаткування, по-друге – зростанням обсягу інвестицій, що дає можливість займатися

³ Кондратюк А. А. Розвиток міжнародного інжинірингу: світові тенденції та вітчизняні реалії [Електронний ресурс] / Кондратюк А. А., Манасенко І. М. // Актуальні проблеми економіки та управління : збірник наукових праць молодих вчених. – Електронні текстові дані (1 файл: 429 Кбайт). – 2017. – Вип. 11. URL : <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/22551>

діяльністю, для якої знадобляться інжинірингові послуги, по-третє, наявністю вільного капіталу, що розміщується на ринку інжинірингових послуг, які, в свою чергу, користуються високим попитом країн, що розвиваються. Також спостерігається прагнення транснаціональних корпорацій (ТНК) до розширення поля діяльності. Для цього вони надають інжинірингові послуги країнам, на чії ринки компанії бажають вийти, а згодом це спричиняє постачання техніки, вартість якої у рази перевищує вартість послуг, що зумовило їх постачання.

Інжинірингові послуги надають спеціальні компанії, чисельність яких неухильно зростає. Так, наприклад, у США успішно діють понад 30 тис. фірм, у країнах ЄС – близько 15 тис., причому найбільша їх кількість знаходиться в Німеччині та Австрії. Майже 95 % експорту інжинірингових послуг припадає на фірми високорозвинених країн. Основними імпортерами інжинірингових послуг виступають країни, що розвиваються (80 % світового імпорту). Найбільшими ринками інжинірингових послуг у розвинених країнах є Азіатсько-Тихоокеанський (53% експорту інжинірингових послуг) та Європейський (38,2%).

Оскільки ринок інжинірингових послуг постійно зростає, то між компаніями посилюється конкуренція. Діаграма обсягів інжинірингових послуг у світі наведена на рис. 1.1.

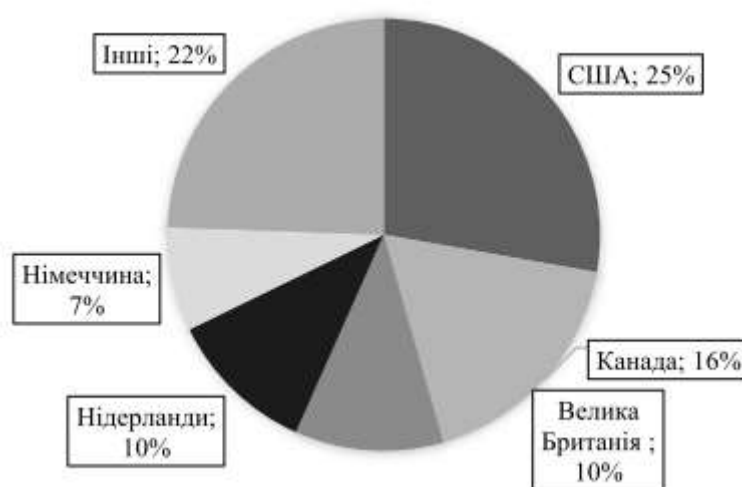


Рис. 1.1. Обсяги послуг міжнародного інжинірингу

1.3 Світові тенденції розвитку інжинірингу

До тенденцій розвитку міжнародного інжинірингу можна віднести те, що серед експортерів інжинірингових послуг переважають саме невеликі компанії, а самі послуги носять національний або регіональний характер)⁴.

⁴ Кондратюк А. А. Розвиток міжнародного інжинірингу: світові тенденції та вітчизняні реалії [Електронний ресурс] / Кондратюк А. А., Манаєнко І. М. // Актуальні проблеми економіки та управління :

Європа володіє найбільш розвинутою інженерно-консультаційною службою. У регіоні існують всі категорії фірм, що надають послуги інжинірингу різного виду. Основними напрямками експорту інжинірингових послуг з країн ЄС є самі країни ЄС, США, Швейцарія, Японія, тобто саме високорозвинені країни. Невелика частка експорту припадає на Китай, Індію, Туреччину, африканські країни. Імпорт ЄС є майже аналогічним експорту. Для розвинутих країн є поширене виконання робіт і надання послуг у формі комплексного інжинірингу, тобто повного обсягу послуг і поставок, необхідних для будівництва нового об'єкта.

Ще однією важливою особливістю інжинірингової діяльності в економічно розвинутих країнах є виконання інжиніринговими компаніями ролі генпідрядника з модернізації та будівництва нових виробництв. Іноді практикується створення інжинірингових кластерів. Управлінські рішення західними інжиніринговими компаніями приймаються на основі ґрунтовних техніко-економічних обґрунтувань. Такі підприємства зосереджують у своєму штаті фахівців-інтелектуалів, що спроможні формувати й впроваджувати різноманітні креативні проекти.

У світових аспектах розвитку інжинірингові послуги стають все більш поширеними, адже значно збільшують ефективність вкладеного капіталу. Досвід економічно розвинутих країн свідчить, що однією із основних передумов економічного зростання та інноваційного розвитку економіки є саме розвиток ринку інжинірингу. Узагальнюючи основні риси розвитку міжнародного інжинірингу в світі можна виділити проникнення ТНК в економіку інших країн через надання технічних послуг, посилення конкуренції, що змушує інжинірингові фірми шукати нові напрямки, зростання практики використання низьковитратних інжинірингових центрів у країнах, що розвиваються тощо.

1.4 Роль України на світовому ринку інжинірингових послуг

Наразі ринок інжинірингу в Україні фактично перебуває лише на стадії становлення)⁵. Понад 80 % вітчизняних інжинірингових компаній займають частку ринку, що менша за 0,3 %. Цим невисоким показникам є такі пояснення: по-перше, в Україні поки що недостатня затребуваність комплексних послуг інжинірингу; по-друге, відсутність досвіду викликає

збірник наукових праць молодих вчених. – Електронні текстові дані (1 файл: 429 Кбайт). – 2017. – Вип. 11.
URL : <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/22551>

⁵ Кондратюк А. А. Розвиток міжнародного інжинірингу: світові тенденції та вітчизняні реалії [Електронний ресурс] / Кондратюк А. А., Манаєнко І. М. // Актуальні проблеми економіки та управління : збірник наукових праць молодих вчених. – Електронні текстові дані (1 файл: 429 Кбайт). – 2017. – Вип. 11.
URL : <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/22551>

появу значної кількості помилок у реалізації проектів. Також до сучасних проблем України належить дефіцит кваліфікованих кадрів, неякісне виконання робіт, застаріла нормативна база, недосконала система визначення вартості проектних робіт, корупційні явища на стадії погодження та експертизи документації, низький рівень автоматизації проектних робіт та багато інших. У табл. 1.1 наведено найбільш перспективні інжинірингові компанії України.

Для забезпечення подальшого розвитку інженерно-консультаційної діяльності в Україні слід запровадити такі основні організаційно-економічні заходи:

- створення інжинірингових центрів компетенції світового рівня, що дасть змогу зменшити залежність України від іноземних експертів;
- проведення професійних форумів міжнародного рівня;
 - адаптування ноу-хау до специфічних умов України саме місцевими інжиніринговими компаніями;
 - формування системи професійної освіти з підготовки фахівців у сфері інжинірингу та забезпечення вільного доступу до професійної літератури;
 - регулювання нормативно-правової бази;
 - підвищення якості інжинірингових послуг шляхом залучення фахівців певних галузей науки й промисловості.

Табл. 1.1. Вітчизняні інжинірингові компанії

Назва компанії	Сфера діяльності
CONCORD COKE ENGINEERING	Комплексне ведення будівництва та реконструкції об'єктів коксохімічного виробництва
«Фінансово-промислова група «АЛЬТКОМ»	Функції генерального підрядника з будівництва аеровокзальних комплексів
Державне підприємство «Український науково-технічний центр металургійної промисловості «Енергосталь»	Розробка новітніх технічних рішень до поставки та впровадження першокласних технологій та обладнання «під ключ»
ДП «ГІПРОКОКС»	Розробка концепції розвитку в коксохімічній промисловості
Компанія «С-інжиніринг»	Контрактор у сфері будівництва об'єктів енергетики та промисловості «під ключ»

Роль України в міжнародному інжинірингу незначна, але позитивною тенденцією є розвиток на теренах нашої країни вітчизняних інжинірингових компаній, які мають певні конкурентні переваги на світовому ринку.

Тема 2 Інновації

Лекція 2.1(2) Зміст, типи та етапи інноваційних процесів. Технічні, організаційні, інформаційні, соціальні, економічні аспекти інновації. Життєвий цикл продукції. Фактори формування адекватного розуміння потреб замовника. Стейкхолдери

2.1 Зміст, типи та етапи інноваційних процесів

Інноваційний процес – це сукупність науково-технічних, технологічних і організаційних змін, що відбуваються у процесі реалізації інновацій; процес послідовного перетворення ідеї на товар, що проходить етапи фундаментальних, прикладних досліджень, конструкторських розробок, маркетингу, виробництва, нарешті збуту – процес комерціалізації технологій.)⁶

Інноваційний процес – це узагальнення системи знань, через яку створюються ідеї, що у подальшому впроваджуються у вигляді комерціалізації або системи змін, які поширюються через нові товари, послуги або процеси, які здатні задовольнити потреби на якісно новому рівні.

Розрізняють різні типи інноваційного процесу:

Тип 1. «Інновація – прорив». В узагальненому вигляді даний тип передбачає: генерацію кардинально нових знань (зазвичай це сфера фундаментальних досліджень); визначення можливостей трансформації одержаних фундаментальних знань в ідеї, які мають прикладний характер; визначення потреб споживачів в інновації даного типу; формування якісних та кількісних параметрів інновації; тестування інновації (тільки для товару або процесу); впровадження (виробництво); поширення інновацій у базовій сфері; поширення інновацій на суміжні галузі; оцінку ефекту й ефективності інновацій.

Тип 2. «Інновація – удосконалення». В узагальненому вигляді такий тип передбачає: вибір якостей (процесів), що потребують удосконалення на основі аудиту будь-якого об'єкта та визначення проблем, які необхідно вирішити; генерацію ідей щодо вдосконалення; вибір базової ідеї вдосконалення; формування технічного завдання з удосконалення; тестування удосконалення; коригування удосконалення; впровадження

⁶ URL : https://uk.wikipedia.org/wiki/Інноваційний_процес.

Маркетинг інновацій і інновації в маркетингу / за ред. С.М. Ілляшенка. Суми: Університетська книга, 2008. 615 с.

вдосконалення; комерціалізацію вдосконалення; поширення на інші об'єкти; оцінку ефективності вдосконалення.

Тип 3. «Інновація – модифікація». В узагальненому вигляді такий тип передбачає: з'ясування потреби у модифікації; вибір і конкретизацію параметру, який необхідно модифікувати; формування технічного завдання; тестування модифікації; впровадження модифікації; комерціалізацію модифікації; поширення на інші об'єкти; оцінку ефективності.

Найбільш типові етапи інноваційного процесу включають:

1. Визначення потреби в інновації. Ця складова передбачає здійснення аудиту діяльності підприємства з визначенням поточних і стратегічних проблем, які можна вирішити за допомогою генерації та впровадження інновацій.

2. Дослідження (збір інформації). Передбачає конкретизацію та розробку теоретичного підходу до вирішення даної проблеми; прикладне дослідження; експериментальне дослідження і перевірки; експериментальні моделі.

3. Проектування. Складова базується на визначенні технічних характеристик виробу (зразка); проектуванні виробу; конструкційне і екологічне забезпечення виробу; виготовлення, випробування і доведення виробу; попереднє тестування.

4. Розробка. Передбачає підготовку виробництва (конструювання, технологія, матеріально-технічне постачання, створення допоміжних матеріалів, спеціальних інструментів і устаткування); запуск товару у виробництво; управління освоєним виробництвом; постачання споживачам; формування системи комунікацій.

5. Управління. Передбачає використання у споживача; надання послуг; необхідна ліквідація застарілого і створення замість нього нового товару.

2.2 Технічні, організаційні, інформаційні, соціальні, економічні аспекти інновації

Як відомо, у широкому сенсі інновація (нововведення, нововведення) – це нове технічне, технологічне, організаційне чи інше рішення, плановане підприємством до використання. За змістом можна виділити технічні, організаційні, інформаційні, соціальні, економічні інновації)⁷.

Технічні інновації – це нові конструкторсько-технологічні рішення, що виражаються у вигляді нових конструкторських рішень деталей, складальних одиниць, готових виробів, а також нової технології їх

⁷ Маркетинг інновацій і інновації в маркетингу / за ред. С.М. Ілляшенка. Суми: Університетська книга, 2008. 615 с.

виготовлення. Матеріальним втіленням технічних інновацій є конструкторська і технологічна документація, дослідні зразки, технологічне обладнання та оснащення.

Організаційні інновації – це нові методи організації і планування, які використовуються в виробничо-господарської діяльності підприємства, наприклад зміна організаційних форм виробничих процесів (перехід до використання предметно-замкнутих ділянок, потокових ліній тощо), використання інших методів нормування праці (хронометраж по методу моди, метод моментних спостережень тощо), зміна системи планування на підприємстві.

Під інформаційними інноваціями розуміються різні форми впровадження нових інформаційних технологій, що дозволяють, наприклад, використовувати електронну форму подання документації, системи автоматизованого проектування, формувати і раціонально експлуатувати бази даних тощо.

Соціальні інновації – це інновації, що дозволяють поліпшити умови праці, відпочинку, побуту працюючих, підвищити безпеку і привабливість праці (наприклад, гнучкий графік роботи, що змінюється протягом зміни швидкість конвеєрів, різні форми обліку думок працюють при вирішенні виробничих питань, створення гуртків якості, раціональна система організації харчування персоналу в обідню перерву).

Економічні інновації являють собою удосконалення будь-яких елементів економічної системи підприємства (зміна системи розрахунків з постачальниками і замовниками, використання більш ефективних систем оплати та матеріального заохочення працюючих)

У більш вузькому сенсі, стосовно до практики машинобудівних підприємств, під інноваціями розуміють ті з них, які безпосередньо впливають на технічний рівень і конкурентоспроможність виробленої продукції, тобто технічні інновації.

Для здійснення інноваційних процесів на машинобудівних підприємствах є спеціалізовані служби (дослідні центри, конструкторські та технологічні відділи, експериментальні виробництва). Їх завдання – забезпечити підприємству можливість оновлювати свою продукцію з урахуванням вимог і переваг споживачів.

Оскільки в кінцевому підсумку технічні інновації матеріалізуються в конкретну машинобудівну продукцію, ефективність організації інноваційних процесів впливає на показники результативності виробничої діяльності підприємства: величину витрат, обсяг прибутку, обсяг продажів. Існують такі три етапи інноваційного процесу (рис. 2.1).

На етапі I виконуються необхідні наукові дослідження, дослідно-конструкторські розробки, результат цього етапу – конструкторсько-

технологічна документація, дослідні зразки і дані про їх випробуваннях, спроектоване, виготовлене або придбане технологічне обладнання та оснащення. В результаті підприємство несе досить значні витрати, що покриваються відповідними інвестиціями, завдяки яким фінансуються дослідні, конструкторські та технологічні служби, інженерно-дослідні роботи, що виконуються сторонніми організаціями, а також придбання ліцензій на об'єкти інтелектуальної та промислової власності.



Рис. 2.1. Схема життєвого циклу інновацій

Етап II інноваційного процесу відповідає початкового періоду серійного або масового випуску продукції, так званої як період освоєння виробництва. Має місце зростання обсягів виробництва і обсягів продажів, проте виручка від реалізації продукції ще не дає можливості повністю покривати підвищені витрати на виробництво. Триває вдосконалення виробництва технологічним обладнанням і оснащенням, що вимагає додаткових інвестицій.

Етап III інноваційного процесу характеризується інтенсивним зростанням обсягів виробництва і продажів; витрати на виробництво повністю покриваються виручкою від реалізації продукції, підприємство починає отримувати прибуток. В умовах ринкового середовища третій етап не може бути нескінченно довгим через морального старіння інновацій, появи більш конкурентоспроможних технічних рішень підприємство змушене скорочувати обсяги виробництва застарілої техніки, оновлювати номенклатуру виробленої продукції, нарешті, застарілі вироби знімати з виробництва.

Сумарна тривалість усіх трьох етапів інноваційного процесу, складова для різних видів продукції від декількох років до декількох десятиліть, називається життєвим циклом інновацій.

2.3 Життєвий цикл продукції

Життєвий цикл продукції (виробу) (англ. product lifecycle) – це сукупність взаємопов'язаних процесів послідовної зміни стану продукції від початку дослідження та обґрунтування розроблення до припинення експлуатації виробу, застосування (зберігання) тощо.)⁸

Під терміном «продукція» тут розуміється матеріальний результат трудової діяльності або виробничих процесів, що має корисні властивості і призначений для використання споживачем.

Зазвичай послідовними етапами життя кожного виробу як технічної системи є: наукове відкриття у даній сфері, визначення можливості створення виробу, технічне втілення задуму шляхом розробки видів виробів, освоєння їх у виробництві, виготовлення в промислових умовах, споживання (експлуатація) та утилізація. Ці етапи повторюються в житті кожного виду продукції. Оскільки, різні повторення, що піддаються визначенню, означають терміном «цикл», то для характеристики стадій, що послідовно повторюються, й етапів у житті виробів використовують термін «життєвий цикл продукції».

Визначення життєвого циклу продукції і типовий зміст робіт на його стадіях встановлюють державні стандарти відповідно до яких весь життєвий цикл продукції поділяють на чотири стадії: наукове дослідження і проектування; виготовлення продукції; обіг продукції; споживання (експлуатація) й утилізація продукції.

Дослідження та обґрунтування розробки – стадія життєвого циклу продукції від виникнення задуму до обґрунтування можливості й доцільності створення виробів і матеріалів.

Фундаментальні наукові дослідження – початковий етап повного життєвого циклу продукції. Процес творчості на цих етапах розглядають як процес створення нових знань, ідей, за якими проводять прикладні науково-дослідні роботи. При цьому прикладні дослідження є ланкою між новими знаннями, отриманими у ході теоретичних досліджень, і прикладними знаннями. У результаті виконання робіт на цих етапах суспільство отримує інформацію про можливості матеріалізації нових знань, тобто про технічне втілення ідей, відкриттів тощо.

⁸ URL : https://uk.wikipedia.org/wiki/Життєвий_цикл_продукції, ДСТУ 3278-95 Система розроблення та поставлення продукції на виробництво. Основні терміни та визначення, ДСТУ 2960-94 Організація промислового виробництва. Основні поняття терміни та визначення, ДСТУ 3021-95 Випробування і контроль якості продукції. Терміни і визначення.

Прикладні науково-дослідні роботи – це роботи, в результаті яких на основі використання інформації про можливості технічного втілення ідей створюють нові, досконаліші моделі конструкцій, засобів автоматизації, нові технологічні процеси тощо.

Розроблення продукції – стадія життєвого циклу продукції, яка полягає у зміні стану продукції – від формулювання вимог технічного завдання щодо виконання дослідно-конструкторських (ДКР) чи науково-дослідних (НДР) робіт на створення (модернізацію) продукції до втілення їх у нових (модернізованих) дослідних зразках, у нових (модифікованих) матеріалах.

Науково-дослідне розроблення – частина підготовки виробництва, що полягає у проведенні прикладних досліджень, пов'язаних з удосконаленням продукції, техніки, технології, складу застосовуваних матеріалів, організації виробництва, праці та керування, що передбачає проведення:

- дослідно-конструкторських робіт – сукупності робіт над створенням конструкторської та технологічної документації, виготовленням та випробуванням дослідного або головного зразка продукції;
- дослідно-технологічних робіт – сукупність робіт над створенням нових речовин, матеріалів та (або) технологічних процесів.

Розроблення нового виробу проводиться інженерно-технічним персоналом шляхом проектування й конструювання, що є взаємно пов'язаними процесами, які доповнюють одне одного. Конструктивні форма й розміри об'єкта уточнюються застосуванням методів проектування – проведенням розрахунків параметрів, розрахунків на міцність, оптимізаційних розрахунків тощо. У свою чергу, проектування є можливим лише при попередньо обраних варіантах конструктивного виконання. Часто ці два процеси не розділяють, так як вони виконуються, зазвичай, спеціалістами однієї професії – інженерами-конструкторами, хоча кожен з них має свої особливості. Розроблення продукції завершується отриманням її зразка.

Дослідний зразок – зразок продукції, виготовлений за наново розробленою документацією для перевірки шляхом випробувань відповідності її заданим технічним вимогам з метою прийняття рішення про можливість впровадження у виробництво і (чи) використання за призначенням.

Головний зразок – перший екземпляр чи примірник виробу, виготовлений за новорозробленою документацією для використання його як за призначенням, так і для одночасного опрацювання конструкції та технічної документації з метою поліпшення виробництва та експлуатації решти екземплярів цієї партії чи серії.

Підготовлення виробництва продукції – сукупність заходів, що забезпечують готовність підприємства до освоєння виробництва продукції необхідної якості та у визначеному обсязі випуску і включає:

- конструкторське підготовлення виробництва – створення комплексу конструкторської документації, необхідної для виготовлення та експлуатації виробу (виробів);
- технологічне підготовлення виробництва – сукупність заходів, яка охоплює проектування технологічних процесів виробництва, вибір та розміщення устаткування, визначення технологічного оснащення, розроблення методів технічного контролю, нормування матеріально-технічних витрат і забезпечує випуск продукції потрібного рівня якості за встановлених термінів та обсягів випуску.

Виробництво продукції – це процес організації та здійснення виготовлення продукції. Стадію виробництва продукції укрупнено можна розділити на дві підстадії:

- підготовку промисловості до виробництва нового (вдосконаленого) виробу і його освоєння;
- власне виготовлення виробу як продукту праці.

Організаційно-планова підготовка виробництва, а саме: адаптація виробничої та організаційної структур підприємства до умов виготовлення нової продукції, забезпечення потрібним обладнанням, перепланування технологічних схем і розміщення устаткування в підрозділах, розробка календарно-планових нормативів (серій виробів, партій деталей, виробничих циклів тощо), обґрунтування методу переходу на випуск нових виробів.

У серійному (масовому) виробництві виріб проходить ряд послідовних етапів: економічне освоєння (доведення технологічних процесів, конструкторської документації, адаптація всіх служб тощо); стабільне (стале) виготовлення продукції; модернізація і вдосконалення споживчих властивостей продукції; зняття з виробництва.

Реалізація продукції – це постачання продукції, яка оплачена покупцем або на яку є згода покупця щодо оплати в майбутньому поставленої йому продукції, що включає підготовку до транспортування, транспортування, зберігання; монтаж і підготовку до експлуатації.

Експлуатація виробу це – стадія життєвого циклу продукції, на якій реалізують, підтримують та відновляють якість виробу.

Стадія експлуатації виробу складається з низки етапів, серед яких власне експлуатація (застосування), включаючи обслуговування, ремонт, відновлення, тобто експлуатацію продукту з метою вияву його корисного ефекту, заради якого продукцію було створено.

На етапі власне експлуатації ставиться мета високоефективного використання продукції у споживача. Її реалізують шляхом розробки експлуатаційної документації і науково обґрунтованих норм витрачання запасних частин, забезпечення необхідного рівня надійності продукції.

Утилізація продукції – комплекс технологічних операцій, спрямованих на використання як вторинної сировини продукції, що втратила свої корисні властивості. Ця стадія, також, передбачає зняття з виробництва; демонтаж та утилізацію ліквідованих знарядь праці (предметів споживання).

Поняття «життєвий цикл інновацій» дещо відрізняється від поняття «життєвий цикл продукції», оскільки останнє відображає не тільки сферу розробки і виробництва всього сімейства виробів, що використовують технічну інновацію, але і тривалість фізичного існування конкретного виробу, включаючи етапи експлуатації, ремонтного обслуговування, аж до утилізації (рис. 2.2).



Рис. 2.2. Схема життєвого циклу продукції

2.4 Фактори формування адекватного розуміння потреб замовника

Ключові чинники формування адекватного розуміння потреб споживача (замовника) включають:

- визначення чітких меж ринкового сегмента;
- розуміння областей нових ринкових можливостей;
- розуміння динаміки розвитку ринку;
- прогнозування ринку тощо.

Розуміння динаміки розвитку ринку. Недостатня увага, що приділяється аналізу кон'юнктури ринку, що змінюється, може призвести до виникнення серйозних проблем фірми. Теодор Левітт)⁹ у своїй класичній статті охарактеризував таку політику як «маркетингову короткозорість». Основною ідеєю його роботи є констатація того, що компанії часто поверхово підходять до маркетингової політики, відштовхуючись від запропонованого ними товару, а не структури споживчих потреб, що лежить в основі ринку.

Прогнозування ринку. Існує багатий набір методів визначення можливої динаміки нових ринків – від простої екстраполяції поточних тенденцій до складних методів обробки функцій немонотонних змін, таких як метод Дельфі)¹⁰ або розробка сценаріїв. У процесі цього прогнозування має враховуватися як інформація про продаж, а й інші чинники, що впливають на потенційний ринок, – наприклад, демографічні, технологічні, політичні та екологічні аспекти. робота із споживачами. Для успішної діяльності важливим є залучення в інформаційний обмін споживачів з метою отримання від них відомостей про види товарів та послуг, які їм потрібні. Цього можна досягти шляхом складання регулярних оглядів думки споживачів, організації різноманітних дискусій або шляхом їх активного залучення до процесу розвитку концепції продукту. Різні інструменти моделювання – особливо комп'ютерна технологія дизайну – забезпечують цьому процесу додатковий розмах, дозволяючи споживачам разом із розробниками випробувати різні варіанти дизайну товару. У ряді випадків споживач може бути важливим джерелом ідей створення нових продуктів. Цей фактор передбачає розвиток формалізованих методів та механізмів тісної взаємодії зі споживачами при розробці та вдосконаленні ідей продукту. Постійна взаємодія.

Успіх інноваційного продукту залежить від підтримки сталої перспективи попиту на продукт у період його розробки, що потребує постійної взаємодії зі споживачем, а не поодиноких заходів щодо збору необхідної інформації. Крім того, тісний зв'язок із споживачами протягом тривалого часу допомагає розробнику продукту глибше зрозуміти вимоги, що пред'являються до продукту, доведення інформації про перспективи розвитку попиту підрозділів фірми.

Серед способів реалізації цього можна виділити періодичну ротацію кадрів у різних підрозділах компанії, щоб усі співробітники деякий час мали змогу безпосередньо спілкуватися зі споживачами, методика "голос споживача". В даний час є безліч способів визначення, уточнення,

⁹ URL : https://uk.wikipedia.org/wiki/Теодор_Левітт

¹⁰ URL : https://uk.wikipedia.org/wiki/Метод_експертних_оцінок

формалізації та доведення «голосу споживача» до всіх підрозділів організації.

Важливу роль інновації продукції грає рух у ногу з технологічними розробками та новими можливостями. Серед способів забезпечення цього процесу можна виділити такі: технологічне прогнозування; диверсифікація науково-технічних зв'язків. Метою етапу розробки технічних умов та розвитку концепції є перетворення різної вихідної інформації у концепцію продукту, яка може бути реалізована надалі підрозділами НДДКР фірми.

На даному етапі існують чотири види вихідної інформації: інформація про потреби та можливості ринку; інформація про зовнішні технологічні можливості; інформація про внутрішні технологічні можливості (наприклад, про нові розробки відділів НДДКР) та зворотний зв'язок від стадії винаходів щодо можливих ідей; загальна стратегія бізнесу компанії загалом.

2.5 Стейкхолдери

Стейкхолдер (англ. stakeholder), також зацікавлена сторона, причетна сторона, учасник робіт, роль у проекті - особа або організація, яка має права, частку, вимоги або інтереси щодо системи або її властивостей, що задовольняють їх потребам та очікуванням (ISO/IEC/IEEE 15288:2015, ISO/IEC 29148:2011)¹¹

У системній інженерії стейкхолдери розглядаються в контексті процесу прийняття рішень як люди або організації, що залежать від результатів прийнятих рішень. Розуміння того, хто є стейкхолдером стосовно прийнятих рішень, має бути встановлене заздалегідь. Дуже часто цього не відбувається – стейкхолдери не визначаються до прийняття рішень. Однак, як тільки рішення буде оголошено або реалізовано, всі, хто хоч якось був порушений цим рішенням, висловлять свою думку.

Роль стейкхолдерів у процесах організаційного забезпечення проектів полягає в управлінні можливостями організацій постачати та купувати продукти та послуги через підтримку, ініціалізацію та керування проектами. Це забезпечення постачає ресурси та інфраструктуру необхідні для сприяння проектам та гарантує виконання організаційних цілей та діючих угод. Воно не претендує на звання сукупності ділових процесів, що становлять управління діловою діяльністю організації.

Роль стейкхолдерів у технічних процесах полягає у формулюванні вимог до системи, модифікації цих вимог у ефективний продукт, що

¹¹ URL : <https://ru.wikipedia.org/wiki/Стейкхолдер>.

Kossiakoff A., Sweet W. N., Seymour S. J., Biemer S. M. Systems Engineering Principles and Practice. 2-е изд. Hoboken, New Jersey: A John Wiley & Sons, 2011. 599 с. [ISBN 978-0-470-40548-2](https://doi.org/10.1002/9780470405482).

дозволяє здійснювати, за необхідності, стійке повторне виробництво цього продукту, використовувати його для забезпечення необхідних послуг, підтримувати забезпечення цими послугами та ліквідувати продукт, коли він вилучається з обігу. Технічні процеси визначають зміст робіт, які дозволяють у рамках завдань підприємства та проекту збільшити прибутки та мінімізувати ризики, що виникають у процесі прийняття технічних рішень та здійснення відповідних дій.

Тема 3. Вибір напрямку інновацій

Лекція 3.1(3) Стратегія та вибір шляхів інноваційної діяльності. Планування інноваційної діяльності підприємства. Інноваційна політика і сталий розвиток підприємства. Internet технології

3.1 Стратегія та вибір шляхів інноваційної діяльності

Загальна стратегія підприємства – це його генеральна лінія, спрямована на виконання головних завдань на довгий (тривалий) період з метою зміцнення своєї життєздатності і економічної потужності по відношенню до конкурентів.)¹² Вона (стратегія) визначає загальний шлях розвитку фірми і методи його досягнення.

Інноваційна стратегія фірми містить у собі прийняття рішень відносно спрямованості наукових досліджень та конструкторських розробок, використання здобутих результатів і фінансування з метою досягнення поставлених стратегічних економічних цілей на перспективу.

Як загальна стратегія, так і інноваційна стратегія фірми в умовах конкуренції повинна не тільки забезпечити досягнення поставлених цілей, але досягнути їх з кращими результатами, інакше фірма не витримає конкурентної боротьби за ринок збуту своєї продукції тощо.

Успіх на цьому шляху залежить від механізму поєднання розвитку наукової ідеї, її розробки, упровадження результату та споживання.

На умови і зміст формування інноваційної стратегії фірми впливають:

- позиція керівництва щодо інновацій (нововведень);
- система управління інноваціями;
- сфера фундаментальних і прикладних досліджень;
- оцінка результатів;
- відкриття;
- патенти;
- інвестиції;

¹² Стратегія інноваційної діяльності. URL : <https://studfile.net/preview/8886819/page:18/>

– інноваційний потенціал фірми

За своєю суттю стратегія є набором правил для прийняття рішень, якими фірма керується у своїй діяльності, в тому числі в її основній складовій – інноваційній діяльності. Всі ці правила можна об'єднати в чотири групи:

1) Правила, які використовуються для оцінки діяльності фірми тепер та в майбутньому.

2) Правила, за якими складаються стосунки фірми з її оточенням. Вони визначають, які види продукції та технології фірма розроблятиме і яким способом досягатиме переваг над конкурентами.

3) Правила, згідно з якими устанавлюються відносини та процедура всередині фірми.

4) Правила, за якими фірма проводить оперативну роботу.

З вибором стратегії пов'язане укладання планів проведення досліджень і розробок, а також інших форм інноваційної діяльності.

Стратегічне планування ґрунтується на зборі і аналізі даних, які характеризують підприємство і сферу його оточення.

Таким чином, мета інноваційної стратегії і менеджменту інновацій впливає із загальної стратегії підприємства і одночасно впливає на її зміст і сприяє її досягненню.

В інноваційному менеджменті розрізняють такі види стратегії розвитку підприємства:

1) Базові стратегії – модель поведінки підприємства в цілому й окремої стратегічної господарської одиниці (СГО) в тій або іншій конкретній ринковій ситуації. Наприклад, стратегія вибору ринків; стратегія конкуренції на обраному ринку. І далі на обраному ринку: досягнення переваги в конкуренції на основі лідерства в якості продукції; лідерство в цінах; ринкова спеціалізація; ринкова кооперація.

2) Функціональні стратегії — комплекси заходів і програм для окремих функціональних сфер і підрозділів підприємств. Вони мають підпорядковане значення і є по суті ресурсними програмами, що забезпечують практичну реалізацію базових стратегій.

Крім того, за класифікацією Х. Фрімана, існує шість типів інноваційної стратегії підприємства:

- наступальна;
- захисна;
- імітаційна;
- залежна;

- традиційна;
- «за нагодою».

Наступальна інноваційна стратегія охоплює: активні НДДКР, орієнтовані на маркетинг; стратегію злиття; стратегію придбання. Наступальні стратегії звичайно потребують кредитних інвестицій і, отже, більше використовуються на підприємствах, що мають достатньо високий фінансовий потенціал, кваліфікований склад менеджерів і творчого науково-технічного потенціалу.

Захисна інноваційна стратегія відбиває реакцію підприємства на дії конкурентів і побічно на потреби і поведінку споживачів.

Імітаційна інноваційна стратегія пов'язана з копіюванням технології виробництва продукції фірм-піонерів. Використання цієї стратегії, не дуже віддалене в часі від першого використання базової інновації, як правило, пов'язане з придбанням ліцензії на виробництво такого продукту.

Залежна інноваційна стратегія визначається тим, що характер технологічних змін на підприємстві залежить від політики інших фірм, які виступають як основні в коопераційних технологічних зв'язках. «Залежні» підприємства не роблять самостійних спроб змінити свою продукцію, оскільки вони тісно пов'язані з вимогами до неї провідного підприємства.

Традиційна інноваційна стратегія означає відсутність технологічних змін на підприємстві. На традиційних виробництвах закріплюються певні інноваційні форми на тривалий період їх «життєвого циклу». Традиційна стратегія вважається інноваційною як осмислена відмова від оновлення продукції внаслідок ретельного аналізу ринкової ситуації і стану конкурентів, але традиційна стратегія не уникає власне інноваційної поведінки, оскільки вона пов'язана з удосконаленням форми і сервісу традиційної продукції.

Інноваційна стратегія «за нагодою» пов'язана з використанням інформації і можливостей, які виникають у зовнішньому середовищі підприємства. Характерною рисою цієї стратегії є відсутність власної науково-технічної діяльності. Такий тип поведінки ще називають «стратегією ніші», оскільки перевага полягає в знаходженні особливої ніші на існуючих ринках товарів і послуг, яка має споживача з нетиповими, але значно різноманітними потребами.

3.2 Планування інноваційної діяльності підприємства

Залежно від змісту, цілей і завдань розрізняють такі види планування інноваційної діяльності на підприємстві.)¹³ За тривалості планового періоду

¹³ Поклонська Л. С. Планування інноваційної діяльності підприємства // сучасні проблеми управління підприємствами: теорія та практика. 2018. URL :

(горизонту планування) виділяють довгострокове (перспективне), середньострокове (понад один рік) і короткострокове (поточне) планування (рис. 3.1). Слід відрізнити перспективне планування від ідентичного за формою прогнозування.



Рис. 3.1. Види планування інноваційної діяльності підприємства

За важливості поставлених цілей, типу цілей, змісту планових рішень або обсягом залучених матеріальних ресурсів та інвестицій, розрізняють стратегічне, тактичне, оперативне, інвестиційне та бізнес-планування. Таким чином, до складу перспективного планування включено формування довгострокових планів, спрямованих на вирішення стратегічних завдань.

Стратегічне планування – це чітка орієнтація планування на ринкові потреби, облік ринку як головного чинника зовнішнього середовища. Будучи складовим елементом стратегічного управління, стратегічне планування – багатоетапний процес активного пошуку альтернативних варіантів, вибору кращого з них, побудови на основі цього вибору загальної стратегії розвитку, формування спеціального механізму її реалізації.

Довгострокове планування будується переважно на екстраполяції сформованих тенденцій розвитку та введення в моделі планування оцінок майбутнього. Перенесення минулих закономірностей і структурних характеристик на майбутній розвиток – особливість і одночасно недолік даного підходу, тобто майбутні умови функціонування підприємства будуть більш сприятливі, ніж в минулому періоді. Основою стратегічного планування інноваційного підприємства вважається побудова дерева цілей і сценаріїв планування інноваційної діяльності підприємства, розробка

планів на основі ситуаційних моделей, експертних і матричних оцінок варіантів господарської поведінки тощо.

Наразі виділяють такі принципи планування інноваційної діяльності, які доцільно використовувати на підприємстві:

- принцип економічної і соціальної доцільності інновації;
- принцип пріоритетності планування інновації;
- принцип пріоритету споживача над виробником;
- принцип комплексності та наступності планування;
- принцип відповідності рівня матеріально-технічної бази вимогам, що ставляться до якості та конкурентоспроможності продукції;
- принцип ефективності нововведень;
- принцип стимулювання інноваційної діяльності;
- принцип маркетингової спрямованості інновацій.

Найефективніші шляхи і способи реалізації стратегії розвитку вибирають у процесі тактичного планування інноваційної діяльності. Його основними завданнями є формування портфеля інноваційних проектів, упровадження яких забезпечить досягнення стратегічних цілей за оптимального використання ресурсних можливостей організації і максимізації майбутніх доходів. Для цього складають продуктово-тематичні плани інновацій і здійснюють їх техніко-економічне обґрунтування. Реалізація відібраних інноваційних проектів в оптимальні терміни і в межах виділених ресурсів забезпечується розробленням оперативно-календарних планів, які водночас є засобом контролювання їх виконання.

Таким чином, планування інноваційної діяльності на підприємстві має бути комплексним, охоплювати взаємозалежні етапи та стратегії мають впливати одна з іншою, для більш ефективної діяльності.

3.3 Інноваційна політика і сталий розвиток підприємства

Передумовою для пошуку сучасних інструментів і засобів інноваційного розвитку (політики) підприємства є визначення базової концепції, яка має скласти підґрунтя для подальшого формування інноваційного механізму.)¹⁴ Пріоритетною для дослідження характеру інноваційного розвитку як окремого підприємства, так і економіки країни, і світу в цілому, є концепція сталого розвитку, оскільки саме вона враховує різну спрямованість розвитку з одного боку, та передбачає використання різних інструментів для забезпечення розвитку з огляду на її компоненти – з іншого.

¹⁴ Дунська А. Р., Письмена У. Є. Формування інноваційного механізму підприємства на засадах сталого розвитку // Ефективна економіка. 2020. №12. DOI: 10.32702/2307-2105-2020.12.12

Застосування концепції сталого розвитку на рівні промислового підприємства означає формування та впровадження стратегії діяльності, яка відображає потреби підприємства з одного боку, і орієнтована на збереження, підтримку та зміцнення людських і природних ресурсів, які будуть потрібні у майбутньому з іншого боку.

Таким чином, доцільно сформулювати такі основні завдання сталого розвитку промислового підприємства:

- забезпечення належного рівня соціальної відповідальності промислових підприємств;
- економне використання усіх видів ресурсів і турбота про їх збереження;
- дбайливе ставлення до навколишнього середовища, підвищення рівня екологічної стійкості.

Одним із способів забезпечити стійкий розвиток промислового підприємства є розробка та використання ресурсозберігаючих технологій, які мають ґрунтуватися не тільки на техніко-технологічних інноваціях, а й на інноваціях організаційно-управлінського характеру, інноваціях у соціальній сфері тощо. Тобто сталий розвиток підприємства ґрунтується на активному та цілеспрямованому здійсненні інноваційної діяльності.

Забезпечення інноваційного розвитку промислових підприємств на основі системної взаємодії усіх елементів інноваційного процесу потребує дослідження наукових підходів до визначення сутності та формування інноваційного механізму розвитку підприємства.

3.4 Internet технології

Стрімке зростання і широке застосування Internet в останні роки дуже вплинули на способи ведення бізнесу. Internet є дуже важливою технологією, чие значення у бізнесі зростає зі зростанням кількості користувачів. У сучасних умовах розвитку інформаційних технологій жодна фірма не може дозволити собі не робити зусиль для задоволення потреб покупців у пошуку інформації в Internet про свою компанію, її товари та послуги, придбання їх (у тих випадках, коли це зручно клієнту) у віртуальному магазині. Цілі фірми, її потенційні можливості та шанси у сфері маркетингу також тісно пов'язані із застосуванням Internet для розробки та просування своєї продукції та послуг)¹⁵.

Розглянемо основні послуги, що надаються Internet-провайдерами для розширення діяльності підприємств. По-перше, найпоширенішою послугою Internet є служба World Wide Web (часто називається Web). Це найпростіша у використанні служба. На Web-сторінках Глобальної павутини можна

¹⁵ URL : <https://en.wikipedia.org/wiki/Internet>

знайти будь-яку інформацію про діяльність різних підприємств, нові можливості бізнесу, різні економічні показники, про загальну економічну обстановку в країні і в світі. Окрім цього, можливе розміщення власної інформації на таких сторінках.

ІР-телефонія – нова послуга, що пропонується провайдером, заснована на перетворенні голосу в пакети, які можуть бути передані через Internet. Сьогодні розвиток цієї технології досяг такої стадії, що послуги ІР-телефонії стали досить надійними та якісними, щоб розглядатися як альтернатива послугам традиційного телефонного зв'язку. Більшість клієнтів використовують нову технологію для зниження вартості послуг телефонного зв'язку при збереженні, наскільки це можливо, якості зв'язку без введення додаткових обмежень для користувачів. Економія коштів, відбувається головним чином рахунок компресії голосу, інтеграції мереж передачі і даних і рахунок найпривабливіших тарифів у Internet проти послугами традиційних телефонних операторів.

Також однією з найпоширеніших послуг є електронна пошта, яка значною мірою дає змогу знизити витрати на передачу інформації, а також знизити час її доставки отримувачу.

Все ширше починає поширюватися доступ до он-лайн сервісів систем проектування та супроводу виробництва.

З використанням системи управління прибутком підприємства можливі два аспекти застосування глобальної комп'ютерної мережі Internet. Рекламний аспект полягає в такому:

- використання WWW, e-mail та списків розсилки для того, щоб зацікавити потенційного клієнта;
- використання e-mail та FTP на початковій стадії співпраці, для первинного, пробного налаштування під конкретне підприємство та демонстрації всього спектра можливостей розробленої системи.

Прикладний аспект має на увазі:

- використання on-line та off-line режимів роботи в мережі Internet для надання клієнтам послуг наступного типу: налаштування та експлуатацією системи проводиться розробником, а клієнт лише надає інформацію та отримує конкретні рекомендації щодо подальшої фінансової діяльності;
- використання WWW, e-mail та FTP для своєчасного оновлення даних, необхідних для налаштованої системи (при розвиненій інфраструктурі підприємства та великому розкиді окремих структурних підрозділів підприємства), та оперативного коригування параметрів системи за відповідних змін у законодавстві, веденні бухгалтерського обліку тощо.

Серед вигоди, яку приносить Internet, підприємства найчастіше виділяють такі: отримання оперативної інформації (83%), знаходження нових партнерів (58,3%), зміцнення відносин із партнерами (40,5%), збільшення обсягу продажу (40,5%) , швидке реагування зміну ринкових умов (38%).

Проте, за всієї здається вигоді використання Internet, існує низка проблем. Використання Internet для підприємства, зазвичай, пов'язані з цілим комплексом складних питань. Якщо ці питання вирішуються недостатньо продумано, то можуть виникнути неприємні наслідки, серед яких відсутність контролю доступу в Internet, різні загрози безпеці, надмірні витрати з оплати Internet-трафіку.

Першою проблемою є можливі комп'ютерні атаки інших комп'ютерів. Використання реальних IP-адрес на комп'ютерах користувачів призводить до того, що зловмисники можуть зламати комп'ютери та отримати доступ до даних підприємства.

Наступна проблема, часто пов'язана з несумлінними користувачами, які можуть передати секретні дані підприємства через мережу Internet. При цьому вони можуть вийти в Internet під чужим ім'ям з іншого комп'ютера або використовувати анонімно Internet в особистих цілях. Подібну ситуацію неможливо виявити стандартними засобами.

Також багато співробітників підприємства можуть використовувати наданий доступ до мережі в особистих цілях: завантаження музики, фільмів, прослуховування радіо, відвідування сайтів знайомств, пошуку інформації в корисливих цілях, спілкування в різних чатах, з використанням ICQ-програм. Це негативно впливає на робочий процес і призводить до непотрібних витрат.

Крім того, при роботі з серверами підприємства з віддалених офісів, під час відрядження або з дому дані передаються у відкритому вигляді і можуть бути перехоплені зловмисниками. Існує також велика загроза зараження операційними системами вірусами з мережі.

Безумовно, використання послуг Internet дозволяє оптимізувати багато функцій організації. Але при цьому підключення доступу Internet має бути обґрунтованим, повинні бути виділені які саме послуги будуть використані на підприємстві. Для небажаних витрат трафіку, а також захисту комп'ютерів від вірусних атак повинні бути відключені непотрібні послуги, а також необхідний чіткий контроль за діями працівників у мережі. Крім того, Internet-послуги мають бути доступні для кожного підприємства. За дотримання цих умов, використання Internet принесе вигоду підприємству і позбавить додаткових витрат.

Тема 4. Інноваційні технології

Лекція 4.1(4) Скорочення тривалості виробничого циклу. Проектування нових видів продукції та обладнання для їх виготовлення. Принципи оцінки інноваційних проєктів. Теорія інноваційних процесів. Ризики інноваційних проєктів

4.1 Скорочення тривалості виробничого циклу

Одним із засобів скорочення тривалості виробничого циклу є одночасне виконання всіх або деяких операцій технологічного процесу виготовлення продукції)¹⁶. Це визначається видом поєднання операцій та порядком передачі предмета праці від одного робітника до іншого. Операція – частина процесу виробництва, що виконується на одному робочому місці, що складається з низки дій над одним об'єктом виробництва (деталлю, вузлом, виробом) одним або декількома робітниками. Розрізняють такі види поєднання операцій:

- послідовний;
- паралельний;
- паралельно-послідовний (змішаний).

Послідовний вид поєднання операцій характеризується тим, що на кожній операції деталі обробляються партією, передача партії на наступну операцію починається не раніше, ніж буде закінчено оброблення всіх деталей на попередній операції. Тривалість технологічної частини виробничого циклу виготовлення деталей при застосуванні цього виду дорівнює часу обробки однієї деталі усім операціям, помноженому на число деталей партії. Розрахунок технологічної частини виробничого циклу виготовлення деталей представлений на графіку (рис. 4.1).

Послідовний вид поєднання операцій застосовується у тих випадках, коли на ділянці обробляється велика номенклатура продукції, з різною технологією та різним завантаженням верстатів та агрегатів. Цей вид поєднання операцій застосовується особливо в одиничному та дрібносерійному виробництві.

Паралельний вид поєднання операцій характеризується тим, що обробка деталей провадиться одночасно на всіх операціях. Передача предметів праці з операції операцію проводиться поштучно. Розрахунок технологічної частини виробничого циклу виготовлення деталей при паралельному вигляді поєднання операцій представлений на графіку (рис. 4.2).

¹⁶ URL : <http://um.co.ua/2/2-3/2-3500.html>

Паралельний вид поєднання операцій найбільш ефективний при виробництві однорідних виробів за рівності та кратності операцій. Він забезпечує «короткий» цикл виробництва, рівномірне завантаження та найкраще використання обладнання та робітників. Паралельний вид поєднання операцій широко поширений у масовому та великосерійному виробництві.

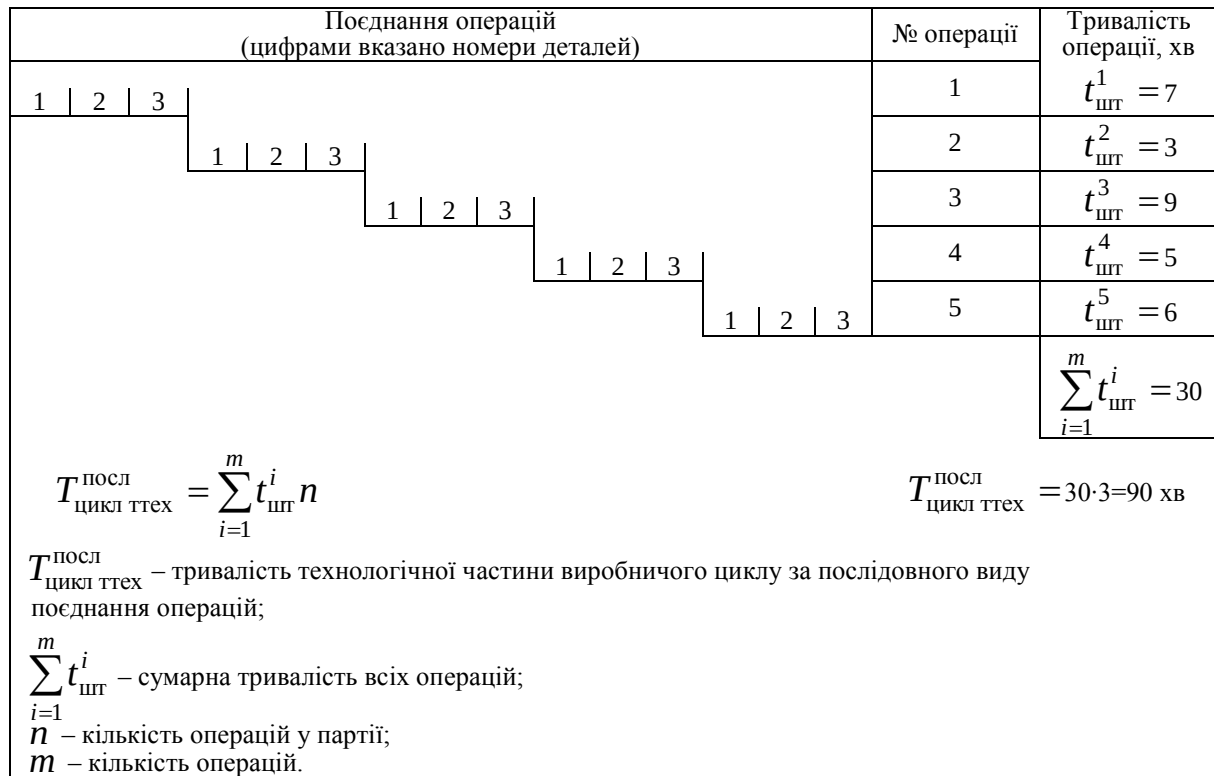


Рис. 4.1. Графік технологічної частини виробничого циклу за послідовного виду поєднання операцій

Послідовно-паралельний (змішаний) вид поєднання операцій характеризується тим, що застосовується на прямопоточних лініях в умовах різнократної тривалості цих операцій та нерівномірної передачі продукції з операції на операцію. Передача предметів праці при даному виді поєднання операцій проводиться з «довгої» операції на «коротку» – партіями, а з «короткої» на «довгу» – поштучно. Розрахунок технологічної частини виробничого циклу виготовлення деталей за змішаного виду комбінації операцій представлений на графіку (рис. 4.3).

Змішаний вид поєднання операцій доцільно застосовувати під час випуску однорідної продукції на ділянках з нерівномірною потужністю обладнання та частковою синхронізацією операцій.

Зазначимо, що формули для розрахунку технологічної частини виробничого циклу виготовлення деталей при змішаному вигляді поєднання операцій (а іноді при паралельному) не завжди застосовні. І тут необхідно користуватися графічним чи розрахунковим способом визначення тривалості виробничого циклу.

Поєднання операцій (цифрами вказано номери деталей)							№ операції	Тривалість операції, хв
1	2	3					1	$t_{шт}^1 = 7$
	1	2	3				2	$t_{шт}^2 = 3$
		1	2	3			3	$t_{шт}^3 = 9$
			1	2	3		4	$t_{шт}^4 = 5$
				1	2	3	5	$t_{шт}^5 = 6$
							$\sum_{i=1}^m t_{шт}^i = 30$	
							$T_{цикл\ ттех}^{парал} = 30 + (3-1)9 = 48 \text{ хв}$	

$T_{цикл\ ттех}^{парал} = \sum_{i=1}^m t_{шт}^i + (n-1)t_{нд}$

$T_{цикл\ ттех}^{парал}$ – тривалість технологічної частини виробничого циклу за паралельного виду поєднання операцій;

$\sum_{i=1}^m t_{шт}^i$ – сумарна тривалість всіх операцій; $t_{нд}$ – тривалість найдовшої операції;

n – кількість операцій у партії;

m – кількість операцій.

Рис. 4.2. Графік технологічної частини виробничого циклу за паралельного виду поєднання операцій

Поеднання операцій (цифрами вказано номери деталей)										№ операції	Тривалість операції, хв
1	2	3								1	$t_{шт}^1 = 7$
	1	2	3							2	$t_{шт}^2 = 3$
				1	2	3				3	$t_{шт}^3 = 9$
					1	2	3			4	$t_{шт}^4 = 5$
						1	2	3		5	$t_{шт}^5 = 6$
										$\sum_{i=1}^m t_{шт}^i = 30$	
$T_{цикл\ ттех}^{зміш} = \sum_{i=1}^m t_{шт}^i + (n-1)(t_{дов} - t_{кор})$										$T_{цикл\ ттех}^{зміш} = 30 + (3-1)(22-8) = 58 \text{ хв}$	
$T_{цикл\ ттех}^{зміш}$ – тривалість технологічної частини виробничого циклу за змішаного виду поєднання операцій; $\sum_{i=1}^m t_{шт}^i$ – сумарна тривалість всіх операцій; $t_{дов}$ – тривалість найдовших операцій; $t_{кор}$ – тривалість найкоротших операцій; n – кількість операцій у партії; m – кількість операцій.											

Рис. 4.3. Графік технологічної частини виробничого циклу за змішаного виду поєднання операцій

4.2 Проектування нових видів продукції та обладнання для їх виготовлення

Поява нового товару у виробництві та на ринку є, як правило, результатом цілеспрямованої інноваційної діяльності, головне завдання якої полягає у створенні та розповсюдженні інновацій)¹⁷. Поняття «інновації» відноситься до широкого кола нововведень у різних сферах виробництва та обігу товарів: новим продуктам або послугам, способам їх виробництва, нововведенням в організаційній, фінансовій або сервісній сферах, будь-яким удосконаленням, що забезпечує економію витрат або створює умови для такої економії. Найважливішою ознакою інновацій у ринкових умовах є покращення споживчих властивостей нового товару з метою забезпечення та підтримки на високому рівні конкурентоспроможності підприємства. Під інноваціями розуміється кінцевий результат інноваційної діяльності як нового чи вдосконаленого продукту, реалізованого над ринком, нового чи вдосконаленого технологічного процесу, що у практичній діяльності. Інновація вважається здійсненою, якщо інноваційний продукт освоєно у виробничому процесі або впроваджено на ринок.

У практиці функціонування організацій у різних галузях виробництва, постачання, збутової та управлінської діяльності здійснюється велика різноманітність інновацій. Принципове значення змісту інноваційного процесу має предметна область інноваційної діяльності. Відповідно до цієї ознаки прийнято розрізняти інновації, пов'язані з розвитком:

- продуктів,
- технологій,
- сировини та матеріалів,
- елементів систем керування,
- ринків реалізації продукції та послуг.

Продуктові інновації, що передбачають створення нових або удосконалення продуктів, що випускаються, є типом інновацій найбільш поширеним і важливим для забезпечення конкурентоспроможності виробничого підприємства.

Створення нових продуктів, що володіють високими технічними, споживчими та економічними параметрами, є дуже складним процесом, що вимагає значних витрат часу та ресурсів, залучення великої кількості як зовнішніх, так і внутрішніх виконавців, що тісно пов'язаний з усіма іншими сферами діяльності підприємства.

Можна виділити три основні фази інноваційного процесу:

- дослідницька фаза чи формування концепції продукту;

¹⁷ URL :

https://pidru4niki.com/19520317/menedzhment/osoblivosti_rozrobki_produktu_viboru_tehnologichnogo_protse_su_virobnichiy_sferi

проектування нового товару;

- освоєння виробництва нового продукту та просування його на ринок.

На першій фазі – фазі формування концепції продукту проводиться комплексний аналіз економічної та науково-технічної інформації про можливий попит на нову продукцію, ситуації на ринках, конкурентних позиціях інших виробників, наукові та технічні можливості та обмеження у розвитку продукту, економічному та науково-технічному потенціалі підприємства. Основними інструментами такого аналітичного дослідження виступають інструменти та методи інноваційного маркетингу у поєднанні з методами науково-технічного прогнозування. Результатом першої фази інноваційного циклу має стати висновок про економічну доцільність, технічну можливість та основні параметри нового продукту. Сукупність цих висновків прийнято називати концепцією товару.

На другій фазі інноваційного процесу здійснюється власне проектування нового продукту. Основне завдання цієї фази полягає в детальному інженерному опрацюванні нового виробу. Вона включає проведення необхідних досліджень, виконання дослідно-конструкторських розробок, виготовлення та випробування дослідних зразків нової продукції та розробку детальних креслень для її виготовлення. На фазі проектування продукту закладаються рівень його конкурентоспроможності та тривалість життєвого циклу. Саме на цій фазі інноваційного процесу визначаються економічні та організаційні параметри майбутнього виробництва.

Третя фаза інноваційного процесу – фаза освоєння виробництва та просування нового продукту ринку полягає у проведенні комплексу робіт з проектування нового виробництва, починаючи з його технічної підготовки, організаційного проектування виробничих процесів і включаючи нарощування виробництва, досягнення проектної потужності та заданої собівартості. Інноваційний процес завершують роботи з просування нового продукту ринку і пов'язана з цим дистриб'юторська діяльність підприємства.

Кожна з перерахованих фаз інноваційного процесу включає виконання щодо самостійних стадій створення та проектування нового продукту. Ці стадії можуть виконуватись у часі послідовно або паралельно один одному. Для підприємства важливим є максимально можливе скорочення тривалості інноваційного процесу. Це важливо з точки зору конкуренції і з метою скорочення інвестиційних потреб. Останнім часом широко поширюється практика прискореного проектування на основі суміщення окремих фаз та стадій інноваційного процесу, що отримала назву суміщеного проектування (Concurrent Engineering, CE). Принцип суміщеного проектування використовується, як правило, на фірмах, що здійснюють неодноразові масштабні інноваційні проекти, спрямовані на

оновлення асортименту продукції, що розвивається, розвиток технології та організації виробництва, розширення ринків збуту продукції. У цих умовах з'являється можливість формувати стійкі групи фахівців, які тісно взаємодіють між собою і в рамках міжпроектної координації та інтеграції. Як правило, технічною та організаційною основою такої інтеграції є внутрішньофірмова типізація та стандартизація процесів та вузлів, що дозволяє використовувати принципи модульного проектування для створення нових або модернізації наявних зразків продукції.

Інноваційні процеси є вкрай специфічними об'єктами управління, що вимагають використання спеціальних прийомів і методів підготовки та обґрунтування управлінських рішень. Їхня специфіка проявляється в такому:

- комплексний характер процесу, що передбачає необхідність виконання великої кількості взаємозалежних різнорідних робіт - від проведення досліджень до просування нового товару ринку;
- низький рівень технологічної регламентації процесу внаслідок його одноразовості та не повторюваності;
- невизначений, імовірнісний характер процесу та пов'язані з цим ризики його учасників;
- персоніфікований характер творчої праці учасників процесу, що визначає високий рівень залежності кінцевих результатів від індивідуальних умов та потенційних здібностей виконавців;
- високі темпи морального старіння науково-технічної інформації, отриманої внаслідок творчого процесу;
- нематеріальний у багатьох випадках характер кінцевих та проміжних результатів праці, що виражаються у новій науково-технічній інформації, складність що виникають в інноваційному процесі відносин власності.

У рамках однієї організації одночасно, як правило, здійснюється не один, а кілька інноваційних проектів з різних виробів або видів діяльності. Усі вони незалежно від конкретного змісту взаємопов'язані між собою, оскільки конкурують за ресурсами, часто спрямовані заміну вже освоєних у виробництві товарів.

Розвиток сучасного виробництва конкурентоспроможної продукції немислимо без масштабних, орієнтованих довгостроковий період наукових досліджень про. Наука створює для постійного прогресу в галузі техніки, що випускається, і використовуваної у виробництві технології нові наукові знання, відкриття нових законів і закономірностей, явищ у природі та техніці з'являються як результат наукових досліджень, що становлять початкову стадію процесу створення нової продукції.

Науково-дослідні роботи (НДР) – це цілеспрямована діяльність, що має своїм завданням створення нової інформації про об'єкти, явища або процеси, що відбуваються в природі, суспільстві або техніці. Залежно від цілей, змісту та характеру результатів розрізняють:

- фундаментальні дослідження;
- пошукові дослідження;
- прикладні дослідження.

Фундаментальні дослідження, як правило, мають найбільш загальний та абстрактний характер. Вони спрямовані на розширення знань та розуміння найбільш загальних закономірностей, що діють у природі, техніці та суспільстві, без проникнення в галузі їх конкретного застосування. На основі результатів фундаментальних досліджень визначаються науково-технічні проблеми пошукового та прикладного характеру, вирішення яких сприяє створенню нової техніки. Фундаментальні дослідження мають яскраво виражений індивідуальний характер та відрізняються найбільшою невизначеністю змісту та структури наукового процесу. Вони важко піддаються управлінському регулюванню. Вони дуже важливий індивідуальний підхід, що враховує персоніфікований характер праці та високий рівень залежності процесу результатів дослідження від індивідуальних схильностей і здібностей дослідників.

Пошукові дослідження виконуються, як правило, на базі отриманих результатів фундаментальних досліджень та спрямовані на створення наукового доробку з метою його подальшого використання у прикладних розробках. Необхідність у пошукових дослідженнях виникає за відсутності ясності у бік використання отриманих даних, можливих способів їх трансформації на вирішення наукових і технічних проблем. Головні завдання пошукових досліджень полягають у:

- вивченні можливості застосування відомих чи знову відкритих явищ та закономірностей для створення нової техніки, технології чи матеріалів;
- оцінка та прогнозування розвитку окремих напрямів науки, техніки та технології;
- пошук сфер, областей та вивчення умов застосування нових рішень та відкриттів (так звані аплікаційні дослідження).

Результатом пошукових досліджень є нові напрями конструювання, нові підходи до вирішення традиційних завдань, нові види технологій та способи управління виробничими процесами. Цілі та завдання пошукових досліджень формулюються конкретніше, ніж у фундаментальних роботах. Зміст процесу та очікувані результати відрізняються більшою спрямованістю на конкретні практичні потреби. Планування та організація пошукових робіт характеризуються меншою невизначеністю.

Прикладні дослідження спрямовані на вирішення конкретних науково-технічних та організаційно-економічних проблем, пов'язаних із виконанням подальших проектних розробок. Прикладні дослідження виконують завдання технічного та економічного обґрунтування можливості, доцільності, а також шляхів проектування нового продукту.

Прикладні дослідження включають:

- пошук шляхів покращення існуючих конструкцій, технологій чи матеріалів з метою підвищення конкурентоспроможності продуктів;
- для постійного прогресу в галузі техніки, що випускається і використовуваної у виробництві технології. Нові наукові знання, відкриття нових законів та закономірностей, явищ у природі та техніці з'являються як результат наукових досліджень, що становлять початкову стадію процесу створення нової продукції.
- визначення способів використання нових досягнень науки і техніки для створення нової конкурентоспроможної продукції;
- проведення аналітичних робіт з узагальнення досвіду конкурентів та дослідження ринкової кон'юнктури;
- виконання модельних розробок, проведення експериментальних та випробувальних робіт.

Виконання прикладних досліджень, як правило, пов'язане з великими обсягами експериментальних та випробувальних робіт з конкретних об'єктів нової техніки. Цей вид досліджень безпосередньо орієнтований створення певних зразків продукції чи технологій. За цією ознакою прийнято розрізняти чотири групи прикладних досліджень, спрямованих на створення:

- технічних об'єктів (машин, приладів тощо);
- технологій;
- видів матеріалів;
- способів та систем управління.

Дослідно-конструкторські розробки, що виконуються у певній галузі техніки, на відміну від науково-дослідних робіт характеризуються досить стійким складом стадій, етапів та робіт. Технологія їх проведення, прийоми інженерних розробок та розрахунків регламентуються, як правило, спеціальними галузевими або внутрішньофірмовими нормативними документами, заснованими на розробленій у країні системі державних стандартів, що визначають склад етапів ДКР, порядок їх проведення та вимоги до оформлення документації. Комплекс робіт із конструювання нового продукту зазвичай включає три відносно самостійні стадії ДКР:

- підготовчу;
- розроблення проектної документації;

– розробку робочої документації.

На підготовчій стадії конструювання нового продукту обґрунтовується необхідність його створення та погоджується склад його основних техніко-економічних параметрів. На цій стадії вивчається ринкова ситуація, проводяться маркетингові дослідження, аналізується та прогнозується попит на новий продукт, встановлюються технологічні обмеження на умови виробництва нового продукту. Результати розрахунків і погоджень відображаються у технічному завданні (ТЗ), що затверджується, на розробку. На підготовчій стадії здійснюється регламентація процесу виконання проекту: визначення складу етапів та робіт, послідовності та календарних термінів їх виконання, встановлення складу виконавців та розподіл завдань між ними, виявлення контрагентів та планування кооперації. Планування та організація робіт за проектом включає визначення організаційної форми проведення робіт (самостійно чи сторонньою організацією), формування робочих груп, складання календарних графіків робіт за проектом, розрахунок потрібних ресурсів та їх забезпечення тощо.

Розробка проектної документації передбачає виконання комплексу робіт, що визначають концептуальні рішення щодо нового продукту: вибір принципу дії, загальне компонування продукту, вимоги до складу вузлів та функціональних блоків, інженерний та вартісний аналіз функціональної структури продукту, проведення експериментальних робіт та випробувань окремих вузлів та компонувальних рішень та т. п. Ця стадія проектування продукту включає виконання етапів розробки технічної пропозиції, ескізного проекту та технічного проекту. Завершення кожного з перерахованих етапів супроводжується, як правило, підготовкою відповідної проектної документації, проведенням погоджень із замовником щодо досягнутих проміжних результатів.

На стадії розробка робочої документації завершується проектування нового товару і здійснюється підготовка комплексу конструкторської документації, яка потрібна на матеріального здійснення проектованого изделия. Робочий проект передбачає найповнішу деталізацію розроблюваної конструкції, що забезпечує можливість виготовлення, контролю та приймання окремих деталей та вузлів, а також складання, випробування та експлуатації продукту у споживача. Робоча документація включає підготовку робочих креслень деталей, складальних одиниць та вузлів виробу, виробничої та експлуатаційної документації (паспорт виробу, опис для користувача, інструкція з експлуатації, документи сервісного обслуговування, гарантійна документація та ін.). Під час проведення інженерних розрахунків обґрунтовується вибір системи допусків, перевіряються розмірні ланцюги, оптичні, механічні, електричні

та інші параметри, характеристики окремих деталей та вузлів. Специфікації складаються у вигляді спеціальних відомостей деталей та вузлів виробу, а також можуть бути представлені у графічній формі, що відображає ієрархічну структуру побудови виробу.

Головне завдання ДКР полягає у забезпеченні високого науково-технічного рівня створюваного продукту та його конкурентоспроможності на ринку. Тому в процесі проектування продукту на різних стадіях його створення здійснюється розрахунок та уточнення параметрів науково-технічного рівня. Показники науково-технічного рівня виступають як основні критерії при формуванні тематичних планів НДР та ДКР в організаціях.

4.3 Принципи оцінки інноваційних проєктів

Оцінка інноваційних проєктів базується на низці основних принципів, що включають)¹⁸:

- тимчасову вартість грошей;
- оцінку грошових потоків;
- приплив коштів;
- відтік коштів;
- чистий грошовий потік тощо.

Тимчасова вартість грошей. "Гривня сьогодні – це більше ніж гривня завтра" – ось образний вираз цього принципу. Така постановка питання справедлива тому, що отримана сьогодні гривня може бути інвестована і завтра разом з отриманим доходом перетворитися на велику суму. Тому однакові грошові суми, одержувані чи сплачувані у різні періоди, є еквівалентними. Для зіставлення різночасних вартісних величин між собою (алгебраїчного додавання) необхідно їх приведення до єдиного моменту часу. Приведення може здійснюватися до останнього, початкового або проміжного часу. Загальноприйнятою точкою приведення є нульова точка. Оцінка грошових потоків. У процесі інвестиційного аналізу враховуються реальний рух коштів, їх припливу та відтоку.

Приплив коштів – надходження від реалізації проєкту.

Відтік коштів – виплати коштів, пов'язані з розробкою та реалізацією проєкту.

Чистий грошовий потік – різниця між припливом і відпливом коштів. Релевантність грошових потоків. Необхідно враховувати ті грошові потоки, пов'язані з цим проєктом. При цьому важливо правильно врахувати безповоротні витрати, альтернативні витрати та вплив цього інвестиційного проєкту на інші проєкти.

¹⁸ URL : <https://studfile.net/preview/2912494/page:45/>

Розгляд усіх доступних альтернатив. При визначенні ефективності даного інвестиційного проекту слід порівнювати його грошові потоки не з одним альтернативним, найчастіше найгіршим варіантом, а з різними варіантами інвестування.

Справедлива оцінка активів. При визначенні справедливої вартості активу враховується сучасна вартість майбутніх грошових потоків, які створюватиме цей актив. Ця вартість має зіставлятися з витратами його створення. Інвестиції у створення або придбання активу будуть ефективними, якщо вони виявляться не вищими від суми сучасних цін майбутніх грошових потоків.

Комплексність. Необхідно розглядати весь комплекс факторів, що впливають на ефективність проекту. Це: різні учасники проекту, які мають різні інтереси; фактори зовнішнього середовища: економічна кон'юнктура, законодавство, особливості регіону дислокації проекту та ставлення до нього місцевої влади; екологічні фактори та ін.

Системність. Як правило, інвестиційний проект є елементом більшої виробничої системи, наприклад, підприємства. Тому важливо зрозуміти, як інвестиційний проект адаптується в цій системі, чи матиме місце відторгнення проекту або його прийняття.

Верифікація. Розрахунки, проведені для оцінки ефективності проекту, мають бути з можливістю перевірки. Потрібно передбачити можливість проведення незалежної експертизи проекту.

Облік ризику та багатоваріантність. Показники проекту, отримані у його оцінки, носять імовірнісний характер. Це означає, що у процесі здійснення проекту матимуть місце відхилення від оцінних значень. Тому важливо провести розрахунки за різними варіантами та умовами реалізації проекту. У цьому слід оцінити чинники, які визначають негативні відхилення планових характеристик.

4.4 Теорія інноваційних процесів

Проблема інноваційного розвитку – предмет пильної уваги економістів)¹⁹. Складність проблеми викликала до життя різні концепції, кожна з яких наголошує на дослідженні того чи іншого її аспекту. Зрештою з цих концепцій сформувалася теорія інноваційних процесів, чи інноватика.

Інноватика – це сфера науки, що вивчає закономірності розвитку інноваційних процесів.

Практики різних рівнів – на підприємствах, у міністерствах та відомствах, регіональних адміністраціях – займаються питаннями організації інноваційних процесів у межах своєї компетенції. Тією чи іншою

¹⁹ URL : https://stud.com.ua/934/investuvannya/teoriya_innovatsiy_suchasni_kontseptsiiyi

мірою вони є інноваційними менеджерами, а рід їхньої діяльності належить до інноваційного менеджменту.

Інноваційний менеджмент - це організація та планування (включаючи мотивацію та контроль) процесів розробки та впровадження нововведень на об'єктах різних рівнів, спрямовані на досягнення інноваційних цілей цих об'єктів. Інноваційні цілі – це частина загальної системи цілей. Вони пов'язані з потребою оновлення процесів, що відбуваються в організації.

Узагальнення наявних концепцій дозволяє виділити такі складові інноватики, пов'язані з дослідженням:

- формування нововведень та пошуку інноваційних рішень;
- технологічного прогнозування;
- сприйнятливості до нововведень та опору нововведенням;
- дифузії (поширення нововведень);
- адаптації до нововведень людини та пристосування їх до її потреб;
- форм організації інноваційної діяльності;
- ринку нововведень;
- інноваційних стратегій;
- конкурентних переваг та стадій розвитку;
- державного регулювання інноваційної діяльності

Розглянемо деякі із зазначених частин інноватики. Поява інноватики бере відлік з того часу, коли наукові знання стали більш менш активно використовуватися в практичній діяльності.

Ще у XVIII ст. французький просвітитель Жан Кондорсе звернув увагу на взаємозв'язок науки та промисловості. Він зазначав, що прогрес наук забезпечує прогрес промисловості, який сам потім прискорює наукові успіхи, і цей взаємний вплив, дія якого відновлюється, має бути зараховано до найбільш діяльних, найбільш могутніх причин вдосконалення людського роду.

Він же вказував на загальність наукових знань, зазначаючи, що "для кожного покоління неминуче зростає та сума знань, яку можна придбати за той самий проміжок часу, з однією і тією ж розумовою силою".

Одним із перших поштовх початку серйозних досліджень інновацій та їх ролі в економічному розвитку дав Н. Кондратьєв. Він безпосередньо не займався інноваційними питаннями, але розгляд ним великих циклів кон'юнктури (довгих хвиль) ініціювало дослідження про причини цих циклів та їх тривалість, як найважливішу з них були визнані інновації.

Ідеї Кондратьєва багато в чому були використані австрійським економістом Йозефом Шумпетером. Без перебільшення можна сказати, що І. Шумпетер, власне, і став родоначальником теорії інноваційних процесів у сучасному її трактуванні.

У роботі "Економічні цикли", що вийшла в 1939 р., він досліджував основні поняття теорії інноваційних процесів. Він розглядає нововведення як зміни у технології та управлінні, як нові комбінації використання ресурсів. Під розвитком у цьому розуміється перехід "народного господарства від заданого кожен момент центру тяжіння до іншого".

Сам зміст розвитку, за Й. Шумпетером, визначається поняттям "здійснення нових комбінацій". Спочатку фірми, що реалізують нові комбінації, співіснують зі старими, але рано чи пізно нова комбінація має забрати засоби виробництва у старої комбінації. Нові комбінації - це інше застосування наявних у народному господарстві запасів засобів виробництва.

При цьому Шумпетер приділяв значне місце ролі підприємця в інноваційному процесі. Відповідно до його поглядів підприємець є сполучною ланкою між винаходом та нововведенням. Шумпетер показав значущість кредиту для інноваційної підприємницької діяльності, здійснив періодизацію довгих хвиль.

Значне місце у теорії інноваційних процесів займають концепції, що досліджують формування технологічних систем та дифузії нововведень. Ця концепція розвивається рядом вчених, серед яких можна виділити англійських економістів К. Фрімена, Дж. Кларка та Л. Суйте. Вони запроваджують поняття технологічної системи як системи взаємозалежних сімейств технічних і соціальних нововведень. Відповідно до поглядами зазначених економістів темпи економічного зростання залежить від формування, розвитку та старіння технологічних систем. Поширення нововведень розглядається як механізм розвитку технологічної системи, а темпи такого поширення пов'язуються з ринковим механізмом, наявністю відповідних умов та стимулювання.

У сучасних умовах особливого значення набувають концепції регулювання ринку нововведень. Особливості технології як товару пов'язані зі специфікою формування її споживчої вартості та вартості. Вартість технічних нововведень може бути однозначно визначено, оскільки, важко визначити витрати ними з унікальності створеної технології та її одиничного характеру. Врахування витрат на розробку такої технології не завжди має сенс, а по-третє, технології такого роду далеко не завжди розробляються з метою продажу та виходять на ринок вже після "нетоварного" використання. Французький економіст Ф. Бідо, розглядаючи властивості технології як товару, вважає, що: "Обмін є, але немає товарів... Криві попиту та пропозиції в цьому випадку будуть абсолютно штучними...".

Значний внесок у формування конкурентних стратегій зробив американський економіст М. Портер. Широко відома його матриця

стратегії фірми, що пов'язує воедино сфери конкуренції та конкурентні переваги. М. Портер показав, що фірма може досягти конкурентної переваги, здійснюючи виробництво з меншими витратами чи основі диференційованою якістю продукції. Заслужують також на увагу його розробки про параметри глобальної стратегії фірми, детермінант конкурентної переваги країн, стадії розвитку конкуренції.

М. Портер виділяє чотири стадії конкурентоспроможності національної економіки – факторів виробництва, інвестицій, нововведень та багатства.

Кожна із зазначених стадій характеризується специфічним механізмом управління інноваціями та економікою загалом. На стадії факторів виробництва перевага тієї чи іншої країни виражається через природні ресурси, кліматичні умови, надлишкові та дешеві трудові ресурси. У цьому стадії панують прості технології, а прогресивні технології, зазвичай, створюються там. Стадія інвестицій настає тоді, коли національні фірми стають здатними вкладати гроші у купівлю технологічних ліцензій, сучасне ефективне обладнання. Національна економіка при цьому здатна прийняти та покращити зарубіжну технологію. На наступній стадії - стадії нововведень національні фірми здатні покращити іноземну технологію та створити нову. Внутрішній попит при цьому досить об'ємний та різноманітний. Змінюється роль держави, характер її політики – більшої ваги набувають непрямі методи регулювання економіки. На стадії багатства стимулом розвитку є підвищення добробуту, капітали переміщуються до фінансової сфери, знижуються темпи економічного зростання.

Досить розвиненими та багато в чому реалізованими практично є концепції державного регулювання інноваційної діяльності. Можна виділити основні елементи такого регулювання. Виявилися різні підходи до цієї проблеми. Так, країни, які підключилися до процесу розвитку інноваційного сектора пізніше за інших (у 50-70-х рр. ХХ ст. – Японія, Корея та ін.), значною мірою використовували для цього важелі, пов'язані зі стратегічним плануванням. Інші, наприклад США та країни Західної Європи, більший наголос на непряме регулювання інноваційної діяльності.

У першому випадку загальновизнаним відправним моментом системи державного регулювання було визначення середньострокових та довгострокових цілей соціально-економічного розвитку країни. У різних країнах ці цілі природно розрізнялися. Серед найбільш часто зустрічаються формулювань таких цілей можна відзначити досягнення економічної автономії (незалежності), повної зайнятості, неухильного та максимально високого темпу економічного зростання, рух до наміченого покращення життєвих стандартів, створення умов для досягнення достатку у споживанні, забезпечення довгострокового підвищення національного

добробуту, економічного та соціальної гармонії у суспільстві та низку інших.

Сучасні опосередковані методи регулювання передбачають заохочення науково-технічної кооперації, розвиток інноваційної інфраструктури, розробку довгострокових технологічних прогнозів, спрощення процедур створення інноваційних компаній.

Стійкою тенденцією розвитку державного регулювання науково-технічного розвитку є його регіоналізація. У цьому виділяються такі механізми регіонального управління: виділення галузей, що потребують стимулюючих впливів місцевої влади, створення центрів і асоціацій підтримки інноваційного підприємництва, центрів передачі технологій, науково-технічних консорціумів, фінансованих частково місцевою владою, а частково – приватною промисловістю.

4.5 Ризики інноваційних проектів

Інновації та інноваційна діяльність пов'язані зі значним ризиком, оскільки сенс інновацій становлять зміни, які розглядаються як джерело доходу, а процеси і результати змін містять істотну частку елементів невизначеності і спричиненого нею ризику.)²⁰ При цьому раціональна поведінка полягає в тому, щоби не ігнорувати ризик, а належним чином враховувати його для обґрунтування заходів, спрямованих на його попередження, зниження чи компенсацію ризику.

Ризик інноваційного проекту – це міра невпевненості в одержанні очікуваного рівня прибутковості під час реалізації інноваційного проекту в реальних умовах господарювання. Дослідження свідчать, що в середньому з 11 наукових ідей з'являється 2 реальних технічних рішення, 49 рішень забезпечують 4 патенти, 8 патентів – 1 впроваджений у виробництво винахід, а 5 впроваджених винаходів – лише 1 очікуваний комерційний результат.

Загалом в економіці для оцінки ризику переважно використовують імовірнісний підхід. Але високий ступінь невизначеності і ризику інноваційних проектів потребує розробки заходів щодо його зниження, що передбачає наявність точної оцінки не лише величини можливих збитків і ймовірності їх виникнення, а й ступеню вливу окремих чинників на загальний ризик проекту.

Під час ідентифікації необхідно поділяти ризики за масштабністю: ризик, властивий конкретному інноваційному проекту; ризик, притаманний самому підприємству (наприклад, ризик недостатньої

²⁰ URL : <https://infopedia.su/26x1006a.html>, <http://confmanagement.kpi.ua/proc/article/view/231797>

фінансової стійкості); ризик, без якого неможлива діяльність галузі та ринку загалом.

Трапляються ситуації невизначеності для загальної господарської діяльності суб'єкта, а також окремі ризики, властиві лише цьому інноваційному проекту.

Ризики під час реалізації інноваційного проекту можуть виникнути або па стадії продукування та вибору ідеї інноваційного проекту, або вже на стадії безпосередньої розробки та впровадження інноваційного проекту в реальних умовах господарювання. В будь-якому випадку, чим пізніше виявився (ідентифікувався) той чи інший ризик, тим вища імовірність виникнення збитків або тим більшою виявляється не досяжність поставлених цілей.

Основними етапами оцінки ризиків інноваційних проектів є:

- 1) Визначення окремих (елементарних) ризиків реалізації конкретного інноваційного проекту. При цьому необхідно ідентифікувати ризики, які можуть виникнути в будь-який момент здійснення проекту та, за можливості, систематизувати їх.
- 2) Оцінка інформації для визначення рівня окремих проектних ризиків. Інформація щодо зовнішнього середовища функціонування підприємства наявна завжди, проте особі, яка ухвалює рішення щодо доцільності та економічної ефективності певного інноваційного проекту, треба звертати увагу па її достовірність та можливість застосування під час аналізу. Ретроспективні дані використовують за наявності аналогій в інноваційній діяльності минулих років (при цьому умови реалізації та галузь застосування повинні бути схожими). Якщо ж інновація є новітньою для підприємства і її оцінка за рівнем ризиків здійснюється за відсутності будь-яких статистичних даних, то виникає необхідність застосування методів, що використовують інструменти оцінки суб'єктивної вірогідності.
- 3) Вибір та використання відповідних методів оцінки вірогідності окремих проектних ризиків. Аналіз елементарного ризику інноваційного проекту базується па оцінці ризиків, властивих його грошовим потокам (тобто ймовірності відхилення отриманого грошового надходження від запланованого значення). Враховують також рівень кореляції та характер розподілу цих ймовірностей.

Для кількісного оцінювання ризику існують різні методи, серед яких найпоширеніші статистичний (у тому числі метод статистичних випробувань чи метод Монте-Карло); аналітичний; поєднання дерева рішень та імовірнісного підходу; оцінювання фінансової стійкості або оцінювання доцільності витрат; експертних оцінок; нормативний; аналізу

чутливості; використання аналогів тощо. Кожний з названих методів має переваги та недоліки і використовується у конкретних ситуаціях, а універсального методу, прийнятного для всіх випадків, не існує.

- 4) Визначення розміру можливих фінансових наслідків у разі настання ризикової події у зв'язку з реалізацією інновації. Розмір можливих фінансових втрат зумовлюється видом інновації, обсягом залученого інвестиційного капіталу, рівнем ризику, передбаченого цим проектом, а також межею відхилень фактично отримуваного доходу від очікуваного значення.

На підставі отриманих характеристик здійснюють позиціювання проектів відносно можливих фінансових втрат за настання ризикової події за зонами ризиків: без ризикова; припустимого ризику; критичного ризику; катастрофічного ризику.

- 5) Оцінка загального проектного ризику. Загальний рівень ризику конкретного інноваційного проекту теоретично оцінюють як функцію значень рівнів ідентифікованих елементарних ризиків. Сукупність цих ризиків може спричиняти синергетичний ефект, як сприятливий для підприємства, так і руйнівний за умов великого від'ємного значення приведенного чистого доходу від інновацій. При цьому потрібно також враховувати взаємний вплив реалізації інноваційного проекту на зміну дохідності активів підприємства та середньогалузеві доходи від інноваційної діяльності.

- 6) Зіставлення рівня проектного ризику з фінансовими можливостями підприємства. У розпорядженні підприємства повинно бути достатньо коштів не лише для реалізації певного інноваційного проекту, а й для страхування від імовірного настання тих чи інших ризикових подій, які ставитимуть під сумнів можливість отримання прибутку від інновацій. Але витрати на страхування як один із методів фінансування ризику зменшують активи підприємства, які воно могло спрямувати на інновації чи інвестиції та отримати прибуток. Тому треба виважено підходити до розміру ціни страхування, тобто до розміру страхової премії.

- 7) Зіставлення рівня проектного ризику з рівнем дохідності проекту. Основою діяльності будь-якого підприємця є прагнення отримати прибуток, саме тому величина ймовірних втрат повинна бути співрозмірною із величиною отриманого прибутку чи інших конкурентних переваг від впровадження інноваційного проекту.

- 8) Ранжування альтернативних інноваційних проектів за рівнем ризику. Узагальнюючу порівняльну оцінку здійснюють за допомогою двох методів:

- на основі варіації усіх кінцевих показників ефективності проектів від їх середніх значень;
- на основі відхилення пріоритетних для підприємства показників ефективності проекту.

Ризик інноваційного проекту не приймає статичного, абсолютного значення. Його природа така, що він змінює свої характеристики залежно від стадії інноваційного проекту. Тому керівництву підприємства необхідно здійснювати постійний моніторинг процесів впровадження та управління інноваційним проектом для своєчасного виявлення слабких сил та для підготовки механізму ефективного управління ризиками. Найдоступнішим методом зменшення інноваційного ризику є докладне планування та контролювання його етапів.

Ризик інноваційного проекту ніколи не приймає нульового значення, адже середовище, в якому він здійснюється, ніколи не є детермінованим та чітко визначеним. За своєю природою ризик інноваційного проекту є суб'єктивно-об'єктивним. Об'єктивність його визначається притаманною ринковим процесам недостатністю та не повнотою інформації щодо здійснення тих чи інших господарських процесів. Суб'єктивним джерелом виникнення ризику може слугувати неадекватне сприйняття такої інформації особою, що ухвалює рішення, властивість до необґрунтованого ризику як вияв характеру особистості, падання переваги іншому альтернативному інноваційному проекту. Тобто основною при цьому є суб'єктивна оцінка рівня ризику.

РОЗДІЛ 2 НАУКОЄМНИЙ КОМП'ЮТЕРНИЙ ІНЖИНІРИНГ ЯК ОСНОВА СУЧАСНОГО ІНЖИНІРИНГУ ІННОВАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ТА ОБЛАДНАННЯ

Тема 1 Математичні моделі фізичних процесів та обладнання – фундаментальна основа наукоємного комп'ютерного інжинірингу

Лекція 1.1(5) Постановки задач стаціонарної теплопровідності і статичної пружності. Постановка задачі нестационарної теплопровідності. Постановка задачі динамічної пружності з врахуванням великих деформацій та контактної взаємодії механічної природи

5.1 Постановка задачі стаціонарної теплопровідності

Рівняння лінійної стаціонарної теплопровідності з внутрішнім джерелом теплоти для ізотропного тіла можна записати у вигляді)²¹

$$\Delta T(\mathbf{x}) + \frac{q_v}{\lambda} = 0, \quad \mathbf{x} \in \Omega, \quad (5.1)$$

де $\mathbf{x} = x^i \mathbf{e}_i$ – радіус-вектор декартової системи координат (для $i = 1, 2$ маємо двовимірну систему координат (x^1, x^2) , а для $i = 1, 2, 3$ – тривимірну (x^1, x^2, x^3)), м; $\Delta = \nabla^2$ – оператор Лапласа; $\nabla = \mathbf{e}^k \nabla_k \equiv \mathbf{e}^k \frac{\partial}{\partial x^k}$, – оператор

Гамільтона (оператор градієнта); $\mathbf{e}_i, \mathbf{e}^k$ – коваріантний і контраваріантний векторний базис (векторний супровід тензорів), відповідно; T – абсолютна температура, К; q_v – густина внутрішнього джерела теплоти, Вт/м³; λ – коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м·К); Ω – розрахункова область (тверде тіло).

У літературних джерелах рівняння (5.1) у вигляді $\Delta u - b = 0$ або $\nabla^2 u - b = 0$ (де u – деякий потенціал, b – джерельний член) також отримало назву рівняння Пуассона.

Граничні умови (ГУ) для рівняння (5.1) можуть включати в себе ГУ трьох родів:

- I роду – задана температура на границі тіла T_b

²¹ URL : <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/23916>, <http://ela.kpi.ua/handle/123456789/23915>

$$T = T_b; \quad (5.2)$$

- II роду – задано нормальну складову вектора густини теплового потоку

$$\mathbf{n} \cdot (-\lambda \nabla T) = q_n, \quad (5.3)$$

де q_n – нормальна складова вектора густини теплового потоку, що визначається фізичним рівнянням $\mathbf{q} = -\lambda \nabla T$ – законом Фур'є, Вт/м²; $\mathbf{n}$ – вектор зовнішньої нормалі до поверхні тіла; $(\cdot)$ – оператор скалярного добутку векторів;

- III роду – задано конвективні умови теплообміну (закон Ньютона-Ріхмана)

$$\mathbf{n} \cdot (-\lambda \nabla T) = \alpha(T - T_p), \quad (5.4)$$

де α – коефіцієнт тепловіддачі, Вт/(м²·К); T_p – температура оточуючого середовища, К.

Система рівнянь (5.1)–(5.4) є повним математичним формулюванням лінійної стаціонарної задачі теплопровідності ізотропного тіла.

5.2 Постановки задачі статичної пружності

Система стаціонарних диференціальних рівнянь задачі статичної пружності для ізотропного матеріалу включає рівняння руху й рівноваги, геометричне рівняння – тензор малих деформацій та фізичне рівняння – узагальнений закон Гука)²²:

$$\left\{ \begin{array}{l} \nabla \cdot \hat{\boldsymbol{\sigma}} + \rho \mathbf{b} = 0; \\ \hat{\boldsymbol{\varepsilon}} = \frac{1}{2}(\mathbf{u} \nabla + \nabla \mathbf{u}); \\ \hat{\boldsymbol{\sigma}} = \frac{E}{1+\nu} \left(\hat{\boldsymbol{\varepsilon}} + \frac{\nu}{1-2\nu} \hat{\mathbf{I}} \text{tr}(\hat{\boldsymbol{\varepsilon}}) \right), \end{array} \right. \quad \text{або} \quad \left\{ \begin{array}{l} \sigma_{ij,j} + \rho b_i = 0; \\ \varepsilon_{ij} = \frac{1}{2}(u_{i,j} + u_{j,i}); \\ \sigma_{ij} = \frac{E}{1+\nu} \left(\varepsilon_{ij} + \frac{\nu}{1-2\nu} \delta_{ij} \varepsilon_{kk} \right), \end{array} \right. \quad (5.5)$$

²² URL : <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/23916>, <http://ela.kpi.ua/handle/123456789/23915>

де $\nabla = \mathbf{e}_j \frac{\partial}{\partial x_j}$, $i, j = 1, 2, 3$ – оператор Гамільтона, м^{-1} ; $\mathbf{x} = x_i \mathbf{e}_i$, $i = 1, 2, 3$ – радіус-вектор декартових координат, м ; $(\cdot)$ – оператор скалярного добутку тензорів; $\hat{\boldsymbol{\sigma}} = \sigma_{ij} \mathbf{e}_i \mathbf{e}_j$, $i, j = 1, 2, 3$ – симетричний тензор напруження другого рангу, Па;

$$\nabla \cdot \hat{\boldsymbol{\sigma}} = \mathbf{e}_j \frac{\partial}{\partial x_j} \cdot (\sigma_{ij} \mathbf{e}_i \mathbf{e}_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} (\sigma_{ij} \mathbf{e}_i (\mathbf{e}_j \cdot \mathbf{e}_j)) = \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} \mathbf{e}_i = \sigma_{ij,j} \mathbf{e}_i, \quad i, j = 1, 2, 3 \quad -$$

частинна похідна від тензора напруження (або скалярний добуток оператора Гамільтона на тензор напруження), Па/м ; $\mathbf{e}_i$, $i = 1, 2, 3$ – основний (коваріантний) векторний базис – векторний супровід тензора; ρ – густина, кг/м^3 ; $\mathbf{b} = b_i \mathbf{e}_i$, $i = 1, 2, 3$ – вектор масових сил, наприклад, гравітаційних, Н/кг ; $\hat{\boldsymbol{\varepsilon}} = \varepsilon_{ij} \mathbf{e}_i \mathbf{e}_j$, $i, j = 1, 2, 3$ – симетричний тензор другого рангу пружних деформацій; $\mathbf{u} = u_i \mathbf{e}_i$, $i = 1, 2, 3$ – вектор переміщень, м ;

$$\nabla \mathbf{u} = \mathbf{e}_j \frac{\partial u_j}{\partial x_j} \mathbf{e}_i = u_{i,j} \mathbf{e}_i \mathbf{e}_j, \quad i, j = 1, 2, 3 \quad - \quad \text{частинна похідна від вектора}$$

переміщення (або тензорний добуток оператора Гамільтона на вектор);
 E – модуль пружності, Па;

$$\nu \text{ – коефіцієнт Пуассона; } \delta_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{при } i = j; \\ 0 & \text{при } i \neq j, \end{cases} \quad - \text{ символ Кронекера.}$$

Граничні умови для (5.5):

– переміщення або защемлення (повинно бути задано хоча б в одній точці на поверхні тіла)

$$\mathbf{u}|_{S_u} = 0 \text{ або } u_i|_{S_u} = 0, \quad i = 1, 2, 3, \quad (5.6)$$

де S_u – поверхня (або точка поверхні), на якій задано переміщення, м^2 ;

– симетрії

$$\mathbf{n} \cdot \mathbf{u}|_{S_{su}} = 0 \text{ або } n_i u_i|_{S_{su}} = 0, \quad i = 1, 2, 3, \quad (5.7)$$

де $\mathbf{n} = n_i \mathbf{e}_i$, $i = 1, 2, 3$ – вектор та компоненти зовнішньої нормалі до поверхні тіла; S_{su} – поверхня симетрії тіла, м^2 ;

– зовнішній тиск

$$(\hat{\boldsymbol{\sigma}} \cdot \mathbf{n}) \cdot \mathbf{n}|_{S_p} = p \text{ або } (\sigma_{ij} n_j) n_i|_{S_p} = p, \quad (5.8)$$

де p – зовнішній тиск, який задано на поверхні S_p , Па;

– зовнішня сила, що прикладена в деякій точці тіла

$$\mathbf{F}_P = \int_{\Delta S_p} \hat{\mathbf{g}} \cdot \mathbf{n} dS \text{ або } F_i^P = \int_{\Delta S_p} \sigma_{ij} n_j dS, \quad (5.9)$$

де $\mathbf{F}_P = F_i^P \mathbf{e}_i$, $i=1,2,3$ – вектор та компоненти зовнішньої сили в точці P , Н; ΔS_p – елементарна площадка поверхні тіла в околі точки P , м²;

– умови контактного типу механічної природи

$$\begin{cases} \mathbf{n}^+ \mathbf{u}^+ + \mathbf{n}^+ \mathbf{u}^- - \delta \leq 0; \\ \{\boldsymbol{\sigma}^{(n)} \cdot \mathbf{n}\} \leq 0; \\ (\mathbf{n}^+ \mathbf{u}^+ + \mathbf{n}^+ \mathbf{u}^- - \delta) \boldsymbol{\sigma}^{(n)} \cdot \mathbf{n} = 0; \\ |\sigma_\tau| \leq -f \boldsymbol{\sigma}^{(n)} \cdot \mathbf{n}; \end{cases} \quad (5.10)$$

де δ – початковий зазор у напрямку нормалі до поверхонь, що контактують, м; $\boldsymbol{\sigma}^{(n)} = \hat{\mathbf{g}} \cdot \mathbf{n}$ – напруження в нормальному напрямку до поверхні контакту (вектор напруження), Па; $\sigma_\tau = \sqrt{|\boldsymbol{\sigma}^{(n)}|^2 + (\sigma_n)^2}$ – тангенціальна складова напруження, Па; $\sigma_n = (\hat{\mathbf{g}} \cdot \mathbf{n}) \cdot \mathbf{n} = \boldsymbol{\sigma}^{(n)} \cdot \mathbf{n}$ – нормальне напруження на поверхні контакту, Па; f – коефіцієнт сухого тертя.

Перша нерівність (5.10) є умовою взаємного непроникнення тіл та пов'язана з силовим співвідношення (друга нерівність (5.10)), оскільки закриття зазору призводить до виникнення контактної тиску. Третє рівняння (5.10) відповідає нульовим контактним напруженням, що викликає роз'єднання контактних тіл. Четверта нерівність описує умови фрикційної взаємодії тіл (поверхневих напружень) у формі закону Амонтона-Кулона.

Система рівнянь (5.5)–(5.10) є повним математичним формулюванням задачі статичної пружності ізотропного твердого тіла.

Співвідношення для визначення запасу міцності, що є необхідним для визначення експлуатаційної придатності вузла або деталі пакувального обладнання.

Еквівалентні напруження σ_{eqvM} за Мізесом визначаються для пластичних тіл за формулами:

$$\sigma_{\text{eqvM}} = \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + (\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + (\sigma_{33} - \sigma_{11})^2 + 6(\sigma_{12}^2 + \sigma_{23}^2 + \sigma_{13}^2)}, \quad (5.11)$$

або

$$\sigma_{\text{eqvM}} = \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}, \quad (5.12)$$

де $\sigma_{ij}, i, j = 1, 2, 3$ – компоненти тензора напруження, Па; $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$ – компоненти вектора головних напружень, Па.

Запас міцності F_s пластичних матеріалів визначається за формулою

$$F_s = \frac{[\sigma_T]}{\sigma_{\text{eqvM}}}, \quad (5.13)$$

де $[\sigma_T]$ – границя текучості матеріалу, Па; σ_{eqvM} – еквівалентне напруження за Мізесом (5.11), (5.12), Па.

Задача (5.5)–(5.10) сформульована для умов виключно механічного навантаження тіла. Однак, на практиці іноді необхідно враховувати ще й температурне навантаження відомим полем температури. Така задача дістала назву лінійної задачі незв'язаної термопружності. При цьому температурні деформації і напруження вважаються початковими.

У випадку незв'язаної термопружної задачі для ізотропного матеріалу узагальнений закон Гука приймає дещо інший вигляд

$$\hat{\sigma} = \hat{C}^4 : (\hat{\epsilon}^e - \hat{\epsilon}^T) \text{ або } \sigma_{ij} = C_{ijkl} (\epsilon_{ij}^e - \epsilon_{ij}^T), \quad (5.14)$$

де $\hat{C}^4 = C^{ijkl} = \mu(\delta_{ik}\delta_{jl} + \delta_{il}\delta_{jk}) + \lambda\delta_{ij}\delta_{kl}$ – тензор 4-го рангу пружності, Па;

$\mu = \frac{E}{2(1+\nu)}$ і $\lambda = \frac{E\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)}$ – коефіцієнти Ламе, Па; $(:)$ – оператор

подвійного скалярного добутку тензорів; $\hat{\epsilon}^e = \epsilon_{ij}^e$ – тензор та компоненти малих пружних деформацій (5.5); $\hat{\epsilon}^T = \alpha(T - T_0)\hat{\mathbf{I}}$ або $\epsilon_{ij}^T = \alpha(T - T_0)\delta_{ij}$ – тензор температурних деформацій; α – коефіцієнт лінійного температурного розширення матеріалу, K^{-1} ; T_0 і T – початкова і поточна абсолютна температура тіла, відповідно, К; δ_{ij} – символ Кронекера.

Рівняння (5.14) дістало назву співвідношення Дюамеля-Неймана.

У разі врахування температурного навантаження для забезпечення однозначності системи диференціальних рівнянь (5.5), (5.14), окрім ГУ (5.6)–(5.10), треба додати прсевдопочаткові умови у вигляді температурного навантаження, яке може бути задано як різниця $T - T_0$ для визначення початкової температурної деформації $\varepsilon_{ij}^T = \alpha(T - T_0)\delta_{ij}$.

5.3 Постановка задачі нестационарної теплопровідності

Рівняння нелінійної нестационарної теплопровідності ізотропного середовища з внутрішніми джерелами теплоти можна записати у вигляді

$$c_p(T)\rho(T)\frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot [\lambda(T)\nabla T(\mathbf{x})] + q_v(T), \quad t > 0, \quad \mathbf{x} \in \Omega, \quad (5.15)$$

де c_p – масова ізобарна теплоємність, Дж/(кг·К); ρ – густина, кг/м³; T – абсолютна температура, К; t – час, с; $\nabla = \frac{\partial}{\partial x_i}$, $i=1,2,3$ – оператор Гамільтона, м⁻¹; x_i , $i=1,2,3$ – компоненти вектора декартових координат, м; λ – коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м·К); $\mathbf{x}$ – радіус-вектор декартової системи координат, м; q_v – об’ємна густина внутрішнього джерела теплоти, Вт/м³; $\Omega \in R^3$ – тривимірна розрахункова область.

Початкові умови для (5.15) в момент часу $t = 0$:

$$T(\mathbf{x})|_{\Omega} = T_0, \quad (5.16)$$

де T_0 – початкова температура, К.

Граничні умови (ГУ) для (5.15) в момент часу $t > 0$ можуть включати ГУ трьох родів:

– I роду – задано температуру T_b на границі Γ_I поверхні Ω

$$T(\mathbf{x})|_{\Gamma_I} = T_b; \quad (5.17)$$

– II роду – задано нормальну складову вектора густини теплового потоку на границі Γ_{II} поверхні Ω

$$q_n|_{\Gamma_{II}} = \mathbf{n} \cdot [-\lambda(T)\nabla T], \quad (5.18)$$

де q_n – нормальна складова вектора густини теплового потоку $\mathbf{q} = -\lambda(T)\nabla T$, Вт/м²; $\mathbf{n}$ – вектор зовнішньої нормалі до поверхні Ω ;
– III роду – задано конвективні умови теплообміну на границі Γ_{III} поверхні Ω

$$\mathbf{n} \cdot [-\lambda(T)\nabla T]_{\Gamma_{III}} = \alpha(T)(T - T_p), \quad (5.19)$$

де α – коефіцієнт тепловіддачі, Вт/(м²·К); T_p – абсолютна температура оточуючого середовища, К.

Система рівнянь (5.15)–(5.19) є повним формулюванням нелінійної нестационарної задачі теплопровідності ізотропного тіла (середовища) з внутрішніми джерелами теплоти.

5.4 Постановка задачі динамічної пружності з врахуванням великих деформацій та контактної взаємодії механічної природи

Систему нестационарних диференціальних рівнянь динамічної пружності, яка включає в себе нестационарне рівняння руху й рівноваги або збереження кількості руху, геометричні нелінійні рівняння та узагальнений закон Гука можна записати у векторній формі через переміщення)²³:

$$\begin{cases} \rho \frac{d^2 \mathbf{u}}{dt^2} = \vec{\nabla} \cdot \boldsymbol{\sigma} + \mathbf{f}; \\ \hat{\boldsymbol{\varepsilon}} = \frac{1}{2} \left(\vec{\nabla} \mathbf{u} + (\vec{\nabla} \mathbf{u})^T + (\vec{\nabla} \mathbf{u})^T \cdot (\vec{\nabla} \mathbf{u}) \right); \\ \hat{\boldsymbol{\sigma}} = \hat{\hat{C}} : \hat{\boldsymbol{\varepsilon}}, \end{cases} \quad (5.20)$$

де $\nabla = \left(\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial z} \right)$ – оператор Гамільтона, м⁻¹; x, y, z – декартові координати, м; $\hat{\boldsymbol{\sigma}}$ – тензор напруження 2-го рангу, Па; $\mathbf{f}$ – вектор об'ємних сил, наприклад, гравітаційних, Па/м; $\hat{\boldsymbol{\varepsilon}}$ – тензор 2-го рангу нелінійних деформацій; $\mathbf{u} = (u_1, u_2, u_3)$ – вектор переміщень, м; $\hat{\hat{C}}$ – тензор 4-го рангу пружних властивостей ізотропного матеріалу, Па; $(:)$ – оператор подвійного (кратного) скалярного добутку двох тензорів.

²³ URL : <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/19011>, <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/23916>, <http://ela.kpi.ua/handle/123456789/23915>

Система диференціальних рівнянь (5.20) включає нестационарний член, тому для неї необхідно записати початкові умови для вектора переміщень в початковий момент часу, $t = 0$

$$\mathbf{u}|_{t=0} = \Phi_u(\mathbf{x}), \quad (5.21)$$

де $\mathbf{x} = x_i, (i = 1, 2, 3)$ – радіус-вектор декартової системи координат.

Для однозначності системи диференціальних рівнянь (5.20) треба також записати граничні умови. Для цього можна скористатись граничними умовами (5.6)–(5.10).

Для числового розв’язання сформульованих задач найбільшого застосування дістав метод скінченних елементів (МСЕ)²⁴.

Лекція 1.2(6) Постановка нелінійної нестационарної термоелектричної задачі. Постановка зв’язаної нелінійної задачі термопружності

6.1 Постановка нелінійної нестационарної термоелектричної задачі

Систему рівнянь зв’язаної нелінійної нестационарної задачі теплоелектропровідності ізотропного середовища (тіла) можна записати у вигляді)²⁵:

$$\begin{cases} \frac{\partial h}{\partial t} = \nabla \cdot [\lambda(T) \nabla T(\mathbf{x})] + \chi(T) |\nabla U|^2 + q_v(T), t > 0; \mathbf{x} \in \Omega, \\ \nabla \cdot [\chi(T) \nabla U] = 0, \end{cases} \quad (6.1)$$

де $h(T) = \int_{T_{\text{ref}}}^T c_p(T) \rho(T) dT$ – явна об’ємна ентальпія, Дж/м³; T_{ref} – абсолютна температура відліку, К; c_p – масова ізобарна теплоємність, Дж/(кг · К); ρ – густина, кг/м³; T – абсолютна температура, К; t – час, с; $\nabla = \frac{\partial}{\partial x_i}$, $i = 1, 2, 3$ – оператор Гамільтона, м⁻¹; x_i , $i = 1, 2, 3$ – декартові координати, м; λ – коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м · К); $\mathbf{x}$ – радіус-вектор декартової системи координат, м; χ – коефіцієнт електропровідності, См/м; U –

²⁴ URL : <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/23916>

²⁵ URL : <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/27528>, <http://ela.kpi.ua/handle/123456789/23915>

електричний потенціал, В; q_v – об’ємна густина внутрішнього джерела теплоти неелектричної природи, Вт/м³; $\Omega \in R^3$ – тривимірна розрахункова область.

Початкові умови для (6.1) в момент часу $t=0$ задаються тільки для нестационарного рівняння теплопровідності:

$$T(\mathbf{x})|_{\Omega} = T_0, \quad (6.2)$$

де T_0 – початкова температура, К.

Граничні умови (ГУ) для рівняння теплопровідності (6.1) в момент часу $t > 0$ можуть включати ГУ трьох родів:

- I роду або Дирихле – задана температура T_b на границі Γ_{TI} частини поверхні Ω

$$T(\mathbf{x})|_{\Gamma_{TI}} = T_b; \quad (6.3)$$

- II роду або Неймана – задана нормальна складова вектора густини теплового потоку на границі Γ_{TII} частини поверхні Ω

$$q_n|_{\Gamma_{TII}} = \mathbf{n} \cdot [-\lambda(T)\nabla T], \quad (6.4)$$

де q_n – нормальна складова вектора густини теплового потоку $\mathbf{q} = -\lambda(T)\nabla T$, Вт/м²; $\mathbf{n}$ – вектор зовнішньої нормалі до поверхні Ω ;

- III роду – задані конвективні умови теплообміну на границі Γ_{TIII} частини поверхні Ω

$$\mathbf{n} \cdot [-\lambda(T)\nabla T]|_{\Gamma_{TIII}} = \alpha(T)(T - T_p), \quad (6.5)$$

де α – коефіцієнт тепловіддачі, Вт/(м²·К); T_p – абсолютна температура оточуючого середовища, К.

ГУ квазістационарного рівняння електропровідності (6.1) в момент часу $t > 0$ можуть включати ГУ двох типів:

- Дирихле – задано нульовий електричний потенціал на границі Γ_{UI} частини поверхні Ω

$$U(\mathbf{x})|_{\Gamma_{UI}} = 0; \quad (6.6)$$

- Неймана – задана нормальна складова вектора густини електричного струму на границі $\Gamma_{U \Pi}$ частини поверхні Ω

$$j_n|_{\Gamma_{U \Pi}} = \mathbf{n} \cdot [-\chi(T) \nabla U], \quad (6.7)$$

де j_n – нормальна складова вектора густини електричного струму, А/м².

Система рівнянь (6.1)–(6.7) є повним формулюванням зв'язаної нелінійної нестационарної термоелектричної задачі для ізотропного середовища.

6.2 Постановка зв'язаної нелінійної задачі термопружності

Система диференціальних рівнянь зв'язаної задачі лінійної термопружності для твердого середовища в наближенні малих деформацій включає такі рівняння: збереження кількості руху, збереження енергії, фізичне рівняння у вигляді узагальненого закону Гука, геометричні рівняння для тензорів пружних та температурних деформацій, рівняння для швидкості деформації)²⁶:

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho \dot{\mathbf{v}} = \vec{\nabla} \cdot \hat{\boldsymbol{\sigma}} + \rho \mathbf{F}; \\ C_v \frac{\partial T}{\partial t} = \hat{\boldsymbol{\sigma}} : \dot{\hat{\boldsymbol{\varepsilon}}} + \vec{\nabla} \cdot (\lambda \vec{\nabla} T) + q_v; \\ \hat{\boldsymbol{\sigma}} = \hat{\hat{C}} : (\hat{\boldsymbol{\varepsilon}}^e - \hat{\boldsymbol{\varepsilon}}^T); \\ \hat{\boldsymbol{\varepsilon}} = \frac{1}{2} \left(\vec{\nabla} \mathbf{u} + (\vec{\nabla} \mathbf{u})^T \right) = \hat{\boldsymbol{\varepsilon}}^e - \hat{\boldsymbol{\varepsilon}}^T; \\ \hat{\boldsymbol{\varepsilon}}^T = \beta (T - T_0) \hat{\mathbf{g}}; \\ \dot{\hat{\boldsymbol{\varepsilon}}} = \frac{d\hat{\boldsymbol{\varepsilon}}}{dt}, \end{array} \right. \quad (6.8)$$

де ρ – густина, кг/м³; $\mathbf{v} = v^i \mathbf{e}_i$ – вектор швидкості $\left(\mathbf{v} = \frac{d\mathbf{u}}{dt} \right)$, м/с; $\dot{\mathbf{v}} = \frac{d\mathbf{v}}{dt}$ –

вектор прискорення, м/с²; t – час, с; $\vec{\nabla} = \mathbf{e}^s \frac{\partial}{\partial x^s}$ – оператор Гамільтона, м⁻¹;

$\hat{\boldsymbol{\sigma}} = \sigma^{ij} \mathbf{e}_i \mathbf{e}_j$ – тензор напруження 2-го рангу, що визначається фізичним рівнянням – законом Гука, який встановлює зв'язок між напруженнями і

²⁶ URL : <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/19011>, <http://ela.kpi.ua/handle/123456789/23915>

деформаціями, Па; $\mathbf{F} = F^m \mathbf{e}_m$ – вектор масових сил, Н/кг; $\dot{\hat{\mathbf{\epsilon}}} = \dot{\epsilon}_{mn} \mathbf{e}^m \mathbf{e}^n$ – тензор швидкості деформацій 2-го рангу, який визначається через похідну $\dot{\hat{\mathbf{\epsilon}}} = \frac{d\hat{\mathbf{\epsilon}}}{dt}$, с^{-1} ; $\mathbf{e}_i, \mathbf{e}^m$ – коваріантний і контраваріантний векторний базис (векторний супровід тензорів), відповідно; $C_v = c_v \rho$ – об’ємна ізохорна теплоємність середовища, Дж/(м³·К); c_v – масова ізохорна теплоємність, Дж/(кг·К); T – абсолютна температура, К; λ – коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м·К); $\hat{\mathbf{\sigma}} : \dot{\hat{\mathbf{\epsilon}}}$ – дисипативний член, що описує незворотне перетворення механічної енергії в теплову, Вт/м³; $(:)$ – оператор подвійного скалярного добутку; q_v – об’ємна густина внутрішнього джерела теплоти, що спричинена джерелом будь-якої немеханічної природи, Вт/м³; $\hat{\hat{C}}$ – тензор 4-го рангу фізичних констант, який у загальному випадку вміщує 81 компоненту, Па; $\mathbf{u} = u^i \mathbf{e}_i$ – вектор переміщень, м; β – коефіцієнт лінійного температурного розширення середовища, К⁻¹; T_0 і T – початкова і поточна абсолютна температура середовища, відповідно, К; $\hat{\mathbf{g}}$ – метричний тензор 2-го рангу.

Початкові і граничні умови для (6.8). Початкові умови описують початковий стан середовища:

$$\mathbf{u}_0 = \varphi_u(\mathbf{x}); \quad (6.9)$$

$$T_0 = \varphi_T(\mathbf{x}), \quad (6.10)$$

де $\mathbf{x} = x^i \mathbf{e}_i$, м.

Граничні умови:

– крайові умови Дирихле (стосуються геометричного рівняння, рівнянь збереження – рівноваги та енергії)

$$\begin{cases} \mathbf{u} = 0; \\ T = T_b, \end{cases} \quad (6.11)$$

де перша умова відповідає умові закріплення тіла; T_b – абсолютна температура на границі середовища (тіла), К;

– крайові умови Неймана (стосуються рівнянь збереження кількості руху та енергії)

$$\begin{cases} \hat{\sigma} \cdot \mathbf{n} = \mathbf{p}; \\ \mathbf{n} \cdot (-\lambda \vec{\nabla} T) = \mathbf{n} \cdot \mathbf{q} = q_n, \end{cases} \quad (6.12)$$

де $\mathbf{p} = p^i \mathbf{e}_i$ – вектор напруження, що діє на поверхні середовища, Па;
 $\mathbf{q} = q^i \mathbf{e}_i$ – вектор густини теплового потоку на поверхні середовища, а q_n – нормальна його складова, Вт/м²;

– конвективні умови (стосуються тільки рівняння енергії)

$$\mathbf{n} \cdot (-\lambda \vec{\nabla} T) = \alpha(T - T_p), \quad (6.13)$$

де α – коефіцієнт тепловіддачі, Вт/(м²·К); T_p – абсолютна температура оточуючого середовища, К;

– механічні умови абсолютного контакту

$$\begin{cases} \{\mathbf{n} \cdot \mathbf{u}\} = 0; \\ \{\sigma_n \cdot \mathbf{n}\} = 0, \end{cases} \quad (6.14)$$

де $\mathbf{n}$ – вектор нормалі до поверхні контакту; $\mathbf{u}$ – вектор переміщення, м;
 $\{\mathbf{n} \cdot \mathbf{u}\} = \mathbf{n}^+ \cdot \mathbf{u}^+ - \mathbf{n}^- \cdot \mathbf{u}^-$, м; $\sigma_n = \hat{\sigma} \cdot \mathbf{n}$ – компоненти вектора напруження в нормальному напрямку до поверхні контакту, Па;
 $\{\sigma_n \cdot \mathbf{n}\} = \sigma_n^+ \cdot \mathbf{n}^+ - \sigma_n^- \cdot \mathbf{n}^-$, Па; «+» і «-» – означає ліворуч і праворуч від поверхні контакту;

– теплові умови абсолютного контакту

$$\begin{cases} \{T\} = 0; \\ \{\mathbf{n} \cdot \mathbf{q}\} = 0, \end{cases} \quad (6.15)$$

де $\{T\} = T^+ - T^-$, К; $\{\mathbf{n} \cdot \mathbf{q}\} = \mathbf{n}^+ \cdot \mathbf{q}^+ - \mathbf{n}^- \cdot \mathbf{q}^-$, Вт/м²; $\mathbf{q} = -\lambda \nabla T$ – вектор густини теплового потоку, Вт/м².

Для числового розв'язання сформульованих задач (6.1)–(6.7) і (6.8)–(6.15) найбільшого застосування дістав метод скінченних елементів²⁷.

²⁷ URL : <http://ela.kpi.ua/handle/123456789/11636>

Лекція 1.3(7) Постановка задачі тепло-гідродинаміки під час ламінарної течії нестисливої ньютонівської рідини. Постановка задачі тепло-гідродинаміки під час турбулентної течії нестисливої ньютонівської рідини на базі стандартної моделі

7.1 Постановка задачі тепло-гідродинаміки під час ламінарної течії нестисливої ньютонівської рідини

Система рівнянь тепло-масопереносу під час ламінарної течії нестисливої рідини включає такі рівняння: збереження маси (квазістаціонарне) і кількості руху в наближенні Бусінеска, фізичне рівняння Нав'є-Стокса і збереження енергії)²⁸:

$$\begin{cases} \vec{\nabla} \cdot \mathbf{v} = 0; \\ \rho_0 \left[\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \vec{\nabla}) \mathbf{v} \right] = \vec{\nabla} \cdot \hat{\boldsymbol{\sigma}} + \mathbf{f}; \\ \hat{\boldsymbol{\sigma}} = \mu \vec{\nabla} \mathbf{v} - p; \\ c_p \rho_0 \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \vec{\nabla} T \right) = \vec{\nabla} \cdot (\lambda \vec{\nabla} T) + \hat{\boldsymbol{\sigma}} : \vec{\nabla} \mathbf{v} + q_v, \end{cases} \quad (7.1)$$

де $\vec{\nabla} = \mathbf{e}^s \frac{\partial}{\partial x^s}$ – оператор Гамільтона, м^{-1} ; $\mathbf{v} = v^i \mathbf{e}_i$ – вектор швидкості, м/с ; ρ_0 – густина рідини за абсолютної температури T_0 , кг/м^3 ; t – час, с ; μ – коефіцієнт динамічної в'язкості, $\text{Па} \cdot \text{с}$; $\hat{\boldsymbol{\sigma}} = \sigma^{ij} \mathbf{e}_i \mathbf{e}_j$ – тензор напруження 2-го рангу, Па ; p – гідростатичний тиск, Па ; $\mathbf{f} = f^m \mathbf{e}_m$ – вектор об'ємного навантаження, який за наближення Бусінеска має вигляд $f^m = \rho_0 \beta (T - T_0) g^m$, Па/м ; g^m – компоненти вектора прискорення вільного падіння, м/с^2 ; c_p – масова ізобарна теплоємність, $\text{Дж/(кг} \cdot \text{К)}$; T – абсолютна температура, К ; λ – коефіцієнт теплопровідності, $\text{Вт/(м} \cdot \text{К)}$; $\hat{\boldsymbol{\sigma}} : \vec{\nabla} \mathbf{v}$ – дисипативний член або джерело теплоти механічної природи, Вт/м^3 ; $(:)$ – оператор подвійного скалярного добутку; q_v – об'ємна густина внутрішнього джерела теплоти, що спричинена джерелом будь-якої немеханічної природи, Вт/м^3 .

Початкові умови до (7.1):

²⁸ URL : <http://ela.kpi.ua/handle/123456789/23915>

$$\begin{cases} \mathbf{v}|_{t=0} = \varphi_v(\mathbf{x}); \\ T|_{t=0} = \varphi_T(\mathbf{x}); \\ p|_{t=0} = \varphi_p(\mathbf{x}), \end{cases} \quad (7.2)$$

де $\mathbf{v} = v^i \mathbf{e}_i$, $\mathbf{x} = x^i \mathbf{e}_i$.

Граничні умови для (7.1) включають взаємодію рідини із зовнішнім середовищем на протязі всього процесу, який досліджується:

- на поверхнях контакту рідини з твердою поверхнею можуть задаватися умови прилипання (всі компоненти швидкості на поверхні твердого тіла дорівнюють нулю), нормальна складова густини теплового потоку (закон Фур'є) тощо

$$\mathbf{v}|_{S_v} = 0, \quad (7.3)$$

$$\mathbf{n} \cdot \mathbf{q}|_{S_q} = -q_n, \quad (7.4)$$

де $\mathbf{q} = -\lambda \vec{\nabla} T$ – вектор густини теплового потоку, а q_n – нормальна його складова, Вт/м²; $\mathbf{n} = n_i \mathbf{e}^i$ – вектор нормалі до поверхні тіла;

- на вихідному перетині потоку рідини, як правило, задаються його нормальна складова швидкості і температура

$$\begin{cases} \mathbf{n} \cdot \mathbf{v} = v_0; \\ T = T_0, \end{cases} \quad (7.5)$$

- на перетині витoku рідини задаються нульові значення градієнтів тиску й температури

$$\begin{cases} \mathbf{n} \cdot \vec{\nabla} p = 0; \\ \mathbf{n} \cdot \vec{\nabla} T = 0. \end{cases} \quad (7.6)$$

У декартовій системі координат (x_1, x_2, x_3) система рівнянь (7.1) за умови $\mu, \lambda = \text{const}$ приймає вигляд:

$$\left\{ \begin{aligned} & \frac{\partial v_1}{\partial x_1} + \frac{\partial v_2}{\partial x_2} + \frac{\partial v_3}{\partial x_3} = 0; \\ & \rho_0 \left[\frac{\partial v_1}{\partial t} + v_1 \frac{\partial v_1}{\partial x_1} + v_2 \frac{\partial v_1}{\partial x_2} + v_3 \frac{\partial v_1}{\partial x_3} \right] = -\frac{\partial p}{\partial x_1} + \mu \left(\frac{\partial^2 v_1}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2 v_1}{\partial x_2^2} + \frac{\partial^2 v_1}{\partial x_3^2} \right) + \rho_0 \beta (T - T_0) g_1; \\ & \rho_0 \left[\frac{\partial v_2}{\partial t} + v_1 \frac{\partial v_2}{\partial x_1} + v_2 \frac{\partial v_2}{\partial x_2} + v_3 \frac{\partial v_2}{\partial x_3} \right] = -\frac{\partial p}{\partial x_2} + \mu \left(\frac{\partial^2 v_2}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2 v_2}{\partial x_2^2} + \frac{\partial^2 v_2}{\partial x_3^2} \right) + \rho_0 \beta (T - T_0) g_2; \\ & \rho_0 \left[\frac{\partial v_3}{\partial t} + v_1 \frac{\partial v_3}{\partial x_1} + v_2 \frac{\partial v_3}{\partial x_2} + v_3 \frac{\partial v_3}{\partial x_3} \right] = -\frac{\partial p}{\partial x_3} + \mu \left(\frac{\partial^2 v_3}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2 v_3}{\partial x_2^2} + \frac{\partial^2 v_3}{\partial x_3^2} \right) + \rho_0 \beta (T - T_0) g_3; \\ & c_p \rho_0 \left(\frac{\partial T}{\partial t} + v_1 \frac{\partial T}{\partial x_1} + v_2 \frac{\partial T}{\partial x_2} + v_3 \frac{\partial T}{\partial x_3} \right) = \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial x_2^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial x_3^2} \right) + q_v, \end{aligned} \right. \quad (7.7)$$

де (v_1, v_2, v_3) – компоненти вектора швидкості, м/с; (g_1, g_2, g_3) – компоненти вектора прискорення вільного падіння, м/с².

Початкові умови до (7.7):

$$\left\{ \begin{aligned} & v_i|_{t=0} = \varphi_v(x_j); \\ & T|_{t=0} = \varphi_T(x_j); \quad i, j = 1, 2, 3; \\ & p|_{t=0} = \varphi_p(x_j). \end{aligned} \right. \quad (7.8)$$

Граничні умови для (7.7) включають умови взаємодії тіла із зовнішнім середовищем на протязі всього процесу, який досліджується:

- на поверхнях контакту рідини з твердою поверхнею можуть задаватися умови прилипання і нормальна складова густини теплового потоку

$$(v_1 = v_2 = v_3)|_{S_v} = 0, \quad (7.9)$$

$$(n_1 q_1 + n_2 q_2 + n_3 q_3)|_{S_q} = -q_n, \quad (7.10)$$

де (q_1, q_2, q_3) – компоненти вектора густини теплового потоку, Вт/м²; (n_1, n_2, n_3) – компоненти вектора нормалі до поверхні тіла;

- на вихідному перетині потоку рідини задаються його нормальна швидкість й температура

$$\begin{cases} n_1 v_1 + n_2 v_2 + n_3 v_3 = v_0; \\ T = T_0, \end{cases} \quad (7.11)$$

- на перетині витоку рідини задаються нульові значення градієнтів тиску й температури

$$\begin{cases} n_1 \frac{\partial p}{\partial x_1} + n_2 \frac{\partial p}{\partial x_2} + n_3 \frac{\partial p}{\partial x_3} = 0; \\ n_1 \frac{\partial T}{\partial x_1} + n_2 \frac{\partial T}{\partial x_2} + n_3 \frac{\partial T}{\partial x_3} = 0. \end{cases} \quad (7.12)$$

Методика числового розв’язання сформульованих задач базується на методі скінчених об’ємів (МСО)²⁹. Алгоритм розв’язання задач називається SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations або напівнеявний метод розв’язку рівнянь, які зв’язують тиск, який вперше запропонували L. S. Caretto, S. V. Patankar, D. B. Spalding).

7.2 Постановка задачі тепло-гідродинаміки під час турбулентної течії нестисливої ньютонівської рідини на базі стандартної моделі

Стандартна $k - \varepsilon$ модель, окрім осереднених за Рейнольдсом рівнянь збереження маси, кількості руху та енергії, включає два додаткових скалярних рівняння для кінетичної турбулентної енергії та швидкості дисипації кінетичної енергії турбулентності, що записуються додатково до системи рівнянь Нав’є-Стокса. Система осереднених рівнянь стандартної $k - \varepsilon$ моделі турбулентності нестисливої рідини має вигляд)³⁰:

²⁹ Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости / Патанкар С. ; пер. с англ. В. Д. Виленского. — М. : Энергоатомиздат, 1984. — 153 с.

³⁰ URL : <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/23917>, <http://ela.kpi.ua/handle/123456789/23915>

$$\left\{ \begin{array}{l} \nabla \cdot \tilde{\mathbf{v}} = 0; \\ \rho \left[\frac{\partial \tilde{\mathbf{v}}}{\partial t} + (\tilde{\mathbf{v}} \cdot \nabla) \tilde{\mathbf{v}} \right] = -\nabla \bar{p} + \nabla \cdot \bar{\boldsymbol{\tau}}_{eff}; \\ \rho \left[\frac{\partial k}{\partial t} + \nabla \cdot (\tilde{\mathbf{v}} k) \right] = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + \bar{\boldsymbol{\tau}}_{eff} : \nabla \tilde{\mathbf{v}} - \bar{\rho} \varepsilon; \\ \rho \left[\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \nabla \cdot (\tilde{\mathbf{v}} \varepsilon) \right] = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right] + C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} (\bar{\boldsymbol{\tau}}_{eff} : \nabla \tilde{\mathbf{v}}) - C_{\varepsilon 2} \bar{\rho} \frac{\varepsilon^2}{k}; \\ \rho \left[\frac{\partial \tilde{E}}{\partial t} + \nabla \cdot \tilde{\mathbf{v}} (\tilde{E} + \bar{p}) \right] = \nabla \cdot \left[\left(\lambda + \frac{c_p \mu_t}{Pr_t} \right) \nabla \tilde{T} \right] + \nabla \tilde{\mathbf{v}} : \bar{\boldsymbol{\tau}}_{eff} + q_v, \end{array} \right. \quad (7.13)$$

де ∇ – оператор Гамільтона, м^{-1} ; $\tilde{\mathbf{v}}$ – вектор швидкості, осереднений за Favre, м/с ; ρ – густина, кг/м^3 ; t – час, с ; $\bar{p}$ – тиск, осереднений за Reynolds,

Па; $\bar{\boldsymbol{\tau}}_{eff} = (\mu + \mu_t) [\nabla \tilde{\mathbf{v}} + \tilde{\mathbf{v}} \nabla] - \frac{2}{3} \bar{\rho} k \hat{\mathbf{I}}$ – тензор 2-го рангу ефективних зсувних

напружень, Па; μ – коефіцієнт динамічної в'язкості, $\text{Па}\cdot\text{с}$; $\mu_t = \frac{\bar{\rho} C_\mu k^2}{\varepsilon}$ –

коефіцієнт турбулентної в'язкості, $\text{Па}\cdot\text{с}$; k – турбулентна кінетична енергія, Дж/кг ; $(:)$ – оператор подвійного скалярного добутку; ε – швидкість дисипації турбулентної кінетичної енергії, $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{с})$; $C_{\varepsilon 1} = 1,44$; $C_{\varepsilon 2} = 1,92$; $C_\mu = 0,09$; $\sigma_k = 1,0$; $\sigma_\varepsilon = 1,3$ – коефіцієнти k – ε моделі турбулентності;

$\tilde{E} = \tilde{h} - \frac{\bar{p}}{\bar{\rho}} + \frac{\tilde{\mathbf{v}} \cdot \tilde{\mathbf{v}}}{2}$ – повна масова енергія, осереднена за Favre, Дж/кг ;

$\tilde{h} = \int_{T_0}^{\tilde{T}} c_p dT$ – явна масова ентальпія, осереднена за Favre, Дж/кг ; c_p – масова

ізобарна теплоємність, $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$; $\tilde{T}$ – абсолютна температура, осереднена за Favre, К ; λ – коефіцієнт теплопровідності, $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$; Pr_t – турбулентне число Prandtl; q_v – густина об'ємного джерела теплоти, Вт/м^3 .

Початкові умови для (7.13):

$$\left\{ \begin{array}{l} \tilde{T}(X) = T_0; \\ \tilde{\mathbf{v}}(X) = \mathbf{v}_0; \\ \bar{p}(X) = p_0; \\ k(X) = k_0; \\ \varepsilon(X) = \varepsilon_0, \end{array} \right. \quad (7.14)$$

де $X(x, y, z) \in \Omega$ – декартові координати, м; Ω – розрахункова область.

Граничні умови для (7.13):

– на вході газового потоку (7.15) і на виході – (7.16)

$$\left\{ \begin{array}{l} \mathbf{n} \cdot \tilde{\mathbf{v}} = v_{\text{inlet}}; \\ \bar{p} = p_{\text{inlet}}; \\ \tilde{T} = T_{\text{inlet}}; \\ k = k_{\text{inlet}}; \\ \varepsilon = \varepsilon_{\text{inlet}}, \end{array} \right. \quad (7.15)$$

де $\mathbf{n}$ – вектор нормалі до поверхні твердої стінки;

$$\left\{ \begin{array}{l} \bar{p}_{\text{outlet}} = 0; \\ \tilde{T} = T_{\text{outlet}}; \\ k = k_{\text{outlet}}; \\ \varepsilon = \varepsilon_{\text{outlet}}, \end{array} \right. \quad (7.16)$$

– на поверхні твердого тіла

$$\left\{ \begin{array}{l} \mathbf{n} \cdot \nabla \bar{p} = 0; \\ \mathbf{n} \cdot (-\lambda \nabla \tilde{T}) = q_n \vee \mathbf{n} \cdot \nabla \tilde{T} = 0; \\ \tilde{\mathbf{v}} = 0; \\ k = 0; \\ \varepsilon = 0, \end{array} \right. \quad (7.17)$$

де q_n – нормальна складова вектора густини теплового потоку, Вт/м².

Лекція 1.4(8) Фізичні рівняння для неньютонівської рідини. Моделі дилатантних (комполітичних) речовин. Постановка задачі тепло-гідродинамічного стану рідини типу Bingham-Rapanastasiou. Математична модель процесу просочення поруватих середовищ

8.1 Фізичні рівняння для неньютонівської рідини

Рівняння стану для нестисливої неньютонівської рідини мають вигляд)³¹

$$\sigma_{ij} = 2\eta(\dot{\gamma})\dot{D}_{ij} - p\delta_{ij} \text{ або } \hat{\sigma} = \hat{\tau} - p\hat{I} = 2\eta(\dot{\gamma})\hat{D} - p\hat{I}, \quad (8.1)$$

де $\hat{\sigma}$ – симетричний тензор напруження другого рангу, Па; $\hat{\tau} = 2\eta(\dot{\gamma})\hat{D}$ – тензором в'язких напружень другого рангу, Па; $\dot{D}_{ij} = \frac{1}{2}(v_{i,j} + v_{j,i})$ або $\hat{D} = \frac{1}{2}(\nabla \mathbf{v} + \mathbf{v} \nabla)$ – тензор швидкості деформації, с^{-1} ; $v_i = \mathbf{v}$ – вектор швидкості, м/с; p – зовнішній гідростатичний тиск, Па; $\hat{I}$ – одиничний тензор другого рангу; $\eta(\dot{\gamma})$ – ефективна в'язкість рідини як функція другого інваріанта $\dot{\gamma}$ від $\hat{D}$, Па·с; $\dot{\gamma} = \sqrt{\frac{1}{2}\hat{D}:\hat{D}}$ – другий інваріант від $\hat{D}$, с^{-1} .

Степеневий закон з врахуванням температурної залежності в'язкості для різних класів рідин має вигляд

$$\eta(\dot{\gamma}) = k\dot{\gamma}^{n-1}H(T), \quad (8.2)$$

де k – величина середньої в'язкості рідини, Па·с; $\dot{\gamma}$ – другий інваріант $\hat{D}$, с^{-1} ; n – показник ступеня, який визначає клас рідини; $H(T) = \exp\left[\frac{E_a}{R}\left(\frac{1}{T - T_0} - \frac{1}{T_a - T_0}\right)\right]$; E_a – енергія активації течії, Дж/моль; R – газова стала, Дж/(моль·К); T_a – абсолютна температура активації, К; T_0 – абсолютна температура відліку, К.

За умови $n=1$ маємо ньютонівську рідину; для $n>1$ – дилатантну рідину; для $n<1$ – псевдо-пластик.

³¹ URL : <http://ela.kpi.ua/handle/123456789/23915>

Розглянемо систему диференціальних рівнянь механіки суцільного середовища, яка для ізотермічної нестисливої рідини має вигляд

$$\begin{cases} \nabla \cdot \mathbf{v} = 0; \\ \rho \left(\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla \mathbf{v} \right) = \nabla \cdot \hat{\boldsymbol{\sigma}} + \rho \mathbf{g}, \end{cases} \quad (8.3)$$

де ∇ – оператор Гамільтона, м^{-1} ; ρ – густина, кг/м^3 ; t – час, с ; $\hat{\boldsymbol{\sigma}}$ – тензор напруження (8.1), Па ; $\mathbf{g}$ – вектор прискорення вільного падіння, м/с^2 .

Для замикання системи рівнянь (8.3) треба додати рівняння стану, що визначає тип рідини (ньютонівська або неньютонівська), початкові та відповідні граничні умови.

8.2 Моделі дилатантних (комполитних) речовин. Постановка задачі тепло-гідродинамічного стану рідини типу Bingham-Papanastasiou

Комполитні речовини, що складаються з наповнювача (твердих частинок) і зв'язувального (в'язкої рідини), проявляють дуалізм властивостей залежно від значень внутрішнього напруження. З одного боку, нижче певного рівня зовнішньої механічної дії такий матеріал зберігає свою цілісність, проявляючи пластичні властивості, що схожі з твердим тілом, а з іншого – за умови достатнього зовнішнього зусилля речовина починає текти як в'язка рідина)³².

Для опису поведінки даного класу речовин застосовуються моделі Bingham (8.4), Herschel-Bulkley (8.5), Casson (8.6). Для простої двовимірної зсувної течії (течії Куетта) ці моделі запишуться таким чином (рис. 8.1):

$$\begin{cases} \boldsymbol{\tau} = \tau_{\text{shear}} + \mu_{\text{eff}} \dot{\gamma}, & |\boldsymbol{\tau}| > \tau_{\text{shear}}; \\ \dot{\gamma} = 0, & |\boldsymbol{\tau}| \leq \tau_{\text{shear}}, \end{cases} \quad (8.4)$$

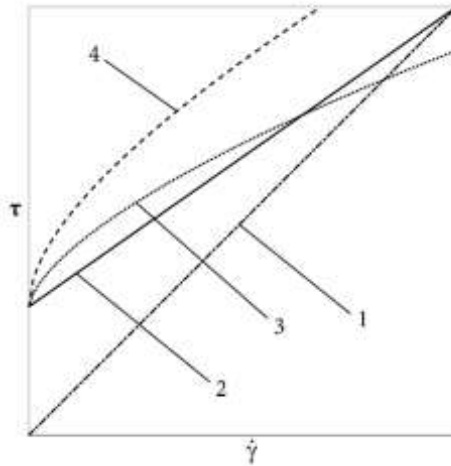
$$\begin{cases} \boldsymbol{\tau} = \tau_{\text{shear}} + K \dot{\gamma}^n, & |\boldsymbol{\tau}| > \tau_{\text{shear}}; \\ \dot{\gamma} = 0, & |\boldsymbol{\tau}| \leq \tau_{\text{shear}}, \end{cases} \quad (8.5)$$

$$\begin{cases} \sqrt{\boldsymbol{\tau}} = \sqrt{\tau_{\text{shear}}} + \sqrt{\mu_{\text{eff}} \dot{\gamma}}, & |\boldsymbol{\tau}| > \tau_{\text{shear}}; \\ \dot{\gamma} = 0, & |\boldsymbol{\tau}| \leq \tau_{\text{shear}}, \end{cases} \quad (8.6)$$

де $\boldsymbol{\tau}$ – вектор напруження зсуву, Па ; τ_{shear} – критичне зсувне напруження (статичне напруження зсуву), Па ; μ_{eff} – ефективний коефіцієнт динамічної

³² URL : <http://ela.kpi.ua/handle/123456789/23915>

в'язкості, Па·с; $\dot{\gamma} = 2\hat{\mathbf{D}}$ – тензор швидкості деформації, с⁻¹; K , n – коефіцієнти моделі Herschel-Bulkley.



1 – ньютонівська рідина; 2 – рідина Bingham; 3 – рідина Herschel-Bulkley;
4 – рідина Casson

Рис. 8.1. Залежність зсувних напружень від швидкості деформації для різних моделей в'язко-пластичної рідини

Для тривимірного випадку тензорна форма рівняння (8.6) набуває вигляду:

$$\begin{cases} \bar{\bar{\boldsymbol{\tau}}} = \left(\mu_{eff} + \frac{\tau_{shear}}{|\dot{\bar{\bar{\boldsymbol{\gamma}}}}|} \right) \dot{\bar{\bar{\boldsymbol{\gamma}}}}, & |\boldsymbol{\tau}| > \tau_{shear}; \\ \dot{\bar{\bar{\boldsymbol{\gamma}}}} = 0, & |\boldsymbol{\tau}| \leq \tau_{shear}, \end{cases} \quad (8.7)$$

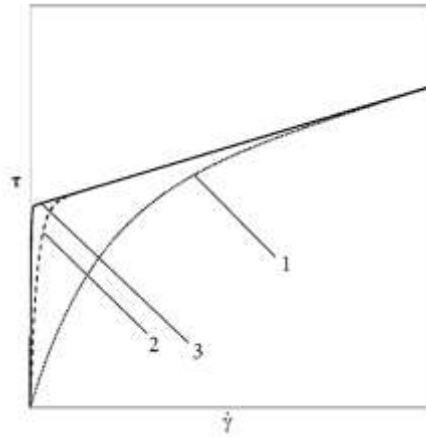
де $\bar{\bar{\boldsymbol{\tau}}}$ – тензор напруження зсуву, Па; $|\dot{\bar{\bar{\boldsymbol{\gamma}}}}| = \sqrt{\frac{1}{2} II_{\dot{\bar{\bar{\boldsymbol{\gamma}}}}} = \sqrt{\frac{1}{2} (\dot{\bar{\bar{\boldsymbol{\gamma}}}} : \dot{\bar{\bar{\boldsymbol{\gamma}}}})}$ – другий інваріант від $\dot{\bar{\bar{\boldsymbol{\gamma}}}}$, с⁻¹; $\dot{\bar{\bar{\boldsymbol{\gamma}}}} = \nabla \mathbf{v} + \mathbf{v} \nabla$ – швидкість деформації, с⁻¹; $\mathbf{v}$ – вектор швидкості, м/с; ∇ – оператор Гамільтона, м⁻¹; $|\boldsymbol{\tau}| = \sqrt{\frac{1}{2} II_{\boldsymbol{\tau}}} = \sqrt{\frac{1}{2} (\bar{\bar{\boldsymbol{\tau}}} : \bar{\bar{\boldsymbol{\tau}}})}$ – другий інваріант від $\bar{\bar{\boldsymbol{\tau}}}$, Па.

Модель Bingham (8.7) передбачає співіснування двох областей (рідкої і твердої), що тягне за собою значні обчислювальні труднощі при моделюванні в області сильної нелінійності фізичних властивостей рідини. Для подолання цієї проблеми Papadopoulos запропонував регуляризацию рівняння напружено-деформованого стану потоку в'язко-пластичного матеріалу за допомогою введення експоненціального множника в рівняння (8.7)

$$\bar{\tau} = \left(\mu_{eff} + \frac{\tau_{shear}}{|\dot{\gamma}|} [1 - \exp(-m|\dot{\gamma}|)] \right) \dot{\gamma}, \quad (8.8)$$

де m – експоненціальний множник, с.

Рівняння (8.8) (модель Bingham-Papanastasiou) є справедливим для всіх значень $|\tau|$ і дає близькі результати до ідеальної рідини Bingham за значень $m \geq 100$ (рис. 8.2).



1 – $m = 1$; 2 – $m = 10$; 3 – $m = 100$

Рис. 8.2. Залежність зсувних напружень від швидкості деформації для моделі рідини Bingham-Papanastasiou за різних значень параметра m

Математична модель неізотермічної екструзії композитної речовини може бути представлена системою рівнянь, яка включає квазістаціонарне рівняння нерозривності, нестаціонарні рівняння збереження кількості руху та енергії:

$$\left\{ \begin{array}{l} \nabla \cdot \mathbf{v} = 0; \\ \rho \left[\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} \right] = -\nabla p + \nabla \cdot \bar{\tau}; \\ \rho \left[\frac{\partial h}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{v} h) \right] = \nabla \cdot [\lambda_{eff}(T) \nabla T] + \bar{\tau} : \nabla \mathbf{v}, \end{array} \right. \quad (8.9)$$

де ρ – густина, кг/м³; t – час, с; p – тиск, Па; $h = \int_0^T c_p(T) dT$ – явна масова ентальпія, Дж/кг; T – абсолютна температура, К; c_p – масова ізобарна

теплоємність, Дж/(кг·К); λ_{eff} – ефективний коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м·К); $\bar{\tau} : \nabla \mathbf{v}$ – член, що відповідає дисипації механічної енергії, Вт/м³; $(:)$ – оператор подвійного скалярного добутку.

За початкові умови системи рівнянь (8.9) приймаються розподіл полів компонент вектора швидкості, тиску та температури:

$$\begin{cases} \mathbf{v}_0 = \mathbf{v}(x, y, z); \\ p_0 = p(x, y, z); \\ T_0 = T(x, y, z), \end{cases} \quad (8.10)$$

де $(x, y, z) \in \Omega$ – декартові координати, м; Ω – розрахункова область.

Граничні умови для (8.9) включають: у вхідному січенні – нормальну швидкість і температуру (8.11); у відхідному січенні – нульовий градієнт тиску й температури (8.12); на поверхнях контакту рідини зі стінками каналу – умови проковзування та умови конвективного типу або густину теплового потоку (8.13):

$$\begin{cases} \mathbf{n} \cdot \mathbf{v} = v_{inlet}(t); \\ T = T_{inlet}(t), \end{cases} \quad (8.11)$$

$$\begin{cases} \mathbf{n} \cdot \nabla p = 0; \\ \mathbf{n} \cdot \nabla T = 0, \end{cases} \quad (8.12)$$

$$\begin{cases} \bar{\tau} = \tau_{wall}; \\ \mathbf{n} \cdot (-\lambda_{eff}(T) \nabla T) = \alpha(T - T_{\infty}); \\ \mathbf{n} \cdot (-\lambda_{eff}(T) \nabla T) = q_n, \end{cases} \quad (8.13)$$

де $\mathbf{n}$ – вектор зовнішньої нормалі до поверхні вхідного або відхідного січення; v_{inlet}, T_{inlet} – швидкість (м/с) та абсолютна температура (К) у вхідному січенні, відповідно; τ_{wall} – тензор зсувних напружень на границі контакту рідина-тверде тіло, Па; α – коефіцієнт тепловіддачі, Вт/(м²·К); T_{∞} – абсолютна температура оточуючого середовища, К; q_n – нормальна складова вектора густини теплового потоку, Вт/м².

8.3 Математична модель процесу просочення поруватих середовищ

Система диференціальних рівнянь багатофазного середовища під час руху та теплопередачі стисливої рідини в поруватому середовищі включає

такі рівняння: збереження маси, кількості руху та енергії, що записується окремо для рідини і поруватого середовища (твердої фази), відповідно)³³:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial(\gamma\rho)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \hat{\mathbf{K}} \cdot \mathbf{U}) = 0; \\ \frac{\partial(\gamma\rho\mathbf{U})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho(\hat{\mathbf{K}} \cdot \mathbf{U}) \otimes \mathbf{U}) = -\gamma\nabla p + \nabla \cdot \left(\mu_{eff} \hat{\mathbf{K}} \cdot (\nabla\mathbf{U} + \mathbf{U}\nabla) - \frac{2}{3}(\nabla \cdot \mathbf{U})\hat{\mathbf{I}} \right) + \gamma\mathbf{S}_M; \\ \frac{\partial(\gamma\rho h_f)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \hat{\mathbf{K}} \cdot \mathbf{U} h_f) = \nabla \cdot (\lambda_e^f \hat{\mathbf{K}} \cdot \nabla T_f) + \gamma\mathbf{S}_f + Q_{fs}; \\ \frac{\partial(\gamma\rho_s h_s)}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda_s \hat{\mathbf{K}}_s \cdot \nabla T_s) + \gamma_s\mathbf{S}_s + Q_{sf}, \end{array} \right. \quad (8.14)$$

де t – час, с; $\gamma = \frac{V'}{V}$ – поруватість твердого середовища або об'ємна частка

пор; V' – об'єм пор поруватого середовища, м³; V – об'єм поруватого середовища, в якому враховується об'єми твердої фази та пор, м³; ρ – густина рідини, кг/м³; ∇ – оператор Гамільтона, м⁻¹; $\hat{\mathbf{K}} = \gamma\hat{\mathbf{I}}$ – тензор поруватості середовища другого рангу; $\hat{\mathbf{I}}$ – одиничний тензор другого рангу; $\mathbf{U}$ – вектор швидкості потоку рідини, м/с; $(\cdot)$ – оператор скалярного добутку; $\otimes$ – оператор векторного добутку; p – тиск, Па; μ_{eff} – ефективна динамічна в'язкість рідини, Па·с; $\mathbf{S}_M$ – вектор джерельного члену, що впливає на рух рідини завдяки гравітації і гідравлічного опору поруватого середовища $\hat{\mathbf{R}}$ (кг/(м²·с)) у вигляді складової $\mathbf{U} \cdot \hat{\mathbf{R}}$ (тензор $\hat{\mathbf{R}}$ є коефіцієнтом пропорційності в оберненому вигляді в законі фільтрації Дарсі – $\mathbf{U} = -\hat{\mathbf{R}}^{-1}\nabla p$), Н/м³; $\gamma_s = 1 - \gamma$ – частка твердої фази в поруватому

середовищі; $h_f = \int_{T_{ref}}^T c_p^f dT$ – явна або неізотермічна масова ентальпія рідини,

Дж/кг; c_p^f – масова ізобарна теплоємність рідкої фази, Дж/(кг·К); λ_e^f – ефективний коефіцієнт теплопровідності рідини, Вт/(м·К); T_f , T_s – абсолютна температура рідкої та твердої фаз, відповідно, К; $\mathbf{S}_f$, $\mathbf{S}_s$ – векторні джерельні члени – об'ємна густина теплоти для рідини та твердої фази поруватого середовища, відповідно, Вт/м³; $Q_{fs} = \alpha_v(T_f - T_s)$ – об'ємна густина теплового потоку між фазами через поверхню їх контакту A_{fs} , Вт/м³; α_v – об'ємний коефіцієнт тепловіддачі між фазами, Вт/(м³·К);

³³ URL : <http://ela.kpi.ua/handle/123456789/23915>

$$Q_{fs} = -Q_{sf} \text{ (причому } Q_{ff} = Q_{ss} = 0), \text{ Вт/м}^3; \quad h_s = \int_{T_{ref}}^T c_p^s dT \text{ — явна масова}$$

ентальпія твердої фази, Дж/кг; c_p^s — масова ізобарна теплоємність твердої фази, Дж/(кг·К); λ_s — коефіцієнт теплопровідності твердої фази, Вт/(м·К); $\hat{\mathbf{K}}_s = \gamma_s \hat{\mathbf{I}}$ — тензор непроникності поруватого середовища другого рангу.

Зв'язок між тиском та густиною стисливої рідини встановлюється рівнянням стану у вигляді співвідношення

$$p = p(\rho, T), \quad (8.15)$$

Початкові умови для (8.14):

$$\begin{cases} \mathbf{U}|_{t=0} = \mathbf{U}_0; \\ p|_{t=0} = p_0; \\ T|_{t=0} = T_0, \end{cases} \quad (8.16)$$

де $\mathbf{U}_0$ — вектор початкової швидкості, м/с; p_0 — початковий тиск, Па; T_0 — початкова абсолютна температура, К.

Граничні умови для (8.14):

— на поверхні входу в порувате середовище

$$\begin{cases} p_{inlet} = \delta p; \\ T_{inlet} = T_f, \end{cases} \quad (8.17)$$

де δp — надлишковий тиск, Па; T_f — абсолютна температура рідини, К;

— на поверхні виходу з поруватого середовища

$$\begin{cases} p_{outlet} = 0; \\ \mathbf{n} \cdot \nabla T = 0, \end{cases} \quad (8.18)$$

де $\mathbf{n}$ — вектор зовнішньої нормалі до поверхні поруватого тіла.

8.4 Математична модель процесу плавлення полімерного матеріалу

Математичну постановку процесу плавлення полімерного матеріалу в каналі екструдера можна записати в загальному випадку у вигляді системи рівнянь механіки суцільного середовища для ламінарної течії неньютонівської рідини:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial}{\partial t} \rho(T) + \nabla \cdot (\rho(T) \mathbf{v}) = 0; \\ \rho(T) \left[\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} \right] = -\nabla p + \nabla \cdot \bar{\bar{\tau}}; \\ \rho(T) \left[\frac{\partial H}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{v} H) \right] = \nabla \cdot [\lambda_{\text{eff}}(T) \nabla T] + \bar{\bar{\tau}} : \nabla \mathbf{v}, \end{array} \right. \quad (8.19)$$

де t – час; $\rho(T)$ – температурна залежність густини, кг/м³; ∇ – оператор Гамільтона, м⁻¹; $(\cdot)$ – оператор скалярного добутку; $\mathbf{v}$ – вектор швидкості потоку, м/с; p – тиск, Па; $\bar{\bar{\tau}} = 2\mu(\dot{\gamma}, T) \dot{\mathbf{D}}$ – тензором в'язких напружень другого рангу неньютонівської рідини, Па; $\mu(\dot{\gamma}, T)$ – коефіцієнт динамічної в'язкості неньютонівської рідини, Па·с; $\dot{\mathbf{D}} = \frac{1}{2}(\nabla \mathbf{v} + \mathbf{v} \nabla)$ – тензор швидкості

деформації, с⁻¹; $\dot{\gamma} = \sqrt{\frac{1}{2} \dot{\mathbf{D}} : \dot{\mathbf{D}}}$ – другий інваріант від $\dot{\mathbf{D}}$, с⁻¹; $H = \int_{T_{\text{ref}}}^T c_p^{\text{eff}}(T) dT$ – повна масова ентальпія, Дж/кг;

$$c_p^{\text{eff}}(T) = \begin{cases} c_{p-0}(T), & T < T_S; \\ \frac{c_{p-0}(T_S) + c_{p+0}(T_M)}{2} + \frac{L}{T_M - T_S}, & T_S \leq T \leq T_M; \\ c_{p+0}(T), & T > T_M, \end{cases} \quad c_{p-0}, \quad c_{p+0} \text{ – масова}$$

ізобарна теплоємність матеріалу в твердому та рідкому стані, відповідно, Дж/(кг·К); T_M, T_S – абсолютні температури ліквідуса і солідуса, відповідно, К; T_{ref} – абсолютна температура відліку, К; L – масова теплота плавлення,

$$\lambda_{\text{eff}}(T) = \begin{cases} \lambda_{-0}(T), & T < T_S; \\ \lambda_{-0}(T_S) + \frac{\lambda_{+0}(T_M) - \lambda_{-0}(T_S)}{T_M - T_S} T, & T_S \leq T \leq T_M; \\ \lambda_{+0}(T), & T > T_M, \end{cases} \quad \lambda_{-0}, \quad \lambda_{+0} \text{ –}$$

коефіцієнт теплопровідності матеріалу в твердому та рідкому стані, відповідно, Вт/(м·К); $(:)$ – оператор подвійного скалярного добутку.

Степеневий закон для в'язкості неньютоновської рідини записується у вигляді

$$\mu(\dot{\gamma}, T) = \mu_0 H(T) \dot{\gamma}^{n-1}, \quad (8.20)$$

де μ_0 – середнє значення динамічної в'язкості, Па·с;

$H(T) = \exp\left[\frac{E_a}{R}\left(\frac{1}{T - T_0} - \frac{1}{T_a - T_0}\right)\right]$; E_a – енергія активації течії, Дж/моль;

R – універсальна газова стала, Дж/(моль·К); T_a – абсолютна температура активації, К; T_0 – абсолютна температура відліку, К. $n \neq 1$ – показник ступеня, який визначає клас рідини.

Початкові умови для (8.19):

$$\begin{cases} T(\mathbf{x}) = T_0; \\ \mathbf{v}(\mathbf{x}) = \mathbf{v}_0, \end{cases} \quad (8.21)$$

де $\mathbf{x} \in \Omega$ – декартові координати, м; Ω – розрахункова область.

Граничні умови для (8.19):

– у вхідному перетині каналу

$$\begin{cases} \mathbf{v} = \mathbf{v}_{\text{inlet}}; \\ T = T_{\text{inlet}}; \end{cases} \quad (8.22)$$

– у відхідному перетині каналу

$$\begin{cases} p = p_{\text{outlet}} \vee \nabla p = 0; \\ T = T_{\text{outlet}} \vee \nabla T = 0; \end{cases} \quad (8.23)$$

– на твердих стінках розрахункової області Ω

$$\begin{cases} \mathbf{n} \cdot \nabla p|_{\text{wall}} = 0; \\ T|_{\text{wall}} = T_{\text{length}}; \\ \boldsymbol{\tau}_{\text{sh str}}|_{\text{wall}} = -F_{\text{slip}}(v_{\text{wt}} - v_{\text{tt}}) \vee \mathbf{v}|_{\text{wall}} = 0, \end{cases} \quad (8.24)$$

де T_{length} – розподіл температури по довжині каналу, К; $\tau_{\text{sh str}}|_{\text{wall}} = (\bar{\tau} \cdot \mathbf{n}) \cdot \mathbf{t}$ – компонента тангенціального напруження у пристінному шарі, Па; $\mathbf{n}$, $\mathbf{t}$ – одиничні нормальний і тангенціальний вектори до поверхні каналу, відповідно; $\mathbf{v}_w, \mathbf{v}_t$ – вектори результуючої та тангенціальної швидкості на поверхні каналу (у пристінному шарі), м/с; v_{wt}, v_{tt} – тангенціальні компоненти векторів результуючої та тангенціальної швидкості на поверхні каналу (у пристінному шарі), м/с; F_{slip} – коефіцієнт ковзання (тертя) на поверхні каналу, кг/(м²·с).

Лекція 1.5(9) Постановка задачі рухомого шару сипкого матеріалу. Математична постановка задачі для теоретичних досліджень ефективних теплофізичних властивостей сипких матеріалів. Алгоритм розв'язання задачі теоретичного визначення теплофізичних властивостей сипких матеріалів

9.1 Постановка задачі рухомого шару сипкого матеріалу. Математична постановка задачі для теоретичних досліджень ефективних теплофізичних властивостей сипких матеріалів

Потужною альтернативою до експериментальних методів дослідження теплофізичних властивостей (ТФВ), наприклад, сипких матеріалів, можуть бути теоретичні методи, що базуються на математичному моделюванні відповідних фізичних експериментів)³⁴.

Теоретичне визначення ефективних ТФВ сипких матеріалів базується на числовому розв'язанні певної механотермічної задачі. Нехай, маємо циліндричний об'єм діаметром d і висотою 2δ , який спочатку заповнюється частинками сипкого матеріалу до стану механічної рівноваги. На початку процесу урівноваження температури в циліндрі його нижня частина $(0; -\delta)$ піддається температурі T_{cold} , а верхня $-(0; +\delta) - T_{\text{hot}}$ ($T_{\text{hot}} > T_{\text{cold}}$) (рис. 9.1, а). Далі відбувається адіабатний процес урівноваження температури по висоті циліндра. У результаті отримуємо рівноважну температуру T_m і час t_{est} , за який ця температура встановилася (рис. 9.1, б).

При цьому вважається, що частинки сипкого матеріалу мають сферичну форму, а їхні фізичні властивості приймаються ізотропними.

³⁴ Моделювання статички і динаміки сипких матеріалів у LIGGGHTS [Електронний ресурс] : навч. посіб. для здобувачів ступеня магістра за спеціальностями 131 Прикладна механіка, 133 Галузеве машинобудування / А. Я. Карвацький, І. О. Мікульонюк, В. М. Витвицький ; Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – 76 с. URL : <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/45613>

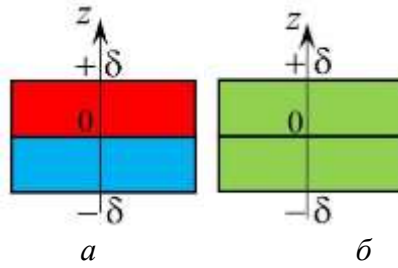


Рис. 9.1. Схема теплообміну між гранулами в шарі сипкого матеріалу: *a* – на початку процесу; *б* – урівноважений стан

На першому етапі розрахунків моделюється механічний процес заповнення циліндричного шару (див. рис. 9.1) частинками сипкого матеріалу різного гранулометричного складу під дією гравітаційних сил до стану механічної рівноваги. Зазначена процедура виконується за допомогою розв'язання системи дискретних рівнянь методу МДЕ вигляду:

$$\begin{cases} m_i \frac{d\mathbf{v}_i}{dt} = m_i \mathbf{b} + \sum_{j=1}^k \mathbf{F}_{ij}; \\ I_i \frac{d\boldsymbol{\omega}_i}{dt} = \sum_{j=1}^k (\mathbf{T}_{ij} + \mathbf{M}_{ij}), \end{cases} \quad (9.1)$$

де m_i – маса i -ї частинки, кг; t – час, с; i – індекс частинки, відносно якої розглядається система рівнянь (9.1); $\mathbf{v}_i$ – вектор лінійної швидкості центра маси частинки, м/с; I_i – момент інерції, кг·м²; $\boldsymbol{\omega}_i$ – вектор кутової швидкості, рад/с; $\mathbf{b}$ – вектор масової сили, Н/кг; $\mathbf{F}_{ij}$ – вектор зовнішньої сили, що діє на частинку i через контакт з частинкою j , Н; j – індекс частинки, що взаємодіє з частинкою i ; k – кількість частинок, що перебувають у контакті з частинкою i ; $\mathbf{T}_{ij}$ – зовнішній крутний момент, пов'язаний з контактною взаємодією частинок i та j , Н·м; $\mathbf{M}_{ij}$ – момент опору коченню, Н·м.

За початкові умови для (9.1) беруть початкові координати та початкову швидкість усіх частинок системи:

$$\mathbf{r}_i|_{t=0} = \mathbf{r}_{i_0}, i = \overline{1, n}; \quad (9.2)$$

$$\mathbf{v}_i|_{t=0} = \mathbf{v}_{i_0}, i = \overline{1, n}, \quad (9.3)$$

де n – кількість частинок у системі; $\mathbf{r}_{i_0}$ – початковий радіус-вектор кожної частинки, м; $\mathbf{v}_{i_0}$ – початковий вектор швидкості кожної частинки, м/с.

Граничні умови в МДЕ для $t > 0$, описують взаємодію частинок з границями розрахункової області Ω_1 , рухомими та нерухомими стінками $G \in \Omega_1$ всередині області:

– частинка перебуває в контакті зі стінкою $g \in G$ геометрії розрахункової області. Такий контакт розглядається аналогічно іншим контактам частинки, а сили взаємодії розраховуються з врахуванням того, що лінійна та кутова швидкості стінки є заданими:

$$\begin{aligned} \mathbf{v}_g &= \text{const}; \\ \boldsymbol{\omega}_g &= \text{const}. \end{aligned} \quad (9.4)$$

– частинка i перебуває за межами розрахункової області. Вважається, що вона покидає систему та більше не бере участі в розрахунках

$$\mathbf{r}_i \notin \Omega_1 \rightarrow n-1. \quad (9.5)$$

Згідно з теорією МДЕ кожна частинка є фізичною точкою з постійними фізичними характеристиками, тобто із самої постановки впливає баланс маси системи. У результаті розв'язання дискретної задачі отримуємо траєкторії руху кожної окремої частинки в системі відліку Лагранжа.

Розрахунки за системою рівнянь (9.1) з початковими і граничними умовами (9.2)–(9.5) виконуються з використанням відомих значень механічних властивостей гранул сипкого матеріалу: $E, \nu, e, \mu_s, \mu_r, \rho$.

Далі виконуються розрахунки теплообміну в циліндрі, що заповнено сипким матеріалом, з відомими істинними значеннями теплофізичних властивостей гранул: c_p, λ, ρ . Дискретне рівняння теплопередачі для сипкого середовища, що складається з окремих частинок, має вигляд

$$m_i c_p \frac{dT_i}{dt} = \sum_{\text{contacts } i-j} \dot{Q}_{i-j}, \quad (9.6)$$

де m_i – маса i -ї частинки, кг; c_p – масова ізобарна теплоємність частинки, Дж/(кг·К); T_i – абсолютна температура частинки, К; $\dot{Q}_{i-j} = h_{ci-j} \Delta T_{i-j}$ – кількість теплоти, що передається крізь контакти між частинкою i та j -и частинками, Вт; $h_{ci-j} = \frac{4\lambda_i \lambda_j}{\lambda_i + \lambda_j} \sqrt{A_{\text{contact } i-j}}$ – коефіцієнт теплопередачі між частинками крізь їх контакти, Вт/К; λ_i – коефіцієнт теплопровідності i -ї

частинки, Вт/(м·К); $A_{\text{contact } i-j}$ – площа контакту між частинками i та j , м².

Величина $\frac{\sum_{\text{contacts } i-j} \dot{Q}_{i-j}}{V_i}$ (Вт/м³) є дивергенцією густини теплового потоку

i -ї частинки, де V_i – об'єм i -ї частинки, м³. Тому для визначення потужності теплового потоку частинок сипкого матеріалу, наприклад, у верхній частині циліндра (див. рис. 9.1) можна скористатися простим підсумовуванням

$$N = \sum_{k=1}^K \left(\sum_{\text{contacts } i-j} \dot{Q}_{i-j} \right)_k, \quad (9.7)$$

де K – кількість частинок сипкого матеріалу у верхній частині циліндра.

Для розрахунків ефективних значень a , λ , c_p використовується аналітичний розв'язок нестационарного рівняння теплопровідності для половини необмеженої пластини за граничних умов першого роду і адіабатної умови на середині пластини в континуальному наближенні.

Одновимірне рівняння нестационарної теплопровідності суцільного середовища має вигляд

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}, \quad (9.8)$$

де T – абсолютна температура, К; t – час, с; $a = \frac{\lambda}{c_p \rho}$ – коефіцієнт

температуропровідності, м²/с; λ – коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м·К); c_p – масова ізобарна теплоємність, Дж/(кг·К); ρ – густина, кг/м³; z – повздовжня координата, м.

Початкові умови для (9.8):

$$T(z)|_{t=0} = T_0, \quad (9.9)$$

де $T_0 = T_{hot}$ – початкова температура, К.

Граничні умови для (9.8) $t > 0$:

$$\left. \frac{dT}{dz} \right|_{z=\pm\delta} = 0, \quad (9.10)$$

$$T|_{z=0} = T_c, \quad (9.11)$$

де T_c – температура стінки (або рівноважна температура T_m), К.

Аналітичний розв'язок Фур'є (9.8)–(9.11) за Ликовим для визначення розподілу температури має вигляд

$$T(z, t) = T_c + (T_0 - T_c) \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n+1} \frac{2}{\mu_n} \cos\left(\mu_n \frac{z}{\delta}\right) \exp(\mu_n^2 Fo), \quad (9.12)$$

де $\mu_n = (2n-1)\frac{\pi}{2}$; δ – половина висоти циліндра, м; $Fo = \frac{at}{\delta^2}$ – число Фур'є.

Диференціюючи (9.12) можна отримати розподіл градієнта температури в напівпластині

$$\frac{dT(z, t)}{dz} = (T_0 - T_c) \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \frac{2}{\delta} \sin\left(\mu_n \frac{z}{\delta}\right) \exp(\mu_n^2 Fo), \quad (9.13)$$

Звідки розподіл густини теплового потоку знаходиться за формулою

$$q(z, t) = -\lambda \frac{dT(z, t)}{dz}. \quad (9.14)$$

Розглянута постановка задачі та методика визначення ефективних теплофізичних властивостей сипких матеріалів (9.1)–(9.14) не передбачає врахування теплообміну конвекцією та випромінюванням.

9.2 Алгоритм розв'язання задачі теоретичного визначення теплофізичних властивостей сипких матеріалів

Алгоритм розв'язання сформульованої задачі (9.1)–(9.14) може бути таким :

1) Розв'язання системи рівнянь (9.1)–(9.5) з моделювання механічного процесу заповнення циліндричного шару (див. рис. 9.1) частинками сипкого матеріалу різного гранулометричного складу до стану механічної рівноваги за умови однакової температури. Визначення насипної густини шару сипкого матеріалу за формулою

$$\rho_{bulk} = \frac{\sum_{m=1}^M \rho_m N_m V_m}{2\delta A}. \quad (9.15)$$

де ρ_m – істинна густина гранул, кг/м³; A – площа основи циліндра, м²;

2δ – висота циліндра, м; M – кількість розмірів частинок у гранулометричному складі сипкого матеріалу; N_m – кількість частинок m -го розміру, м³; $V_m = \frac{4}{3}\pi r_m^3$ – об'єм частинок m -го розміру, м³; r_m – радіус частинок m -го розміру, м.

2) Присвоєння верхній половині циліндра (див. рис. 9.1, а) температури T_{hot} , а нижній – T_{cold} . Розв'язання нестационарної задачі теплопровідності (9.6) з моделювання адіабатного процесу урівноваження температури в циліндричному шарі сипкого матеріалу і побудова графіків зміни температури частинок (дискретного середовища) залежно від координати z і часу $T^D(z, t)$, $t < t_{est}$. Визначення потужності теплового потоку частинок сипкого матеріалу у верхній та нижній частинах циліндричного шару сипкого матеріалу за формулою (9.7) для моменту часу $t < t_{est}$.

3) Знаходження ефективного значення коефіцієнта температуропровідності a_{eff} континуального середовища за допомогою побудови еквівалентного до $T^D(z, t)$ графіка $T(z, t)$ (апроксимуючої функції) за формулою (9.12) з використанням умови $\max_{[0;+\delta]} R^2$. Тут

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (T_i^D - T_i)^2}{\sum_{i=1}^N (T_i^D - \bar{T}^D)^2} - \text{коефіцієнт детермінації; } N - \text{кількість частинок на}$$

інтервалі $[0;+\delta]$; T_i^D – температури частинок сипкого матеріалу на інтервалі $[0;+\delta]$, визначені за розв'язком дискретного рівняння (9.6), К; T_i – континуальне поле температури на інтервалі $[0;+\delta]$, отримане за (9.12), К;

$$\bar{T}^D = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N T_i^D - \text{середнє арифметичне, К.}$$

Визначення градієнта температури $\left. \text{grad} T \right|_{z=0+}^{t < t_{est}}$ за формулою (9.13).

4) Визначення для моменту часу $t < t_{est}$:

– густини теплового потоку за формулою

$$q(0, t) = \frac{N(t)}{A}, \quad (9.16)$$

де $N(t)$ – потужність теплового потоку частинок сипкого матеріалу у верхній половині циліндричного шару (див. рис. 9.1), що визначається за формулою (9.7), Вт; $A = \pi R^2$ – площа основи циліндра, м²;

– ефективного коефіцієнта теплопровідності (9.14)

$$\lambda_{\text{eff}} = - \frac{q(0,t)}{\left. \text{grad} T \right|_{z=0+}^{t < t_{\text{est}}}}; \quad (9.17)$$

– ефективного значення ізобарної масової теплоємності

$$c_{p \text{ eff}} = \frac{\lambda_{\text{eff}}}{a_{\text{eff}} \rho_{\text{bulk}}}. \quad (9.18)$$

Наведений алгоритм (9.15)–(9.18) визначення ефективних значень теплофізичних властивостей сипких матеріалів можна реалізувати з використанням програмного забезпечення LIGGGHTS)³⁵.

Лекція 1.6(10) Математична постановка задачі ізотермічного змішування двох потоків ньютонівської рідини. Математична постановка континуально-дискретної задачі неізотермічної двофазної течії (рідина – тверді частинки)

10.1 Математична постановка задачі ізотермічного змішування двох потоків ньютонівської рідини

Математичну модель ізотермічного змішування двох ламінарних потоків ньютонівської рідини можна записати системою рівнянь, яка включає рівняння нерозривності, записаного для нестисливого середовища, нестационарне рівняння збереження кількості руху:

$$\begin{cases} \nabla \cdot \mathbf{v} = 0; \\ \rho \left[\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} \right] = -\nabla p + \nabla \cdot \bar{\bar{\tau}}, \end{cases} \quad (10.1)$$

де ∇ – оператор Гамільтона, м^{-1} ; $\mathbf{v}$ – вектор швидкості, м/с ; t – час, с ; ρ – густина, кг/м^3 ; p – зовнішній гідростатичний тиск, Па ; $\bar{\bar{\tau}} = 2\eta(\dot{\gamma})\dot{\mathbf{D}}$ – тензором в'язких напружень другого рангу, Па ; $\dot{\mathbf{D}} = \frac{1}{2}(\nabla \mathbf{v} + \mathbf{v} \nabla)$ – тензор швидкості деформації, с^{-1} ; $\eta(\dot{\gamma})$ – в'язкість рідини як функція другого інваріанта $\dot{\gamma}$ від $\dot{\mathbf{D}}$, $\text{Па}\cdot\text{с}$; $\dot{\gamma} = \sqrt{\frac{1}{2}\dot{\mathbf{D}} : \dot{\mathbf{D}}}$ – другий інваріант від $\dot{\mathbf{D}}$, с^{-1} ; $\bar{\bar{\tau}} : \nabla \mathbf{v}$ –

³⁵ URL : <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/45613>

член, що відповідає дисипації механічної енергії, Вт/м³; (:) – оператор подвійного скалярного добутку.

Енергетичний закон для в'язкості неньютонівської рідини має вигляд

$$\eta(\dot{\gamma}) = K \exp\left(\frac{T_0}{T}\right) \dot{\gamma}^{n-1}, \quad (10.2)$$

де K – величина середньої в'язкості рідини, Па·с; $\dot{\gamma}$ – другий інваріант $\mathbf{D}$, с⁻¹; n – показник ступеня, який визначає клас рідини; T – поточна абсолютна температура рідини, К; T_0 – абсолютна температура відліку, К.

За початкові умови системи рівнянь (10.1) приймаються розподіл полів компонент вектора швидкості $\mathbf{v}_0$ і тиску p_0 в момент часу $t = 0$:

$$\begin{cases} \mathbf{v}(x, y, z) = \mathbf{v}_0; \\ p(x, y, z) = p_0, \end{cases} \quad (10.3)$$

де $(x, y, z) \in \Omega$ – декартові координати, м; Ω – розрахункова область.

Граничні умови для (10.1) включають:

- у вхідному січенні каналів задаються нормальні компоненти швидкості або масові витрати матеріалу:

$$\mathbf{n} \cdot \mathbf{v} = v_{inlet}(t); \vee G = G_{inlet}(t), \quad (10.4)$$

де $\mathbf{n}$ – вектор зовнішньої нормалі до поверхні вхідного січення каналу; v_{inlet}, G_{inlet} – швидкість (м/с) та масова витрата (кг/с) у вхідному січенні каналу, відповідно; $\vee$ – логічне «або»;

- у вихідному січенні каналу – нульовий градієнт тиску

$$\mathbf{n} \cdot \nabla p = 0; \quad (10.5)$$

- на поверхнях контакту рідини зі стінками каналу задаються, або пристінні зсувні напруження у формі узагальненого закону Нав'є (граничних умов Нав'є, що являють собою рівняння рівноваги сил, які діють на поверхні контакту між двома середовищами), або умови прилипання:

$$\tau_{w \text{ sh str}} = -F_{slip} (v_{wt} - v_{tt}) \vee \mathbf{v} = 0, \quad (10.6)$$

де $\tau_{w\ sh\ str.} = (\bar{\tau} \cdot \mathbf{n}) \cdot \mathbf{t}$ – компонента тангенціального напруження у пристінному шарі, Па; $\mathbf{n}$, $\mathbf{t}$ – одиничні нормальний і тангенціальний вектори до поверхні каналу, відповідно; $\mathbf{v}_w, \mathbf{v}_t$ – вектори результуючої та тангенціальної швидкості на поверхні каналу (у пристінному шарі), м/с; v_{wt}, v_{tt} – тангенціальні компоненти векторів результуючої та тангенціальної швидкості на поверхні каналу (у пристінному шарі), м/с; F_{slip} – коефіцієнт ковзання (тертя) на поверхні каналу, кг/(м²·с).

10.2 Математична постановка континуально-дискретної задачі неізотермічної двофазної течії (рідина – тверді частинки)

Розглянемо постановку континуально-дискретної задачі двофазної течії, що базується на використанні двох систем відліку: Ейлера для рідкої фази і Лагранжа для твердої фази (Euler-Lagrange). Ця постановка також дістала назву моделі з дискретною фазою (Discrete Phase Models (DPM)).

Математична модель неізотермічної течії рідини може бути представлена системою рівнянь, записаною у системі відліку Ейлера, яка включає квазістаціонарне рівняння нерозривності, нестационарні рівняння збереження кількості руху та енергії:

$$\left\{ \begin{array}{l} \nabla \cdot \mathbf{v} = 0; \\ \rho \left[\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} \right] = -\nabla p + \nabla \cdot \bar{\tau}; \\ \rho \left[\frac{\partial h}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{v} h) \right] = \nabla \cdot [\lambda_{eff}(T) \nabla T] + \bar{\tau} : \nabla \mathbf{v}, \end{array} \right. \quad (10.7)$$

де $\mathbf{v}$ – вектор швидкості, м/с; ρ – густина, кг/м³; t – час, с; p – тиск, Па;

$\bar{\tau}$ – тензор напруження зсуву, Па; $h = \int_0^T c_p(T) dT$ – явна масова ентальпія,

Дж/кг; T – абсолютна температура, К; c_p – масова ізобарна теплоємність,

Дж/(кг·К); λ_{eff} – ефективний коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м·К);

$\bar{\tau} : \nabla \mathbf{v}$ – член, що відповідає дисипації механічної енергії, Вт/м³;

(:) – оператор подвійного скалярного добутку.

Траєкторії руху твердих частинок визначаються інтегруванням за псевдо- часовими кроками рівняння балансу сил, що діють на частинку, записаного у Лагранжевій системі відліку

$$\frac{d\mathbf{u}_p}{dt} = F_D(\mathbf{u} - \mathbf{u}_p) + \frac{\mathbf{g}(\rho - \rho_p)}{\rho_p}, \quad (10.8)$$

де $\mathbf{u}$ – вектор швидкості рідкого середовища, м/с; $\mathbf{u}_p$ – вектор швидкості твердих частинок, м/с; $F_D(\mathbf{u} - \mathbf{u}_p)$ – сила опору, віднесена до маси частинки, м/с²; $F_D = \frac{18\mu C_D \text{Re}}{\rho_p d_p^2 24}$, 1/с; C_D – безрозмірний коефіцієнт гідравлічного опору; ρ_p – густина твердих частинок кг/м³, d_p – усереднений діаметр твердих частинок, м; $\text{Re} = \frac{\rho d_p |\mathbf{u}_p - \mathbf{u}|}{\mu}$ – число Рейнольдса.

Рівняння збереження енергії твердих частинок, в якому враховується конвективний та радіаційний теплообмін між частинками та рідким середовищем, записується у наступному вигляді

$$m_p c_p \frac{dT_p}{dt} = h A_p (T_\infty - T_p) + \varepsilon_p A_p \sigma (\theta_R^4 - T_p^4), \quad (10.9)$$

де m_p – маса частинки, кг; h – конвективний коефіцієнт теплообміну, Вт/(м²·К); A_p – поверхнева площа частинки, м²; T_∞ – локальна температура середовища, К; ε_p – ступінь чорноти частинки; θ_R – радіаційна температура, К.

За початкові умови системи рівнянь (10.7) приймаються розподіл полів компонент вектора швидкості, тиску та температури (10.10), які записуються у Ейлеревій системі відліку:

$$\begin{cases} \mathbf{v}_0 = \mathbf{v}(x, y, z); \\ p_0 = p(x, y, z); \\ T_0 = T(x, y, z), \end{cases} \quad (10.10)$$

де $(x, y, z) \in \Omega$ – декартові координати, м; Ω – розрахункова область.

Граничні умови для (10.7), які записуються у Ейлеревій системі відліку, включають: у вхідному січенні задана нормальна швидкість і температура (10.11); у відхідному січенні – нульовий градієнт тиску й температури (10.12); на поверхнях контакту рідини зі стінками каналу – умови проковзування та умови конвективного типу або густину теплового потоку (10.13):

$$\begin{cases} \mathbf{n} \cdot \mathbf{v} = v_{inlet}(t); \\ T = T_{inlet}(t), \end{cases} \quad (10.11)$$

$$\begin{cases} \mathbf{n} \cdot \nabla p = 0; \\ \mathbf{n} \cdot \nabla T = 0, \end{cases} \quad (10.12)$$

$$\begin{cases} \bar{\bar{\boldsymbol{\tau}}} = \boldsymbol{\tau}_{wall} \vee F_{slip}(\mathbf{v}_w - \mathbf{v}_t) \cdot \mathbf{t} + (\bar{\bar{\boldsymbol{\tau}}} \cdot \mathbf{n}) \cdot \mathbf{t} = 0 \rightarrow \tau_{w\ sh\ str} = -F_{slip}(v_{wt} - v_{tt}); \\ \begin{cases} \mathbf{n} \cdot (-\lambda_{eff}(T)\nabla T) = \alpha(T - T_{\infty}); \\ \mathbf{n} \cdot (-\lambda_{eff}(T)\nabla T) = q_n, \end{cases} \end{cases} \quad (10.13)$$

де v_{inlet}, T_{inlet} – швидкість (м/с) та абсолютна температура (К) у вхідному січенні, відповідно; $\boldsymbol{\tau}_{wall}$ – тензор зсувних напружень на границі контакту рідина-тверде тіло, Па; $\mathbf{n}, \mathbf{t}$ – одиничні нормальний і тангенціальний вектори до поверхні каналу, відповідно; $\tau_{w\ sh\ str} = (\bar{\bar{\boldsymbol{\tau}}} \cdot \mathbf{n}) \cdot \mathbf{t}$ – компонента тангенціального напруження у пристінному шарі, Па; $\mathbf{v}_w, \mathbf{v}_t$ – вектори результуючої та тангенціальної швидкості на поверхні каналу (у пристінному шарі), м/с; $v_{wt} = \mathbf{v}_w \cdot \mathbf{t}, v_{tt} = \mathbf{v}_t \cdot \mathbf{t}$ – тангенціальні компоненти векторів результуючої та тангенціальної швидкості на поверхні каналу (у пристінному шарі), м/с; F_{slip} – коефіцієнт ковзання (тертя) на поверхні каналу, кг/(м²·с); $\vee$ – логічне «або»; α – коефіцієнт тепловіддачі, Вт/(м²·К); T_{∞} – абсолютна температура оточуючого середовища, К; q_n – нормальна компонента вектора густини теплового потоку $\mathbf{q}$, Вт/м².

Початкові умови для (10.8), (10.9) записуються у Лагранжевій системі відліку і включають: початкові координати, початкову швидкість і температуру твердих частинок.

Граничні умови для (10.8), (10.9) записуються у Лагранжевій системі відліку: у разі взаємодії частинки з твердою границею розрахункової області Ω можливі два випадки: відбиття або поглинання; якщо частинка виходить за межі Ω , то вона не враховується під час розрахунків.

Лекція 1.7(11) Математичне формулювання задач багатофазних потоків на базі моделей VOF і Ейлера

11.1 Математичне формулювання задачі багатофазних потоків на базі моделі VOF

Гідродиміку, масо- й теплообмін двофазного середовища (рідина – газ) можна описати в наближенні VOF системою рівнянь, що включає: два рівняння нерозривності, записані для кожної фази суміші і рівняння збереження кількості руху та енергії, записані для суміші:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{1}{\rho} \left[\frac{\partial}{\partial \tau} (\alpha_i \rho_i) + \nabla \cdot (\alpha_i \rho_i \mathbf{v}_i) \right] = \sum_{j=1}^2 (\dot{m}_{ji} - \dot{m}_{ij}) + S_{\alpha_i}; \\ \frac{\partial}{\partial \tau} (\rho \mathbf{v}) + (\rho \mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} = -\nabla p + \nabla \cdot [\mu_{\text{eff}} (\nabla \mathbf{v} + \mathbf{v} \nabla)] + \rho \mathbf{g} + \mathbf{F}_{\text{vol}}; \quad i = 1, 2 \\ \frac{\partial}{\partial \tau} (\rho E) + \nabla \cdot [\mathbf{v} (\rho E + p)] = \nabla \cdot (\lambda_{\text{eff}} \nabla T) + S_h, \end{array} \right. \quad (11.1)$$

де $\rho = \sum_{i=1}^2 \alpha_i \rho_i$ – ефективна густина суміші фаз, кг/м³; α_i – об’ємна частка

фази в суміші $\sum_{i=1}^2 \alpha_i = 1$; ρ_i – дійсна густина i -ї фази, кг/м³; τ – час, с;

∇ – оператор Гамільтона, м⁻¹; $(\cdot)$ – оператор скалярного добутку; $\mathbf{v}_i$ – вектор швидкості потоку i -ї фази, м/с; $\dot{m}_{ji}$ – швидкість передачі маси від фази j до фази i (причому $\dot{m}_{ii} = 0$), кг/(с·м³); S_{α_i} – джерело маси i -ї фази (зазвичай $S_{\alpha_i} = 0$), кг/(с·м³); $\mathbf{v}$ – вектор швидкості потоку суміші фаз, м/с; p – тиск, Па;

$\mu_{\text{eff}} = \sum_{i=1}^2 \alpha_i \mu_i$ – ефективний коефіцієнт динамічної в’язкості суміші, Па·с; μ_i – коефіцієнт динамічної в’язкості i -ї фази, Па·с; $\mathbf{g}$ – вектор гравітації, м/с²; $\mathbf{F}_{\text{vol}}$ – об’ємна сила, пов’язана з поверхневим натягом і адгезією стінок, Н/м³;

$E = c_v T + \frac{\mathbf{v} \cdot \mathbf{v}}{2}$ – повна масова енергія суміші, Дж/кг; $c_v = \sum_{i=1}^2 \alpha_i c_{vi}$ – масова ізохорна теплоємність суміші, Дж/(кг·К); c_{vi} – масова ізохорна теплоємність

i -ї фази, Дж/(кг·К); T – абсолютна температура, К; $\lambda_{\text{eff}} = \sum_{i=1}^2 \alpha_i \lambda_i$ –

ефективний коефіцієнт теплопровідності суміші, Вт/(м·К); λ_i – коефіцієнт теплопровідності i -ї фази, Вт/(м·К); S_h – джерельний член, Вт/м³.

Об’ємна сила, пов’язана з поверхневим натягом, визначається співвідношенням

$$\mathbf{F}_{\text{vol}} = \sigma \frac{\rho \kappa_i \mathbf{n}_i}{\frac{1}{2}(\rho_i + \rho_j)}, \quad i, j = 1, 2, \quad (11.2)$$

де σ – коефіцієнт поверхневого натягу, Н/м; $\mathbf{n}_i = \nabla \alpha_i$ – градієнт масової частки i -ї фази ($\nabla \alpha_i = -\nabla \alpha_j$), м⁻¹; $\hat{\mathbf{n}}_i = \frac{\mathbf{n}_i}{|\mathbf{n}_i|}$ – вектор одиничної нормалі до поверхні i -ї фази; $\kappa_i = \nabla \cdot \hat{\mathbf{n}}_i$ – кривизна поверхні розділу фаз ($\kappa_i = -\kappa_j$), м⁻¹.

У разі врахування турбулентності багатофазних потоків до системи рівнянь (11.1) треба додати, наприклад, два скалярні рівняння k – ε моделі турбулентності для суміші. Система двох скалярних рівнянь RANS стандартної k – ε моделі турбулентності мають вигляд:

$$\begin{cases} \frac{\partial(\bar{\rho}k)}{\partial\tau} + \nabla \cdot (\bar{\rho} \tilde{\mathbf{v}} k) = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + \bar{\tau}_{\text{eff}} : \nabla \tilde{\mathbf{v}} - \bar{\rho} \varepsilon; \\ \frac{\partial(\bar{\rho} \varepsilon)}{\partial\tau} + \nabla \cdot (\bar{\rho} \tilde{\mathbf{v}} \varepsilon) = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right] + C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} (\bar{\tau}_{\text{eff}} : \nabla \tilde{\mathbf{v}}) - C_{\varepsilon 2} \bar{\rho} \frac{\varepsilon^2}{k}, \end{cases} \quad (11.3)$$

де $\bar{\rho}$ – густина суміші, осереднена за Reynolds, кг/м³; k – масова турбулентна кінетична енергія суміші, Дж/кг; τ – час, с; ∇ – оператор Гамільтона, м⁻¹; $\tilde{\mathbf{v}}$ – вектор швидкості суміші, осереднений за Favre, м/с; μ

– коефіцієнт динамічної в’язкості суміші, Па·с; $\mu_t = \frac{\bar{\rho} C_\mu k^2}{\varepsilon}$ – коефіцієнт

турбулентної в’язкості суміші, Па·с;

$\bar{\tau}_{\text{eff}} = (\mu + \mu_t) \left[\nabla \tilde{\mathbf{v}} + \tilde{\mathbf{v}} \nabla - \frac{2}{3} (\nabla \cdot \tilde{\mathbf{v}}) \mathbf{I} \right] - \frac{2}{3} \bar{\rho} k \mathbf{I}$ – тензор 2-го рангу ефективних

зсувних напружень суміші, Па; $\mathbf{I}$ – одиничний тензор 2-го рангу;

$(:)$ – оператор подвійного скалярного добутку; ε – швидкість дисипації масової турбулентної кінетичної енергії суміші, Дж/(кг·с); $C_{\varepsilon 1} = 1,44$;

$C_{\varepsilon 2} = 1,92$; $C_\mu = 0,09$; $\sigma_k = 1,0$; $\sigma_\varepsilon = 1,3$ – коефіцієнти k – ε моделі

турбулентності.

Початкові умови для (11.1)–(11.3):

$$\begin{cases} \tilde{T}_{\text{mix}}(X) = T_0; \\ \tilde{\mathbf{v}}_{\text{mix}}(X) = \mathbf{v}_0; \\ \alpha_2 = \alpha_0; \\ k_{\text{mix}}(X) = k_0; \\ \varepsilon_{\text{mix}}(X) = \varepsilon_0, \end{cases} \quad (11.4)$$

де $X(x, y, z) \in \Omega$ – декартові координати, м; Ω – розрахункова область;
 mix – відноситься до суміші.

Граничні умови для (11.1)–(11.3):

– у вхідному перетині для суміші (11.5), 1-ї фази (11.6) і 2-ї фази (11.7)

$$\begin{cases} \bar{p}_{\text{mix}} = p_{\text{inlet}}; \\ k_{\text{mix}} = k_{\text{inlet}}; \\ \varepsilon_{\text{mix}} = \varepsilon_{\text{inlet}}; \end{cases} \quad (11.5)$$

$$\begin{cases} \tilde{T}_1 = T_{1\text{inlet}}; \\ G_1 = G_{1\text{inlet}} \end{cases} \quad (11.6)$$

$$\begin{cases} \tilde{T}_2 = T_{2\text{inlet}}; \\ G_2 = G_{2\text{inlet}}, \end{cases} \quad (11.7)$$

де G_1, G_2 – масова витрата 1-ї і 2-ї фаз, кг/с;

– у відхідному перетині для суміші (11.8), 1-ї фази (11.9) і 2-ї фази (11.10)

$$\begin{cases} \bar{p}_{\text{mix}} = p_{\text{outlet}}; \\ k_{\text{mix}} = k_{\text{outlet}}; \\ \varepsilon_{\text{mix}} = \varepsilon_{\text{outlet}}; \end{cases} \quad (11.8)$$

$$\begin{cases} \tilde{T}_1 = T_{1\text{outlet}}; \\ \alpha_1 = \alpha_{1\text{outlet}} \end{cases} \quad (11.9)$$

$$\begin{cases} \tilde{T}_2 = T_{2\text{outlet}}; \\ \alpha_2 = \alpha_{2\text{outlet}}, \end{cases} \quad (11.10)$$

– на твердих стінках розрахункової області Ω для суміші

$$\left\{ \begin{array}{l} \mathbf{n} \cdot \nabla \bar{p}|_{\text{wall}} = 0; \\ \mathbf{n} \cdot (-\lambda \nabla \tilde{T})|_{\text{wall}} = q_n \vee \mathbf{n} \cdot \nabla \tilde{T}|_{\text{wall}} = 0; \\ \tilde{\mathbf{v}}|_{\text{wall}} = 0; \\ k|_{\text{wall}} = 0; \\ \varepsilon|_{\text{wall}} = 0, \end{array} \right. \quad (11.11)$$

де q_n – нормальна густина теплового потоку, Вт/м².

До основних обмежень розглянутої постановки (11.1)–(11.11) відносяться такі:

- одна із фаз повинна бути стисливим середовищем;
- апроксимація конвективних членів (11.1) і (11.3) повинна бути тільки 1-го порядку;
- розв’язувач – тільки pressure-based.

До основних недоліків постановки (11.1)–(11.11) відносяться такі:

- у разі великої різниці по векторах швидкості (фізичним властивостям у декілька порядків) між фазами використання наближення суміші в рівнянні збереження кількості руху може негативно вплинути на точність розрахунків полів швидкості поблизу границі розділу фаз;
- у разі великої різниці по температурі (фізичним властивостям у декілька порядків) між фазами використання наближення суміші в рівнянні збереження енергії може негативно вплинути на точність розрахунків полів температури поблизу границі розділу фаз.

11.2 Математичне формулювання задачі багатофазних потоків на базі моделі Ейлера

Гідродиміку, масо- й теплообмін двофазного середовища (рідина – газ) можна описати в наближенні моделі Ейлера системою рівнянь, що включає: по два рівняння нерозривності, рівняння збереження кількості руху та енергії:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial}{\partial \tau}(\alpha_i \rho_i) + \nabla \cdot (\alpha_i \rho_i \mathbf{v}_i) = \sum_{j=1}^2 (\dot{m}_{ji} - \dot{m}_{ij}) + S_i; \\ \frac{\partial}{\partial \tau}(\alpha_i \rho_i \mathbf{v}_i) + (\alpha_i \rho_i \mathbf{v}_i \cdot \nabla) \mathbf{v}_i = -\alpha_i \nabla p_i + \nabla \cdot \bar{\bar{\tau}}_i + \\ + \alpha_i \rho_i \mathbf{g} + \sum_{j=1}^2 [\mathbf{R}_{ji} + \dot{m}_{ji} \mathbf{v}_{ji} - \dot{m}_{ij} \mathbf{v}_{ij}] + \mathbf{F}_i + \mathbf{F}_{\text{lift},i} + \mathbf{F}_{\text{vm},i}; \quad i, j = 1, 2 \\ \frac{\partial}{\partial \tau}(\alpha_i \rho_i h_i) + \nabla \cdot (\alpha_i \rho_i \mathbf{v}_i h_i) = -\alpha_i \frac{\partial p_i}{\partial \tau} + \bar{\bar{\tau}}_i : (\nabla \mathbf{v}_i) + \\ + \nabla \cdot (\lambda_i \nabla T_i) + \sum_{j=1}^2 [Q_{ji} + \dot{m}_{ji} h_{ji} - \dot{m}_{ij} h_{ij}] + S_i, \end{array} \right. \quad (11.12)$$

де α_i – об’ємна частка фази i -ї фази $\sum_{i=1}^2 \alpha_i = 1$; ρ_i – густина i -ї фази, кг/м³;

τ – час, с; ∇ – оператор Гамільтона, м⁻¹; $(\cdot)$ – оператор скалярного добутку; $\mathbf{v}_i$ – вектор швидкості потоку i -ї фази, м/с; $\dot{m}_{ji}$ – швидкість передачі маси від фази j до фази i (причому $\dot{m}_{ii} = 0$), кг/(с·м³); S_i – джерело маси i -ї фази (зазвичай приймають $S_i = 0$), кг/(с·м³); p – тиск, Па;

$\bar{\bar{\tau}}_i = \alpha_i \mu_i (\nabla \mathbf{v}_i + \mathbf{v}_i \nabla) + \alpha_i \left(\eta_i - \frac{2}{3} \mu_i \right) \nabla \cdot \mathbf{v}_i \mathbf{I}$ – тензор 2-го рангу ефективних зсувних напружень i -ї фази, Па; μ_i – коефіцієнт динамічної (зсувної)

в’язкості i -ї фази, Па·с; η_i – коефіцієнт об’ємної в’язкості i -ї фази, Па·с; $\mathbf{I}$ – одиничний тензор 2-го рангу; $\mathbf{g}$ – вектор гравітації, м/с²; $\mathbf{R}_{ji} = -\mathbf{R}_{ij}$ (причому $\mathbf{R}_{ii} = 0$) – об’ємна сила міжфазної взаємодії, Н/м³; $\mathbf{F}_i$ – зовнішня об’ємна сила, що діє на i -у фазу, Н/м³; $\mathbf{F}_{\text{lift},i}$ – підйомна об’ємна сила, що діє на i -у фазу, Н/м³; $\mathbf{F}_{\text{vm},i}$ – віртуальна об’ємна сила, що

діє на i -у фазу, Н/м³; $\mathbf{v}_{ji} = \begin{cases} \mathbf{v}_j & \text{при } \dot{m}_{ji} > 0 \\ \mathbf{v}_i & \text{при } \dot{m}_{ji} < 0 \end{cases}$ – вектор швидкості на міжфазній

поверхні, м/с; $h_i = \int_{T_{\text{ref}}}^T c_{pi} dT$ – явна масова ентальпія i -ї фази, Дж/кг;

c_{pi} – масова ізохорна теплоємність i -ї фази, Дж/(кг·К); T – абсолютна температура, К; T_{ref} – абсолютна температура відліку, К; $(:)$ – оператор подвійного скалярного добутку; λ_i – коефіцієнт теплопровідності i -ї фази, Вт/(м·К); $Q_{ji} = -Q_{ij}$ (причому $Q_{ii} = 0$) – інтенсивність теплообміну між

фазами, Вт/м³; $h_{ji} = \begin{cases} h_j & \text{при } \dot{m}_{ji} > 0 \\ h_i & \text{при } \dot{m}_{ji} < 0 \end{cases}$, – масова ентальпія при випаровуванні

або конденсації на міжфазній границі, Дж/кг; S_h – об’ємний джерельний член i -ї фази, пов’язаний з хімічними реакціями і тепловим випромінюванням, Вт/м³.

Об’ємна сила міжфазної взаємодії в рівнянні збереження кількості руху визначається за формулою

$$\mathbf{R}_{ji} = K_{ji}(\mathbf{v}_j - \mathbf{v}_i), \quad (11.13)$$

де $K_{ji} = \frac{\alpha_i \alpha_j \rho_j f}{\tau_j}$ – коефіцієнт обміну імпульсом на поверхні розділу фаз ($K_{ji} = K_{ij}$), кг/(м³·с); f – коефіцієнт гідравлічного опору, який визначається

залежно від моделі; $\tau_j = \frac{\rho_j d_j^2}{18\mu_j}$ – час релаксації крапель j -ї фази, с;

d_j – діаметр крапель, м.

За моделлю Schiller і Naumann коефіцієнт гідравлічного опору f визначається за формулою

$$f = \frac{C_D \text{Re}}{24}, \quad (11.14)$$

де $C_D = \begin{cases} 24(1 + 0.15 \text{Re}^{0.687}) / \text{Re} & \text{Re} \leq 1000 \\ 0.44 & \text{Re} > 1000 \end{cases}$; $\text{Re} = \frac{\rho_i |\mathbf{v}_j - \mathbf{v}_i| d_j}{\mu_i}$ – число

Reynolds.

Підйомна об’ємна сила в рівнянні збереження кількості руху визначається співвідношенням

$$\mathbf{F}_{\text{lift},i} = -\frac{1}{2} \alpha_i \rho_i (\mathbf{v}_i - \mathbf{v}_j) \times (\nabla \times \mathbf{v}_i). \quad (11.15)$$

Віртуальна об’ємна сила в рівнянні збереження кількості руху визначається за формулою

$$\mathbf{F}_{\text{vm},i} = \frac{1}{2} \alpha_i \rho_i \left(\frac{d_i \mathbf{v}_i}{d\tau} - \frac{d_j \mathbf{v}_j}{d\tau} \right), \quad (11.16)$$

де $\frac{d_i(\phi)}{d\tau} = \frac{\partial(\phi)}{\partial\tau} + (\mathbf{v}_i \cdot \nabla)\phi$ – матеріальна похідна.

Ефект від дії підйомної і віртуальної сил тим більший, чим більша різниця між густиною фаз у багатofазному потоці.

Інтенсивність теплообміну між фазами Q_{ji} , що входить до рівняння збереження енергії, визначається співвідношенням

$$Q_{ji} = \hat{h}_{ji}(T_j - T_i), \quad (11.17)$$

де $\hat{h}_{ji} = \frac{6\lambda_i \alpha_j \alpha_i \text{Nu}_j}{d_j^2}$ – об’ємний коефіцієнт тепловіддачі на міжфазній

границі, Вт/(м³·К); $\text{Nu}_j = 2.0 + 0.6 \text{Re}_j^{1/2} \text{Pr}^{1/3}$ – число Nusselt j -ї фази;

$\text{Pr} = \frac{c_{p_i} \mu_i}{\lambda_i}$ – число Prandtl i -ї фази; c_{p_i} – масова ізохорна теплоємність i -ї фази, Дж/(кг·К).

У разі врахування турбулентності багатofазних потоків до системи рівнянь (11.12) треба додати, наприклад, два скалярні рівняння k – ε моделі турбулентності для кожної із фаз. Система двох скалярних рівнянь RANS стандартної k – ε моделі турбулентності мають вигляд:

$$\left\{ \begin{aligned} & \frac{\partial(\alpha_i \bar{\rho}_i k_i)}{\partial\tau} + \nabla \cdot (\alpha_i \bar{\rho}_i \tilde{\mathbf{v}}_i k_i) = \nabla \cdot \left(\alpha_i \frac{\mu_{t,i}}{\sigma_k} \nabla k_i \right) + (\alpha_i G_{k,i} - \alpha_i \bar{\rho}_i \varepsilon_i) + \\ & + \sum_{j=1}^2 K_{ji} (C_{ji} k_j - C_{ij} k_i) - \sum_{j=1}^2 K_{ji} (\tilde{\mathbf{v}}_j - \tilde{\mathbf{v}}_i) \frac{\mu_{t,j}}{\alpha_j \sigma_k} \nabla \alpha_j; \\ & \frac{\partial(\alpha_i \bar{\rho}_i \varepsilon_i)}{\partial\tau} + \nabla \cdot (\alpha_i \bar{\rho}_i \tilde{\mathbf{v}}_i \varepsilon_i) = \nabla \cdot \left(\alpha_i \frac{\mu_{t,i}}{\sigma_\varepsilon} \nabla \varepsilon_i \right) + \\ & + \frac{\varepsilon_i}{k_i} (C_{1\varepsilon} \alpha_i G_{k,i} - C_{2\varepsilon} \alpha_i \bar{\rho}_i \varepsilon_i) + C_{3\varepsilon} \left[\sum_{j=1}^2 K_{ji} (C_{ji} k_j - C_{ij} k_i) - \right. \\ & \left. - \sum_{j=1}^2 K_{ji} (\tilde{\mathbf{v}}_j - \tilde{\mathbf{v}}_i) \frac{\mu_{t,j}}{\alpha_j \sigma_\varepsilon} \nabla \alpha_j + \sum_{j=1}^2 K_{ji} (\tilde{\mathbf{v}}_j - \tilde{\mathbf{v}}_i) \frac{\mu_{t,i}}{\alpha_i \sigma_\varepsilon} \nabla \alpha_i \right], \end{aligned} \right. \quad i, j = 1, 2 \quad (11.18)$$

де α_i – об’ємна частка фази i -ї фази $\sum_{i=1}^2 \alpha_i = 1$; $\bar{\rho}_i$ – густина i -ї фази, осереднена за Reynolds, кг/м³; τ – час, с; ∇ – оператор Гамільтона, м⁻¹; $(\cdot)$ – оператор скалярного добутку; $\tilde{\mathbf{v}}_i$ – вектор швидкості потоку i -ї фази, осереднений за Favre, м/с; k – масова турбулентна кінетична енергія i -ї фази, Дж/кг; ε – швидкість дисипації масової турбулентної кінетичної енергії суміші, Дж/(кг·с); $\mu_{t,i} = \bar{\rho}_i C_\mu \frac{k_i}{\varepsilon_i}$ – турбулентна в’язкість i -ї фази, Па·с; K_{ji} – коефіцієнт обміну імпульсом на поверхні розділу фаз, кг/(м³·с); C_{ij} – коефіцієнт, пов’язаний з дисперсією частинок (крапель); $G_{k,i} = \mu_{t,i} \nabla \mathbf{v}_i : (\nabla \mathbf{v}_i + \mathbf{v}_i \nabla)$, Па/с; $(:)$ – оператор подвійного скалярного добутку; $\sigma_k, \sigma_\varepsilon, C_\mu, C_{1\varepsilon}, C_{2\varepsilon}, C_{3\varepsilon}$ – параметри k – ε моделі.

Початкові умови для (11.12)–(11.18):

$$\begin{cases} \tilde{T}_i(X) = T_{0i}; \\ \tilde{\mathbf{v}}_i(X) = \mathbf{v}_{0i}; \\ \alpha_i = \alpha_{0i}; \quad i = 1, 2 \\ k_i(X) = k_{0i}; \\ \varepsilon_i(X) = \varepsilon_{0i}, \end{cases} \quad (11.19)$$

де $X(x, y, z) \in \Omega$ – декартові координати, м; Ω – розрахункова область.

Граничні умови для (11.12)–(11.18):

– у вхідному перетині для 1-ї фази (11.20) і 2-ї фази (11.21)

$$\begin{cases} \tilde{\mathbf{v}}_1 = \mathbf{v}_{\text{inlet } 1}; \\ \tilde{T}_1 = T_{\text{inlet } 1}; \\ k_1 = k_{\text{inlet } 1}; \\ \varepsilon_1 = \varepsilon_{\text{inlet } 1}; \end{cases} \quad (11.20)$$

$$\begin{cases} \tilde{\mathbf{v}}_2 = \mathbf{v}_{\text{inlet } 2}; \\ \tilde{T}_2 = T_{\text{inlet } 2}; \\ \alpha_2 = \alpha_{\text{inlet } 2}; \\ k_2 = k_{\text{inlet } 2}; \\ \varepsilon_2 = \varepsilon_{\text{inlet } 2}; \end{cases} \quad (11.21)$$

– у відхідному перетині для суміші (11.22), 1-ї фази (11.23) і 2-ї фази (11.24)

$$\begin{cases} \bar{p}_{\text{mix}} = p_{\text{outlet}}; \\ k_{\text{mix}} = k_{\text{outlet}}; \\ \varepsilon_{\text{mix}} = \varepsilon_{\text{outlet}}; \end{cases} \quad (11.22)$$

$$\begin{cases} \tilde{T}_1 = T_{1\text{outlet}}; \\ \alpha_1 = \alpha_{1\text{outlet}} \end{cases} \quad (11.23)$$

$$\begin{cases} \tilde{T}_2 = T_{2\text{outlet}}; \\ \alpha_2 = \alpha_{2\text{outlet}}, \end{cases} \quad (11.24)$$

де mix – відноситься до суміші;

– на твердих стінках розрахункової області Ω для суміші (11.25), 1-ї фази (11.26) і 2-ї фази (11.27)

$$\begin{cases} \mathbf{n} \cdot (-\lambda \nabla \tilde{T})|_{\text{wall}} = q_n \vee \mathbf{n} \cdot \nabla \tilde{T}|_{\text{wall}} = 0; \\ k|_{\text{wall}} = 0; \\ \varepsilon|_{\text{wall}} = 0, \end{cases} \quad (11.25)$$

$$\tau_{\text{w sh str } 1} = -F_{\text{slip } 1} (v_{\text{wt } 1} - v_{\text{tt } 1}) \vee \mathbf{v}_1 = 0; \quad (11.26)$$

$$\tau_{\text{w sh str } 2} = -F_{\text{slip } 2} (v_{\text{wt } 2} - v_{\text{tt } 2}) \vee \mathbf{v}_2 = 0, \quad (11.27)$$

де q_n – нормальна густина теплового потоку, Вт/м²; $\tau_{\text{w sh str } i} = (\bar{\tau}_i \cdot \mathbf{n}) \cdot \mathbf{t}$, $i=1,2$ – компонента тангенціального напруження у пристінному шарі, Па; $\mathbf{n}$, $\mathbf{t}$ – одиничні нормальний і тангенціальний вектори до поверхні каналу, відповідно; $\mathbf{v}_{wi}, \mathbf{v}_{ti}$, $i=1,2$ – вектори результуючої та тангенціальної швидкості на поверхні каналу (у пристінному шарі), м/с; $v_{\text{wt } i}, v_{\text{tt } i}$, $i=1,2$ – тангенціальні компоненти векторів результуючої та тангенціальної швидкості на поверхні каналу (у пристінному шарі), м/с; $F_{\text{slip } i}$, $i=1,2$ – коефіцієнт ковзання (тертя) на поверхні каналу, кг/(м²·с).

Модель Ейлера для багатофазних потоків позбавлена основних недоліків моделі VOF.

Лекція 1.8(12) Математичне формулювання задачі газифікації вуглецевмісного матеріалу на базі DPM для суміші реагуючих газів із врахуванням турбулентного режиму течії. Глобальні гетерогенні (поверхневі) та гомогенні (об'ємні) реакції

12.1 Математичне формулювання задачі газифікації вуглецевмісного матеріалу на базі DPM для суміші реагуючих газів із врахуванням турбулентного режиму течії

Математичне формулювання задачі газифікації вуглецевмісного матеріалу на базі DPM для суміші реагуючих газів із врахуванням турбулентного режиму течії, теплового випромінювання та взаємодії з дискретною твердою фазою включає систему рівнянь (Reynolds averaged Navier-Stokes equations (RANS)), яка містить: рівняння збереження маси, збереження кількості руху, переносу компонентів хімічних реакцій, збереження енергії і два рівняння моделі турбулентності для турбулентної кінетичної енергії та її дисипації)³⁶:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial \bar{\rho}}{\partial t} + \nabla \cdot (\bar{\rho} \tilde{\mathbf{v}}) = S_{pm}; \\ \frac{\partial \bar{\rho} \tilde{\mathbf{v}}}{\partial t} + (\bar{\rho} \tilde{\mathbf{v}} \cdot \nabla) \tilde{\mathbf{v}} = -\nabla \bar{p} + \nabla \cdot \bar{\boldsymbol{\tau}}_{eff} + \bar{\rho} \mathbf{g} + S_{pv}; \\ \frac{\partial \bar{\rho} \tilde{Y}_k}{\partial t} + \nabla \cdot (\bar{\rho} \tilde{\mathbf{v}} \tilde{Y}_k) = \nabla \cdot \bar{\mathbf{J}}_k + \bar{\omega}_k, \quad k = \overline{1, N}; \\ \frac{\partial \bar{\rho} \tilde{h}}{\partial t} + \nabla \cdot (\bar{\rho} \tilde{\mathbf{v}} \tilde{h}) = \bar{\omega}_T + \nabla \cdot \bar{p} + \nabla \cdot \left(\bar{\lambda} \nabla T + \frac{\mu_t}{Sc_t} \nabla h \right) + \\ + \bar{\boldsymbol{\tau}}_{eff} : \nabla \mathbf{v} - \nabla \cdot \left(\bar{\rho} \sum_{k=1}^N \mathbf{J}_k h_k \right) + S_{rad} + S_{ph}; \\ \frac{\partial (\bar{\rho} k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\bar{\rho} \tilde{\mathbf{v}} k) = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + \bar{\boldsymbol{\tau}}_{eff} : \nabla \tilde{\mathbf{v}} - \bar{\rho} \varepsilon; \\ \frac{\partial (\bar{\rho} \varepsilon)}{\partial t} + \nabla \cdot (\bar{\rho} \tilde{\mathbf{v}} \varepsilon) = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right] + C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} (\bar{\boldsymbol{\tau}}_{eff} : \nabla \tilde{\mathbf{v}}) - C_{\varepsilon 2} \bar{\rho} \frac{\varepsilon^2}{k}; \\ \bar{p} = \bar{\rho} \frac{R}{W} \tilde{T}, \end{array} \right. \quad (12.1)$$

³⁶ Determination of parameters of the carbon-containing materials gasification process in the rotary kiln cooler drum / A. Karvatskii, T. Lazarev, S. Leleka, I. Mikulionok, O. Ivanenko // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2020. No 4(8-106). P. 65–76. DOI: 10.15587/1729-4061.2020.210767

де $\bar{\cdot}$, $\tilde{\cdot}$ – означає, що величина осереднена за Reynolds і Favre, відповідно; $\bar{\rho}$ – густина, кг/м^3 ; t – час, с ; ∇ – оператор Гамільтона, м^{-1} ; $\tilde{\mathbf{v}}$ – вектор швидкості, м/с ; $\bar{p}$ – тиск, Па ; $\bar{\tau}_{\text{eff}} = (\mu + \mu_t) \left[\nabla \tilde{\mathbf{v}} + \tilde{\mathbf{v}} \nabla - \frac{2}{3} (\nabla \cdot \tilde{\mathbf{v}}) \mathbf{I} \right] - \frac{2}{3} \bar{p} \mathbf{I}$ – тензор ефективних напружень, Па ; μ – коефіцієнт динамічної в'язкості, $\text{Па}\cdot\text{с}$; $\mu_t = \bar{\rho} C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$ – коефіцієнт турбулентної в'язкості, $\text{Па}\cdot\text{с}$; k – турбулентна кінетична енергія, Дж/кг ; ε – швидкість дисипації турбулентної кінетичної енергії, $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{с})$; $\mathbf{I}$ – одиничний тензор другого рангу; $\mathbf{g}$ – вектор прискорення вільного падіння, м/с^2 ; $\tilde{Y}_k$ – масова частка k -ї компоненти хімічної реакції; N – кількість компонент реакцій; $\bar{\mathbf{J}}_k = - \left(\bar{\rho} D_{m,k} + \frac{\mu_t}{Sc_t} \right) \nabla \tilde{Y}_k + D_{T,k} \frac{\nabla T}{T}$ – вектор дифузійного турбулентного потоку k -ї компоненти, $\text{кг}/(\text{м}\cdot\text{с})$; $D_{m,k}$ – коефіцієнт масової дифузії k -ї компоненти суміші, $\text{м}^2/\text{с}$; $Sc_t = \frac{\mu_t}{\rho D_t}$ – число Schmidt; D_t – коефіцієнт турбулентної дифузії, $\text{м}^2/\text{с}$; $D_{T,k}$ – коефіцієнт теплової дифузії k -ї компоненти суміші, кг/с ; $\bar{\omega}_k$ – джерело за рахунок середньої швидкості реакції k -ї компоненти $\left(\sum_{k=1}^N \bar{\omega}_k = 0 \right)$, $\text{кг}/(\text{м}^3\cdot\text{с})$; $\tilde{h}_k = \int_{T_{\text{ref},k}}^{\tilde{T}} c_{p,k} dT$ – явна масова ентальпія k -ї компоненти, Дж/кг ; T – абсолютна температура, К ; $T_{\text{ref},k}$ – абсолютна температура відліку, К ; c_p – масова ізобарна теплоємність, $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$; $\bar{\omega}_T = - \sum_{k=1}^N h_k^0(T_{\text{ref},k}) \bar{\omega}_k$ – об'ємне джерело теплоти за рахунок горіння, Вт/м^3 ; λ – коефіцієнт теплопровідності, $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$; $(\cdot)$ – оператор подвійного скалярного добутку; $S_{\text{pm}}, S_{\text{pv}}, S_{\text{ph}}$ – джерельні члени, пов'язані з масою ($\text{кг}/(\text{м}^3\cdot\text{с})$), імпульсом (Н/м^3) та ентальпією (Вт/м^3) частинок твердої фази, відповідно; S_{rad} – джерельний член, пов'язаний з тепловим випромінюванням, Вт/м^3 ; $C_{\varepsilon 1} = 1,44$; $C_{\varepsilon 2} = 1,92$; $C_\mu = 0,09$; $\sigma_k = 1,0$; $\sigma_\varepsilon = 1,3$ – коефіцієнти $k - \varepsilon$ моделі турбулентності.

Система рівнянь дискретної фази записується в Lagrange системі відліку (12.2) і включає два рівняння: збереження кількості руху та енергії. Траєкторії руху твердих частинок визначаються інтегруванням за псевдочасовими кроками рівняння балансу сил, що діють на частинку. Рівнянням збереження енергії твердих частинок описується конвективний і

радіаційний теплообмін між частинками та рідким середовищем, теплообмін під час хімічних реакцій, видалення летких і випаровування вологи.

$$\begin{cases} \frac{d\mathbf{u}_p}{dt} = F_D(\mathbf{u} - \mathbf{u}_p) + \frac{\mathbf{g}(\rho_p - \rho)}{\rho_p} + \mathbf{F}; \\ m_p c_p \frac{dT_p}{dt} = h A_p (T_\infty - T_p) + f_h \frac{dm_p}{dt} h_{reac} + \varepsilon_p A_p \sigma (\theta_R^4 - T_p^4), \end{cases} \quad (12.2)$$

де $\mathbf{u}$ – вектор швидкості газового середовища, м/с; $\mathbf{u}_p$ – вектор швидкості твердих частинок, м/с; $F_D(\mathbf{u} - \mathbf{u}_p)$ – сила опору, віднесена до маси частинки, м/с²; $F_D = \frac{18\mu C_D \text{Re}}{\rho_p d_p^2 24}$, 1/с; μ – динамічна в'язкість газового середовища, Па·с;

C_D – безрозмірний коефіцієнт гідравлічного опору; ρ_p – густина твердих частинок, кг/м³; ρ – густина газового середовища, кг/м³; d_p – усереднений діаметр твердих частинок, м; $\text{Re} = \frac{\rho d_p |\mathbf{u}_p - \mathbf{u}|}{\mu}$ – число Рейнольдса;

$\mathbf{F}$ – масова сила, віднесена до маси частинки, м/с²; m_p – маса твердої частинки, кг; h – конвективний коефіцієнт теплообміну, Вт/(м²·К); A_p – площа поверхні частинки, м²; T_∞ – локальна абсолютна температура газового середовища, К; T_p – абсолютна температура твердої частинки, К; f_h – частка теплоти поверхневої реакції, що поглинається твердою частинкою; h_{reac} – теплота поверхневої реакції, Дж/кг; σ – стала Stefan-Boltzmann, Вт/(м²·К⁴); ε_p – ступінь чорноти частинки; θ_R – радіаційна температура, К.

Зв'язок між континуальною фазою (сумішшю газів) і дискретною фазою (твердою частинкою) встановлюється за допомогою відстеження обміну масою, імпульсом та енергією. Відповідні члени знаходяться в рівняннях системи (12.1).

Повна швидкість поверхневих реакцій на частинках твердої фази згідно з моделлю множинних поверхневих реакцій складається з об'ємної швидкості дифузної і кінетичної швидкості хімічної реакції. Для хімічних реакцій першого порядку повна швидкість i -ї реакції визначається за формулою

$$R_i = \frac{R_{i,d} R_{i,k}}{R_{i,d} + R_{i,k}}, \quad (12.3)$$

де $R_{i,d} = C_i \frac{[(T_p + T_\infty)/2]^{0.75}}{d_p} p_i$ – швидкість дифузії i -ї реакції, кг/(м²·с);

C_i – коефіцієнт дифузії i -ї реакції, кг/(м²·с·К^{0.75}·Па); p_i – парціальний тиск газового реагенту i -ї реакції, Па; $R_{i,k}$ – явна кінетична швидкість i -ї реакції (рівняння Arrhenius з врахуванням тиску), кг/(м²·с); A_k – передекспоненціальний множник (стеричний фактор) i -ї реакції, кг/(м²·с·К ^{β} ·Па ^{m}); E_a – енергія активації, Дж/кмоль; R – універсальна газова стала, Дж/(кмоль·К).

Явна кінетична швидкість i -ї реакції визначається за формулою

$$R_{i,k} = A_i T_p^\beta \exp\left(-\frac{E_a}{RT_p}\right) \left(\frac{p_i}{10^5}\right)^m, \quad (12.4)$$

де β, m – показники ступеня.

Швидкість витрати j -ї компоненти i -ї реакції на поверхні твердої частинки визначається за формулою

$$\bar{R}_i = A_p \eta Y_j R_i, \quad (12.5)$$

де Y_j – масова частка поверхневих компонентів j у частинці; η – коефіцієнт ефективності.

У системі рівнянь (12.2) окрім процесів спалювання та газифікації також можна враховувати випаровування води й видалення летких з частинок твердої фази [264].

Для опису взаємодії між кінетикою хімічних реакцій і турбулентністю потоків використовується модель кінцевої швидкості або вихрової дисипації за залежністю

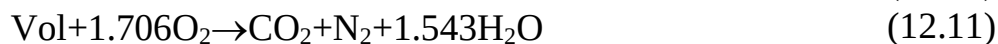
$$R = \min[R_{ch}, R_{mix}(k, \varepsilon, X_R, X_P)], \quad (12.6)$$

де R_{ch} – швидкість хімічної реакції за законом Арреніуса; R_{mix} – швидкість турбулентного перемішування; k – турбулентна кінетична енергія;

ε – швидкість дисипації турбулентної енергії; X_R – молярна концентрація реагенту реакції; X_p – молярна концентрація продукту реакції.

12.2 Глобальні гетерогенні (поверхневі) та гомогенні (об'ємні) реакції

Для опису процесу газифікації частинок термообробленого вуглецевмісного матеріалу використовується чотири гетерогенні та дев'ять гомогенних реакцій. Глобальні гетерогенні (поверхневі) реакції включають реакції згоряння напівкоксу, а також газифікації CO_2 , H_2O і H_2 (12.7)–(12.10). Глобальні гомогенні (об'ємні) реакції процесу газифікації наведено в (12.7)–(12.19)³⁷



За даними)³¹ коефіцієнти гетерогенних і гомогенних реакцій газифікації (12.7)–(12.19) різняться між собою як значенням, так і іноді розмірністю, що ускладнює їх використання в практичних розрахунках.

³⁷ Determination of parameters of the carbon-containing materials gasification process in the rotary kiln cooler drum / A. Karvatskii, T. Lazarev, S. Leleka, I. Mikulionok, O. Ivanenko // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2020. No 4(8-106). P. 65–76. DOI: 10.15587/1729-4061.2020.210767

Лекція 2.1(13) Програмні продукти ANSYS Workbench, склад, область застосування. Програмний код LIGGGHTS – LAMMPS Improved for General Granular and Granular Heat Transfer Simulations, характеристика, область застосування. Програмний код ParaView – An open-source, multi-platform data analysis and visualization application, характеристика, область застосування

13.1 Програмні продукти ANSYS Workbench, склад, область застосування

ANSYS Workbench – це програмні продукти, що дають змогу виконувати числовий аналіз у таких фізичних дисциплінах та інженерних додатках: обчислювальна гідродинаміка, механіка деформованого твердого тіла, електромагнетизм, тепловий аналіз, багатодисциплінарний аналіз та ін.

ANSYS – це американська компанія, що базується в Канонсбурзі, штат Пенсільванія. Вона розробляє та продає програмне забезпечення для моделювання CAE/багатофізичної інженерії для проектування, тестування та експлуатації продукції та пропонує свої продукти та послуги клієнтам по всьому світу)³⁸.

Передісторія. ANSYS була заснована в 1970 році Джоном Свонсоном. У 2000-х компанія придбала численні інші компанії з інженерного проектування, отримавши додаткові технології для динаміки рідини, проектування електроніки та фізичний аналіз. ANSYS став компонентом індексу NASDAQ-100 (National Association of Securities Dealers Automated Quotation) 23 грудня 2019 року.

Ідея ANSYS була вперше задумана Джоном Свонсоном під час роботи в астронуклеарній лабораторії Westinghouse у 1960-х роках. У той час інженери проводили аналіз скінченних елементів (FEM) вручну. Westinghouse відхилив ідею Свонсона автоматизувати FEM шляхом розробки інженерного програмного забезпечення загального призначення, тому Свонсон покинув компанію в 1969 році, щоб самостійно розробляти програмне забезпечення. Наступного року він заснував ANSYS під назвою Swanson Analysis Systems Inc. (SASI), працюючи на своїй фермі в Піттсбурзі.

Свонсоном розробив початкове програмне забезпечення ANSYS на перфокартах і використовував мейнфрейм (високопродуктивний комп'ютер зі значним обсягом оперативної та зовнішньої пам'яті, з розвиненими засобами вводу/виводу), який орендував по годинно. Westinghouse найняв Свонсона як консультанта за умови, що будь-який код, який він розробив

³⁸ URL : <https://en.wikipedia.org/wiki/Ansys>

для Westinghouse, також міг бути включений до лінійки продуктів ANSYS. Westinghouse також став першим користувачем ANSYS.

Програмне забезпечення для інженерного моделювання. ANSYS розробляє та продає програмне забезпечення для інженерного моделювання для використання протягом усього життєвого циклу продукту. Програмне забезпечення Ansys Mechanical для аналізу скінченних елементів використовується для моделювання комп'ютерних моделей конструкцій, електроніки або компонентів машин для аналізу міцності, еластичності, розподілу температури, електромагнетизму, потоку рідини тощо. ANSYS використовується для визначення того, як продукт буде функціонувати з різними специфікаціями, без створення тестових продуктів або проведення краш-тестів. Наприклад, програмне забезпечення ANSYS дає змогу імітувати, як міст буде триматися після багатьох років дорожнього руху, як найкраще обробляти лосося на консервному заводі, щоб зменшити кількість відходів, або як спроектувати гірку, яка використовує менше матеріалу без шкоди для безпеки.

Більшість симуляцій ANSYS виконується за допомогою системи ANSYS Workbench, яка є одним з основних продуктів компанії. Зазвичай користувачі ANSYS розбивають більші структури на невеликі компоненти, кожен з яких моделюється та тестується окремо. Користувач може почати з визначення розмірів об'єкта, а потім додавання ваги, тиску, температури та інших фізичних властивостей. Нарешті, програмне забезпечення ANSYS моделює та аналізує рух, втому, тріщиноутворення, потік рідини, розподіл температури, електромагнітну ефективність та інші динамічні ефекти.

ANSYS також розробляє програмне забезпечення для керування даними та їх резервного копіювання, академічних досліджень і навчання.

Історичний розвиток. Перша комерційна версія програмного забезпечення ANSYS була позначена як версія 2.0 і випущена в 1971 році. У той час програмне забезпечення складалося з коробок з перфокартами, і програма зазвичай запускалася протягом ночі, щоб отримати результати наступного ранку. У 1975 році були додані нелінійні та термоелектричні характеристики. Програмне забезпечення використовувалося виключно на мейнфреймах, доки в 1979 році для VAXstation не була представлена версія 3.0 (другий випуск). Версія 3 мала інтерфейс командного рядка, як DOS.

У 1980 році було випущено Apple II, що дозволило ANSYS перетворити ПЗ на графічний інтерфейс користувача у версії 4 пізніше того ж року. Версія 4 програмного забезпечення ANSYS була простішою у використанні та додала функції для імітації електромагнетизму. У 1989 році ANSYS почала співпрацювати з Compuflow. Програмне забезпечення для динаміки рідини Flotran від Compuflow було інтегровано в ANSYS версією 5, яка була випущена в 1993 році. Покращення продуктивності у версії 5.1

скоротило час обробки в два-чотири рази, а за ним послідувала низка покращень продуктивності, щоб йти в ногу з досягненнями в обчислювальної техніки. ANSYS також почав інтегрувати своє програмне забезпечення з програмним забезпеченням CAD, таким як Autodesk.

У 1996 році ANSYS випустила програмне забезпечення для структурного аналізу DesignSpace, продукт моделювання випробувань на аварію та падіння LS-DYNA, а також симулятор обчислювальної динаміки рідини (CFD) ANSYS. ANSYS також додала підтримку паралельної обробки для ПК з кількома процесорами. Освітній продукт ANSYS /ed був представлений у 1998 році. Версія 6.0 основного продукту ANSYS була випущена в грудні 2001 року. Версія 6.0 вперше зробила великомасштабне моделювання практичним, але багато користувачів були розчаровані новим синім інтерфейсом користувача. Інтерфейс був перероблений через кілька місяців у версії 6.1. У версії 8.0 представлено багатопольовий вирішувач ANSYS, який дозволяв користувачам моделювати взаємодію кількох фізичних проблем між собою.

Версія 8.0 була опублікована в 2005 році і представила програмне забезпечення взаємодії рідина-структура від ANSYS, яке моделює вплив структур і рідин один на одного. ANSYS також випустила свою систему імовірнісного проектування та програмні продукти DesignXplorer, які мають справу з ймовірностями та випадковістю фізичних елементів. У 2009 році була випущена версія 12 з оновленою другою версією Workbench. ANSYS також почав дедалі більше консолідувати функції в програмному забезпеченні Workbench.

Версія 15 ANSYS була випущена в 2014 році. У цій версії додано нові функції для композитів, болтових з'єднань та кращих інструментів для сітки. У лютому 2015 року версія 16 представила фізичний механізм AIM і Electronics Desktop, який призначений для напівпровідникового дизайну. Наступного року версія 17 представила новий користувацький інтерфейс та покращення продуктивності для обчислення проблем динаміки рідини. У січні 2017 року ANSYS випустила версію 18. Версія 18 дозволила користувачам збирати реальні дані з продуктів, а потім включати ці дані в майбутні симуляції. Ansys Application Builder, який дозволяє інженерам створювати, використовувати та продавати спеціальні інженерні інструменти, також був представлений у версії 18.

Випущений у січні 2020 року, ANSYS R1 2020 оновлює пропозиції ANSYS процесів моделювання та керування даними (SPDM), інформацію про матеріали та електромагнітні продукти. На початку 2020 року академічна програма ANSYS перевищила мільйон завантажень студентами.

У листопаді 2020 року South China Morning Post повідомила, що програмне забезпечення ANSYS використовувалося для китайських військових досліджень у розробці технології гіперзвукових ракет.

13.2 Програмний код LIGGGHTS – LAMMPS Improved for General Granular and Granular Heat Transfer Simulations, характеристика, область застосування

LIGGGHTS)³⁹ – це програмне забезпечення для моделювання частинок методом дискретних елементів з відкритим вихідним кодом. Перша версія LIGGGHTS була випущена в 2010 р. Sandia National Labs, Albuquerque, USA.

LIGGGHTS означає LAMMPS, покращений для загального моделювання динаміки та теплопередачі в гранульованому матеріалі.

LAMMPS – це класичний симулятор молекулярної динаміки. Він широко використовується в області молекулярної динаміки. Завдяки фізичним і алгоритмічним аналогіям LAMMPS є дуже хорошою платформою для моделювання DEM. LAMMPS пропонує пакет GRANULAR для виконання такого роду моделювання. LIGGGHTS має на меті покращити ці можливості з метою застосування їх у промислових умовах.

Функції, додані в LIGGGHTS щодо оригінального дистрибутива LAMMPS, включають:

- імпорт і обробка складної геометрії поверхонь із CAD;
- функція рухомої сітки для врахування рухомої геометрії;
- формулювання контактної сили, включаючи додаткові сили зчеплення та тертя кочення;
- теплопровідність між частинками, що контактують;
- покращена вставка частинок на основі поверхневих та об'ємних сіток;
- «шаблонний» механізм для врахування нерівномірності частинок тощо.

Звичайно, LIGGGHTS успадковує всі можливості, які пропонує стандартний дистрибутив LAMMPS для моделювання гранульованих матеріалів:

- проста для розуміння структура коду;
- гнучка мова сценаріїв, що дозволяє ефективно використовувати;
- ефективне розпаралелювання;

³⁹ URL : <https://www.cfdem.com/liggghts-open-source-discrete-element-method-particle-simulation-code>

- основи пакета GRANULAR, як-от вставка частинок, реалізація історії зсуву;
- електростатичні сили;
- молекулярна динаміка;
- постобробка.

13.3 Програмний код ParaView – An open-source, multi-platform data analysis and visualization application, характеристика, область застосування

ParaView)⁴⁰ – це багатоплатформна програма з відкритим вихідним кодом для інтерактивної наукової візуалізації, має архітектуру клієнт-сервер для полегшення віддаленої візуалізації наборів даних і генерує моделі рівня деталізації (LOD) для підтримки інтерактивної частоти кадрів для великих наборів даних. Це програма, побудована на основі бібліотек Visualization Toolkit (VTK). ParaView – це програма, розроблена для паралелізму даних на мультикомп'ютерах і кластерах із спільною або розподіленою пам'яттю. Її також можна запускати як програму для одного комп'ютера.

Paraview використовується в багатьох різних спільнотах для аналізу та візуалізації наборів наукових даних. Його можна використовувати для створення візуалізацій для аналізу даних за допомогою якісних і кількісних методів. Дослідження даних можна виконувати в інтерактивному режимі в 3D або програмно, використовуючи можливості пакетної обробки ParaView.

ParaView був розроблений для аналізу надзвичайно великих наборів даних за допомогою обчислювальних ресурсів розподіленої пам'яті. Його можна запускати на суперкомп'ютерах для аналізу наборів даних terascale, а також на ноутбуках для менших даних.

ParaView – це як фреймворк додатків, так і програма «під ключ». Кодова база ParaView розроблена таким чином, що всі її компоненти можна повторно використовувати для швидкої розробки вертикальних додатків. Ця гнучкість дозволяє розробникам ParaView швидко розробляти програми, які мають певну функціональність для певної проблемної області.

ParaView працює на паралельних і однопроцесорних системах із розподіленою та спільною пам'яттю. Він був успішно протестований на Windows, macOS, Linux, IBM Blue Gene, Cray Xt3 і різних робочих станціях, кластерах і суперкомп'ютерах Unix. ParaView використовує VTK як механізм обробки та візуалізації даних і має інтерфейс користувача, написаний за допомогою Qt.

Історія. Проект ParaView розпочався у 2000 році як спільна робота між Kitware, Inc. та Лос-Аламоською національною лабораторією через

⁴⁰ URL : <https://en.wikipedia.org/wiki/ParaView>

фінансування, надане програмою ASCII Views Міністерства енергетики США. Перший публічний випуск було оголошено в жовтні 2002 року.

Незалежно від ParaView, Kitware розробила веб-систему візуалізації в грудні 2001 року. Цей проект фінансувався SBIR фази I та II дослідницької лабораторії армії США і зрештою став ParaView Enterprise Edition. PVEE зробила значний внесок у розвиток архітектури клієнт/сервер ParaView.

У вересні 2005 року Kitware, Sandia National Labs і CSimSoft (тепер Coreform LLC) почали розробку ParaView 3.0. ParaView 3.0 була випущена в травні 2007 року. У червні 2013 року вийшов ParaView 4.0, ця версія була заснована на VTK 6.0. Версія 5.0 була випущена в січні 2016 року, ця версія містила новий сервер відтворення.

Введення/виведення та формат файлів. Підтримує різноманітні формати файлів, включаючи: VTK (нові та застарілі, усі типи, включаючи паралельні, ASCII та двійкові, можна читати та записувати).

EnSight 6 та EnSight Gold (всі типи, включаючи паралельні, ASCII та двійкові; підтримуються декілька частин – кожна частина завантажується окремо та може оброблятися окремо) (тільки для читання).

CGNS (підтримка кількох блоків, нестійких рішень і деформації сітки, на основі формату низького рівня HDF5) (лише читання).

Різні полігональні формати файлів, включаючи STL та BYU (за замовчуванням, лише для читання, інші засоби запису VTK можна додати, написавши опис XML).

Підтримуються багато інших форматів файлів.

Будь-яке джерело або фільтр VTK можна додати, надавши простий опис XML (VTK надає багато читачів).

Оскільки ParaView є відкритим вихідним кодом, користувач може надати своїх читачів і авторів.

Лекція 2.2(14) Приклади використання програмних продуктів Solidworks, ANSYS Workbench, LIGGGHTS, ParaView

14.1 Опис окремих ресурсів та приклади використання програмних продуктів Solidworks

SolidWorks)⁴¹ – продукт компанії SolidWorks Corporation (зараз – дочірня компанія Dassault Systems), САПР, інженерного аналізу та підготовки виробництва будь-якої складності та призначення.

SolidWorks є ядром інтегрованого комплексу автоматизації підприємства, за допомогою якого здійснюється підтримка життєвого циклу виробу згідно з концепцією CALS – технологій, включаючи

⁴¹ URL : <https://uk.wikipedia.org/wiki/SolidWorks>

двонаправлений обмін даними з іншими Windows-застосунками та створення інтерактивної документації.

Програма з'явилась в 1993 році та склала конкуренцію таким продуктам як AutoCAD та Autodesk Mechanical Desktop, SDRC I-DEAS і Pro/ENGINEER, Solid Edge.

Залежно від класу задач, що розв'язуються, замовникам пропонується три базових конфігурації системи: SolidWorks, SolidWorks Professional та SolidWorks Premium.

Завдання, які вирішуються за допомогою SolidWorks.

Конструкторська підготовка виробництва:

- 3D проектування виробів (деталей і зборок) будь-якого ступеня складності з урахуванням специфіки виготовлення;
- створення конструкторської документації;
- промисловий дизайн;
- проектування комунікацій (електроджгутів, трубопроводи тощо).
- інженерний аналіз (міцність, стійкість, теплопередача, частотний аналіз, динаміка механізмів, газо/гідродинаміка, оптика і світлотехніка, електромагнітні розрахунки, аналіз розмірних ланцюгів та ін.) ;
- Експрес-аналіз технологічності на етапі проектування.

Технологічна підготовка виробництва:

- проектування оснащення і інших засобів технологічного оснащення;
- аналіз технологічності конструкції виробу;
- аналіз технологічності процесів виготовлення (лиття пластмас, аналіз процесів штампування, витяжки, гнуття та ін.) ;
- розробка технологічних процесів;
- матеріальне та трудове нормування;
- механообробка: розробка керуючих програм для верстатів з ЧПУ, верифікація УП, імітація роботи верстата. Фрезерна, токарна, токарно-фрезерна і електроерозійна обробка, лазерна, плазмова і гідроабразивне різання, вирубні штампи, координатно-вимірювальні машини;
- управління даними і процесами на етапі ТПВ.

Управління даними і процесами:

- робота з єдиною цифровою моделлю виробу;
- електронний технічний і розпорядчий документообіг;
- технології колективної розробки;
- робота територіально-розподілених команд;
- ведення архіву технічної документації;
- проектне управління;

- захист даних;
- підготовка даних для ERP, розрахунок собівартості.

Опис окремих ресурсів.

SolidWorks є конструкторською системою твердотілого параметричного моделювання машинобудівних конструкцій спеціально розробленою для використання на персональних комп'ютерах під управлінням операційної системи Windows. Стандартний графічний користувацький інтерфейс Windows і засоби твердотілого параметричного моделювання дозволяють швидше й легше ніж будь-коли створювати тривимірні моделі деталей, складальні одиниці, генерувати креслення, значно знижуючи терміни проектування та мінімізувати час виходу виробів на ринок.

SolidWorks Motion призначений для розрахунку руху механізмів. Модуль використовує інформацію, що міститься в збірках SolidWorks з можливістю уточнення розрахункової моделі за допомогою його процедур. SolidWorks Motion є третім, найбільш функціональним інструментом SolidWorks, для імітації руху. Перші два рівні: рух збірки та фізичне моделювання, присутні в базовій конфігурації SolidWorks Standard, можуть бути використані для створення кінематичної моделі збірки, імітації руху без отримання числових характеристик. Після цього інформація без будь-яких додаткових дій сприймається на рівні SolidWorks Motion.

SolidWorks Routing – модуль проектування трубопроводів. Часто під час проектування обладнання виникає завдання створення трубопроводів та комунікацій, які б об'єднали компоненти збірок і зробили тривимірну модель завершеною. Включення трубопровідної обв'язки в тривимірну модель виробу дає змогу вирішити багато проблем уже на етапі проектування та уникнути ситуації, коли на етапі монтажу виявляється, що труби неправильно зігнуті та заважають роботі інших систем або в існуючій конструкції недостатньо вільного місця для прокладки всіх необхідних комунікацій.

Завдання створення тривимірних моделей трубопроводів також виникає під час проектуванні приладів і обладнання різних галузей машинобудування, створенні гідравлічних і пневматичних систем, в нафтогазовій промисловості при створенні трубопровідної обв'язки, а також у разі проектування різних інженерних комунікацій, підводок й шлангів.

Бібліотеки стандартних виробів Toolbox SolidWorks використовуються для забезпечення автоматичного сполучення стандартних виробів для вставки в збірку та надають можливість групових операцій. Toolbox дає можливість проводити проектувальні розрахунки балок та підшипників. Бібліотеки Toolbox редагуються та налаштовуються під конкретні завдання будь-якого підприємства.

SolidWorks Simulation (COSMOSWorks) – універсальний інструмент для аналізу методом скінченних елементів. SolidWorks Simulation існує в трьох конфігураціях: власне SolidWorks Simulation, SolidWorks Simulation Professional та SolidWorks Simulation Premium. Однак, навіть у мінімальній конфігурації модуля аналізу міцності забезпечується повноцінний статичний аналіз, як деталі, так і збірки з використанням скінченних елементів твердого тіла, поверхонь і балок. Реалізовано різноманітні контактні умови і всілякі віртуальні з'єднувачі.

Модуль SolidWorks Simulation дає змогу виконувати інженерні розрахунки та моделювати різні впливи навколишнього середовища на виріб.

Основними можливостями SolidWorks Simulation є такі:

- лінійний аналіз;
- втомний аналіз металу;
- нелінійний аналіз;
- тепловий аналіз;
- частотний аналіз;
- аналіз виробів з пластмаси та гуми;
- динамічний аналіз тощо.

Лінійний аналіз напружень дає змогу SolidWorks-дизайнерам і інженерам швидко і ефективно перевірити якість, продуктивність та надійність ще під час створення їх дизайну.

Лінійний аналіз напружень за допомогою SolidWorks Simulation може бути невід'ємною частиною процесу розробки, що знижує потребу в дорогих прототипах, виключає доопрацювання та затримки, а також економить часу й витрати на розробку. За допомогою такого аналізу можливо обчислювати напруження і деформації геометричних моделей, такі як:

- деталь або збірка під навантаженням, яка деформується з невеликими поворотами й переміщеннями;
- статичні навантаження виробу (не враховуючи інерції) і постійні навантаження;
- матеріал під постійним напруженням (закон Гука).

Моделювання методом аналізу скінченних елементів (FEA) – це дискретизація проєктованих компонентів в тверде тіло, оболонку або балковий елемент, що використовує лінійний аналіз напружень для визначення реакції деталей і вузлів під впливом: сили; тиску; прискорення; температури; контакт між компонентами.

Для проведення аналізу напружень, повинні бути відомими дані матеріалів компонентів. Стандартна база даних SolidWorks CAD

попередньо завантажена матеріалами, які можуть бути використані SolidWorks Simulation.

Моделювання методом скінченних елементів використовується для розрахунку переміщень компонентів, деформацій і напружень при внутрішніх і зовнішніх навантаженнях. Геометрична модель під час аналізу дискретизується з використанням тетраедричних (3D), трикутних (2D) й балкових елементів.

Оскільки промислові компоненти виконуються переважно з металу, аналіз металевих компонентів може бути виконано за допомогою лінійного або нелінійного аналізу напружень. Аналіз неметалічних компонентів (наприклад, пластмаси або гумових деталей) повинен здійснюватися з використанням методів нелінійного аналізу напружень, через їх складний взаємозв'язок деформаціями і напруженнями.

SolidWorks Flow Simulation Electronic Cooling Module Add-In – додатковий модуль для теплового розрахунку електронних пристроїв. Він включає розширену базу даних по віртуальних вентиляторах, матеріалах електротехнічного призначення, термоелектричних охолоджувачах (елементи Пельтьє). Модуль забезпечує імітацію проходження постійного струму та нагріву ним, теплових трубок, багат шарових друкованих плат.

SolidWorks Flow Simulation HVAC Module Add-In – додатковий модуль SolidWorks Flow Simulation для розрахунку систем вентиляції, опалення та кондиціонування. Він включає: розширену базу даних з будівельних матеріалів і вентиляторів; уточнену модель теплообміну випромінювання з урахуванням відбиття, заломлення і спектральних характеристик; розрахунок параметрів комфорту – середньої прогнозованої оцінки, середньої температури тощо.

SolidWorks Flow Simulation є модулем гідрогазодинамічного аналізу в середовищі SolidWorks. Для модуля Flow Simulation немає різниці між геометричними сутностями, створеними в SolidWorks або імпортованими в базовий модуль. Забезпечується підтримка для 64-розрядних операційних систем з доступом до всієї доступної оперативної пам'яті. Також використовується багато процесорність.

Модуль Flow Simulation програмного середовища SolidWorks дає можливість моделювання таких процесів:

- стаціонарні і нестаціонарні течії;
- стискувані й нестискувані (рідини або гази) течії, включаючи до-, транс- і надзвукові режими;
- ідеальні й реальні гази;
- неньютонівські рідини;
- одно та багатоконпонентні течії без хімічних взаємодій та розділення фаз;

- спільні розрахунки течії рідини або газу та теплопередачі всередині твердого тіла без наявності границі розділення газ – рідина;
- ламінарні й турбулентні течії, враховуючи ламінарний/турбулентний перехід;
- «заморожування» течій для розділення «швидких» і «повільних» процесів;
- течії в пористих середовищах з урахуванням теплопровідності стінок;
- урахування шорсткості стінок;
- зовнішні і/або внутрішні течії;
- конвективний теплообмін, вільна, вимушена або змішана конвекція;
- радіаційний теплообмін з управлінням прозорістю стінок і розділенням властивостей стінок для теплообміну випромінюванням і сонячною радіацією;
- розрахунок траєкторій твердих частинок й крапель в потоці та ін.

Початковими і граничними умови можуть включати такі вихідні параметри:

- швидкість, тиск (статичний, динамічний, оточуючого середовища), масові та об'ємні витрати;
- температура, концентрація компонентів, параметри турбулентності;
- витратно-напірні характеристики віртуальних вентиляторів;
- різноманітні типи стінок, включаючи шорсткість, коефіцієнт тепловіддачі і параметри умовного середовища на стінках, що не межують з реальним текучим середовищем;
- джерела теплоти (об'ємні й поверхневі), віртуальні вентилятори;
- можливості вказати залежність граничних умов та параметрів від часу та координат;
- симетрія відносно базових площин і періодична симетрія.

Управління обчислювальними операціями виконуються безпосередньо по згенерованій розрахунковій сітці моделі SolidWorks, що створюється автоматично в області твердого тіла. Сітка адаптується залежно від геометричних характеристик моделі і поля.

Результати розрахунків виводяться у вікні SolidWorks. Існує можливість виводу функції на будь-якій площині у вигляді кольорових епюр, векторів та ізоліній, відображення результатів за допомогою ізоповерхонь.

За результатами розрахунків можна створювати трирівневі траєкторії; виводити характеристики розрахунків, розподіл будь-якої характеристики вздовж будь-якої кривої в MS Excel.

Деякі приклади використання програмних продуктів Solidworks для числового аналізу фізичних полів конструкцій наведено на рис. 14.1–14.3.

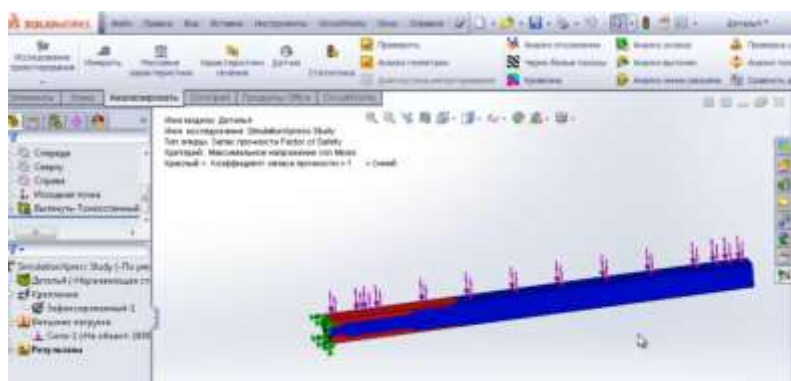


Рис. 14.1. Числовий аналіз статичної пружності порожньої балки за допомогою програмного продукту SimulationXpress SolidWorks

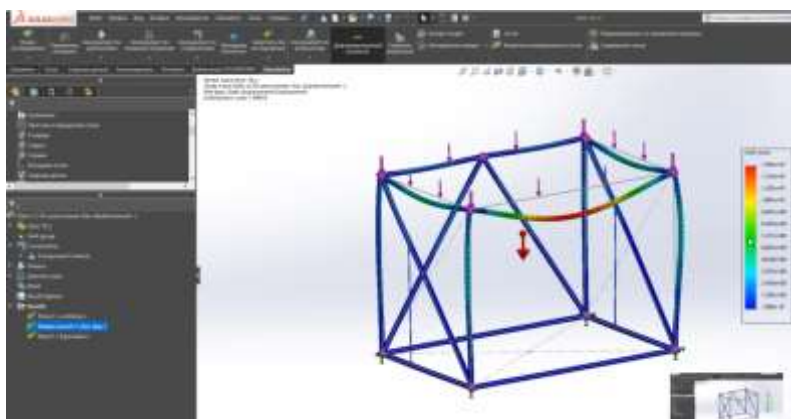
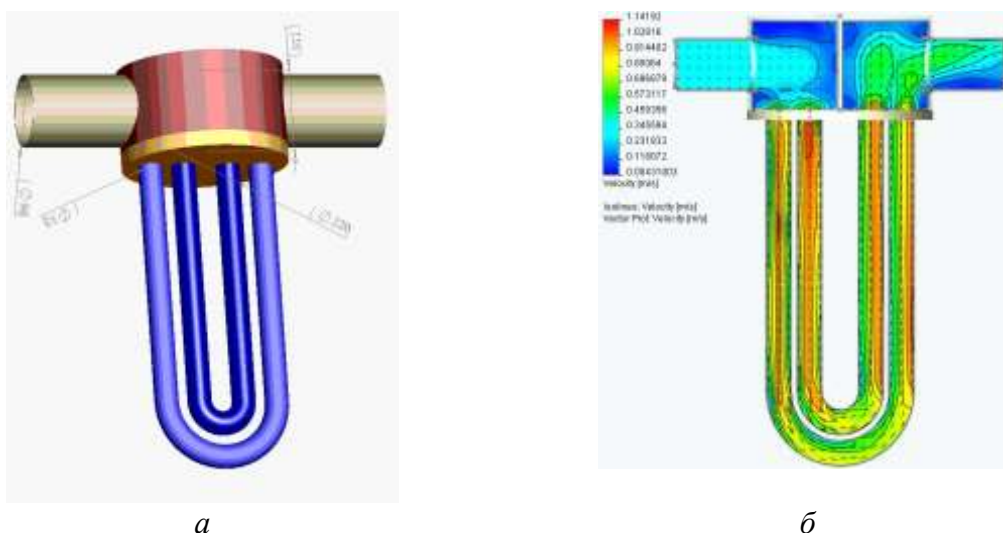


Рис. 14.2. Числовий аналіз статичної пружності зварної конструкції за допомогою програмних продуктів SolidWorks Simulation SolidWorks



a – твердотільна модель; *б* – поле швидкості
Рис. 14.3. Гідрогазодинамічний аналіз теплообмінника за допомогою продуктів SolidWorks Flow Simulation

14.2 Приклади використання програмних продуктів ANSYS Workbench

Вікно Project Schematic ANSYS Workbench для виконання числового аналізу термопружного та тепло-гідродинамічного стану обладнання наведено на рис. 14.4.

Результати числового аналізу фізичних полів валків каландра за Project Schematic (див. рис. 14.4) наведено на рис. 14.5–14.7.

Результати розрахунків тепло-гідродинамічного та термопружного стану модернізовано обертової печі наведено на рис. 14.8, 14.9.

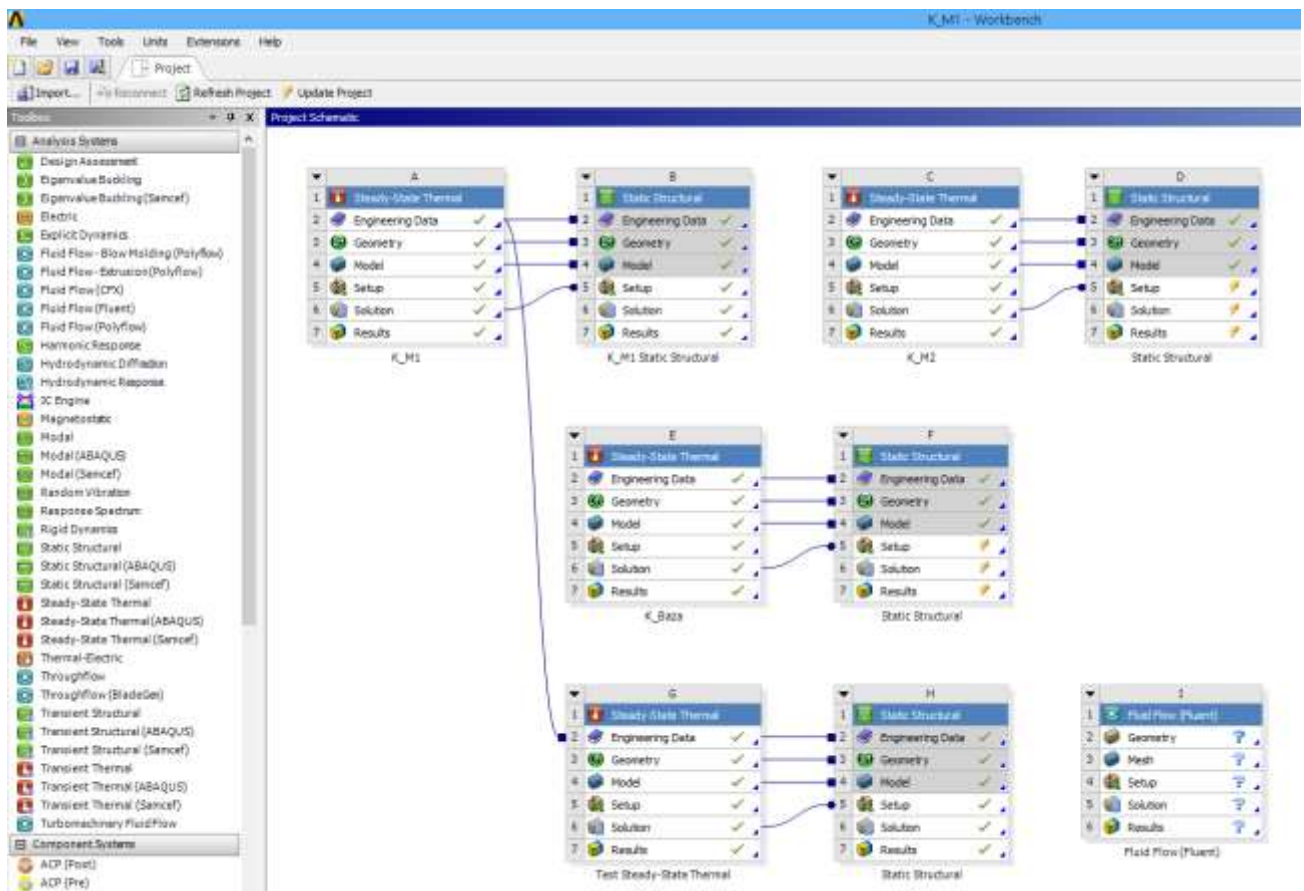
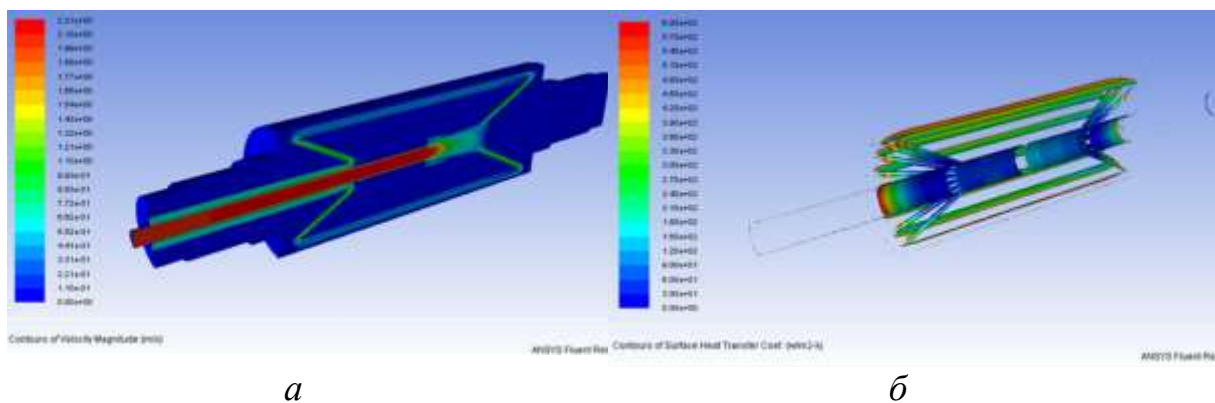
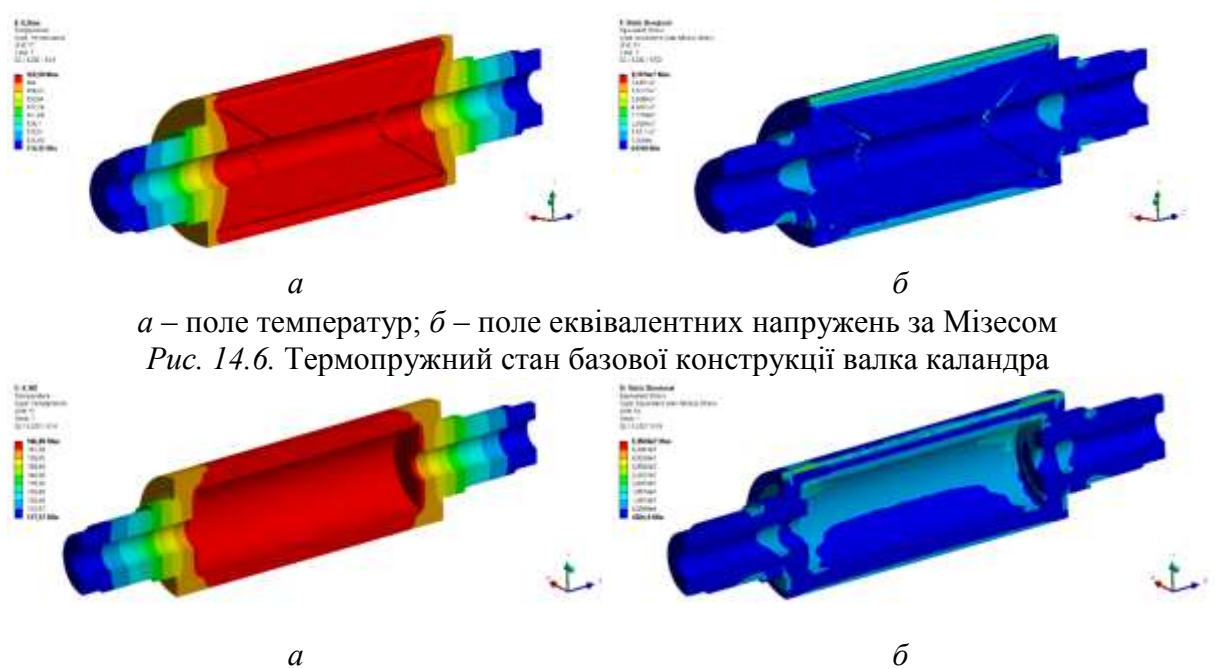


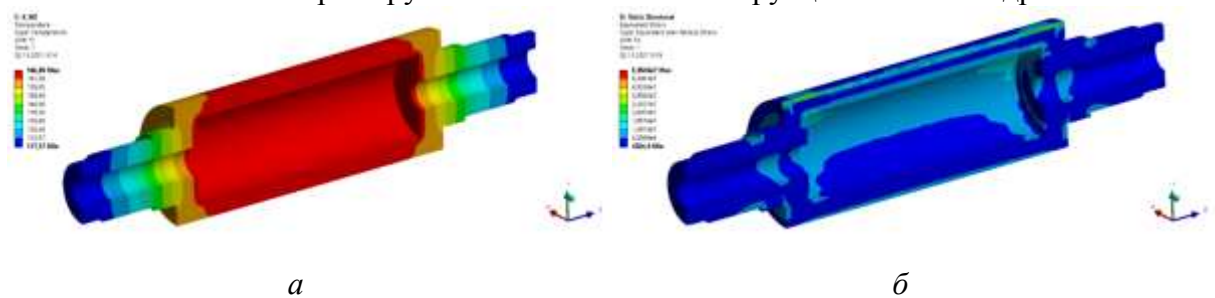
Рис. 14.4. Вікно Project Schematic ANSYS Workbench для виконання числового аналізу термопружного та тепло-гідродинамічного стану валків каландра



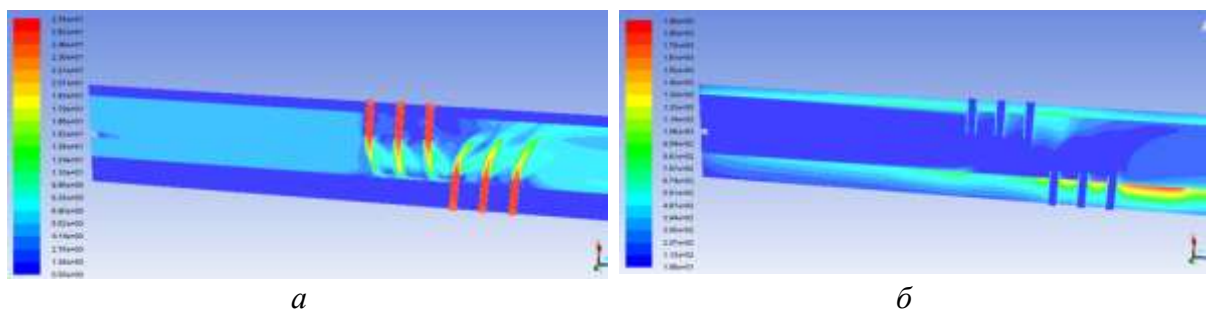
а *б*
Рис. 14.5. Поля швидкості (*а*) та коефіцієнта тепловіддачі (*б*) від води до стінок каналів базової конструкції валка каландра



а *б*
а – поле температур; *б* – поле еквівалентних напружень за Мізесом
Рис. 14.6. Термопружний стан базової конструкції валка каландра



а *б*
а – поле температур; *б* – поле еквівалентних напружень за Мізесом
Рис. 14.7. Термопружний стан модернізованої конструкції валка каландра



а *б*
а – поле швидкості; *б* – поле температури
Рис. 14.8. Результати числового аналізу тепло-гідродинамічного стану модернізованої конструкції обертової печі зі встановленими жаровими трубами для подачі повітря в зону прожарювання

Figure 10 consists of two 3D finite element analysis plots of a ship's hull section. Plot (a) shows the temperature field, with a color scale ranging from 100.0 to 100.0. Plot (b) shows the stress field, with a color scale ranging from 0.0 to 1.0. Both plots show a longitudinal section of the hull with various structural components and supports.

види силових полів використовуються: **pair_style**, **bond_style**, **fix wall/gran**.

Гранульовані стіни (**Granular walls**), як правило, вимагають використання сіток (дискретизації поверхонь (стінок)). Детальніше дивись опис команди **fix mesh/surface**.

Визначення та вставка атома або частинки. Існує три способи визначення (ініціалізації) атомів (частинок) у скрипті програми LIGGGHTS. Читання (введення) їх із файла даних, перезапуск файла за допомогою команд **read_data** або **read_restart**, або створення структури атомів (частинок), використовуючи такі команди: **lattice**, **region**, **create_box**, **create_atoms**.

Однак найпоширеніший спосіб вставити гранульовані частинки – це використовувати одну з команд **fix insert/*: fix insert/pack**, **fix insert/stream** або **insert/rate/region**.

Перш ніж використовувати ці команди, розподіл частинок (**fix particledistribution/discrete**) створюється за допомогою шаблонів частинок. Для сферичних частинок такі шаблони частинок визначаються за допомогою **fix particletemplate/sphere**.

Налаштування. Після визначення атомів (частинок) можна задати різноманітні параметри: параметри моделювання, параметри виводу тощо.

Параметри матеріалу та коефіцієнти силового поля встановлюються за допомогою команд **fix property/global** або **pair_coeff**, **bond_coeff**.

Ці команди встановлюють різні параметри моделювання: **neighbor**, **neigh_modify**, **group**, **timestep**, **region**, **reset_timestep**, **run_style**.

За допомогою команди **fix** встановлюють різноманітні граничні умови, інтеграцію часу та параметри діагностики, тобто ця команда має багато варіантів використання.

Різні обчислення можуть бути вказані для виконання під час моделювання за допомогою команд **compute**, **compute_modify** та **variable**.

Параметри виводу встановлюються командами **thermo**, **dump** та **restart**.

Запуск симуляції. Моделювання запускається за допомогою команди **run**, наприклад:

```
run 10000
run 1000000 upto
run 100 start 0 stop 1000.
```

Приклад вихідного скрипта. Розглянемо приклад скрипта для моделювання в середовищі LIGGGHTS, у результаті якого розв'язується задача визначення кута природного укусу сферичних частинок матеріалу відомим методом, коли частинки спочатку насипають в циліндричну ємність з отвором знизу, притиснуту до горизонтальної поверхні; далі ємність піднімається вгору, а гранули під дією сили тяжіння розсипаються та утворюють конусну гірку, кут нахилу якої до горизонтальної поверхні дозволяє отримати значення кута природного укусу.

Скрипт створюється в текстовому файлі з будь-яким розширенням, наприклад **in.kpy**. Для успішного виконання скрипта в робочій директорії попередньо має бути створена папка **vtk**, а в ній папка **post** (див. команду **dump** у скрипті, що наведено нижче за текстом), в якій записуються результати виконання програмних кодів (скриптів).

Далі наведено фрагмент тексту типового скрипта програми LIGGGHTS.

```
### Ініціалізація
# Попередні налаштування
atom_style sphere
atom_modify map array
boundary f f f
newton off
communicate single vel yes
units si

# Границі зони моделювання
region domain cylinder z 0 0 0.06 0.0 0.1 units box
create_box 2 domain

# Параметри сітки
neighbor 0.001 bin
neigh_modify delay 0

### Налаштування
# Властивості матеріалу, необхідні для команди pair
style
fix m1 all property/global youngsModulus peratomtype
5.e6 5.e6
fix m2 all property/global poissonsRatio peratomtype
0.35 0.35
```



```
fix m3 all property/global coefficientRestitution
peratomtypepair &
2 0.1 0.1 0.1 0.1
```

...

Результат виконання скрипта. Результатами виконання вищенаведеного скрипта буде такий файл відображення результатів **dump** у папці **vtk/post**:

dump.hill

Для візуалізації результатів, спочатку треба виконати перекодування файла **dump** у формат **vtk**, а потім прочитати ці файли в програмі ParaView (рис. 14.10).

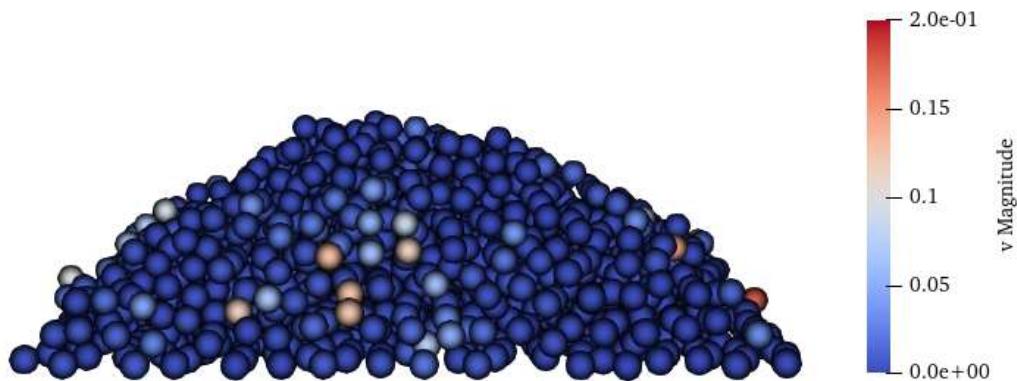
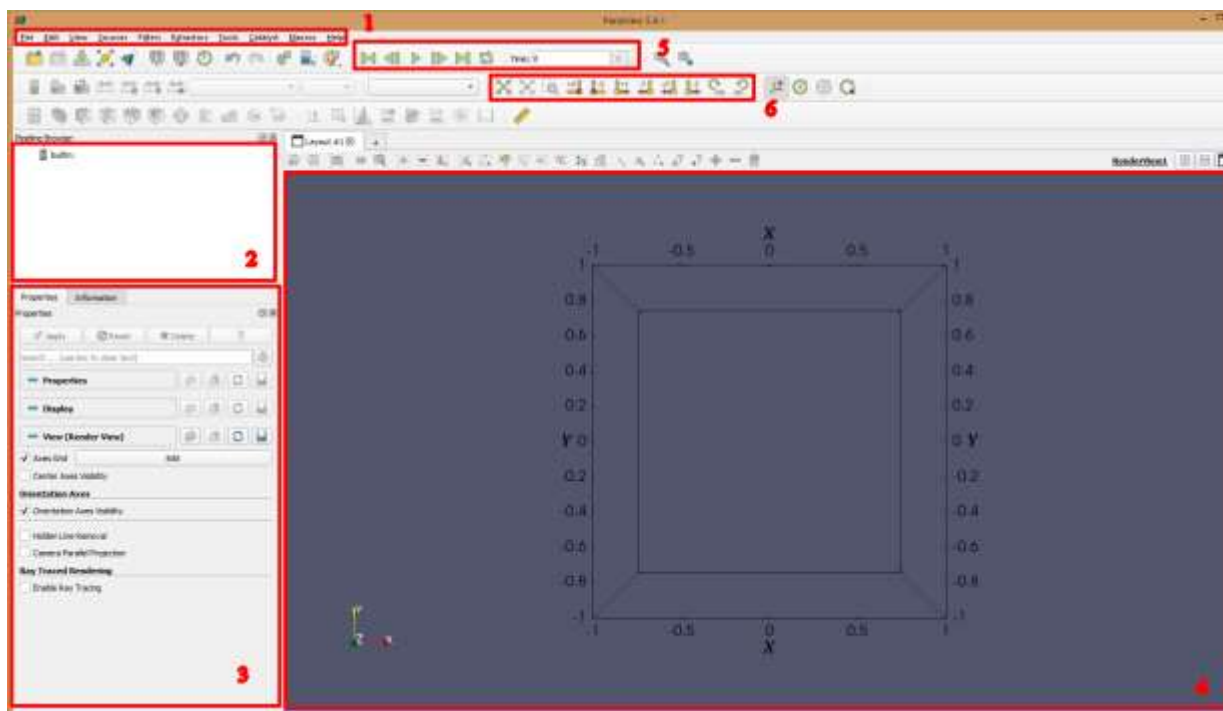


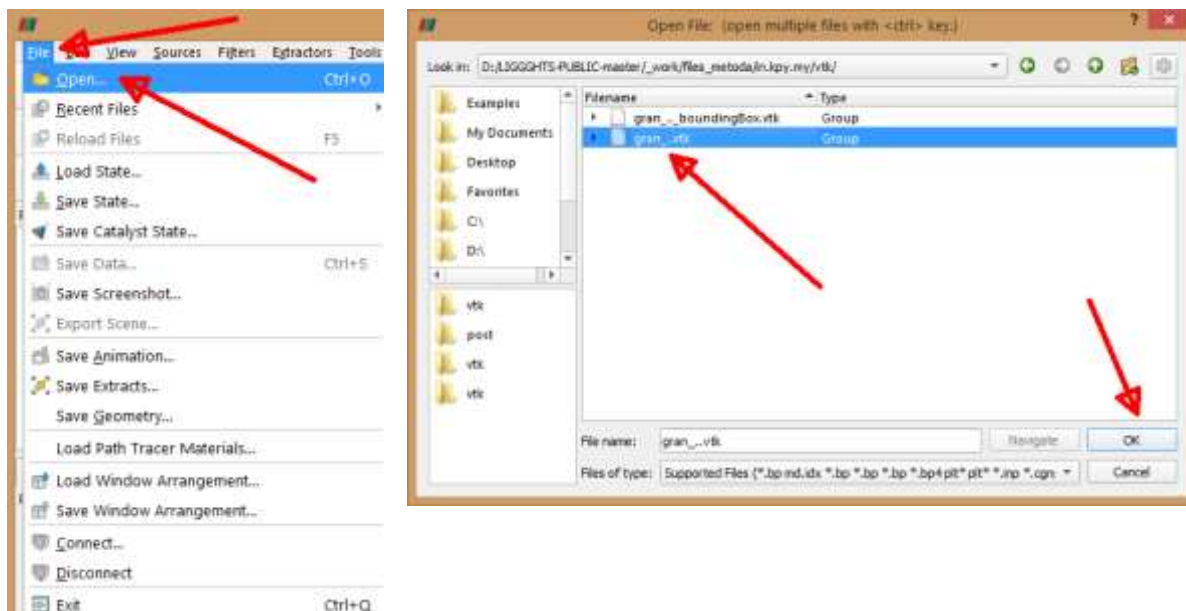
Рис. 14.10. Графічний результат виконання скрипта в програмі **ParaView**

Інтерфейс програми ParaView. Інтерфейс програми **ParaView** включає такі важливі для ефективної роботи групи меню (рис. 14.11):

- 1 – головне меню налаштувань програми;
- 2 – зона відображення відкритих файлів;
- 3 – зона задання властивостей відкритого файла;
- 4 – основна зона відображення результатів;
- 5 – меню управління процесом анімації;
- 6 – меню масштабування зображення.

Рис. 14.11. Інтерфейс програми **ParaView**

Для початку роботи програми ParaView потрібно відкрити файли ***.vtk**. Для цього слід вибрати в головному меню підрозділ **File**, далі **Open**, знайти попередньо створені файли ***.vtk**, вибрати їх та натиснути **OK** (рис. 14.12).

Рис. 14.12. Меню відкриття файлів для їх зчитування в програмі **ParaView**

У вікні зони відображення відкритих файлів (рис. 14.13) видно назву відкритого файла. Для його відображення потрібно натиснути кнопку **Apply**.

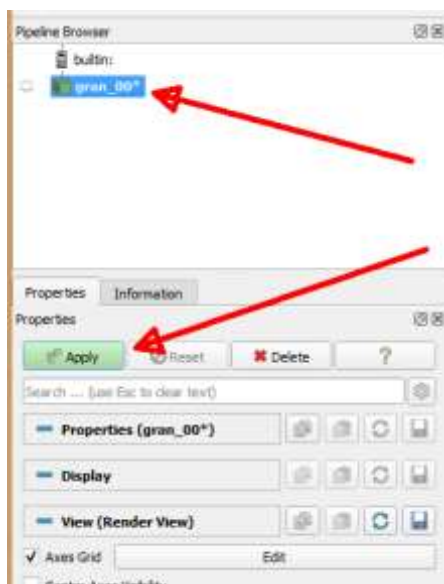


Рис. 14.13. Застосування налаштувань для відображення відкритих файлів у програмі **ParaView**

Далі задаємо властивості відкритого файла у відповідній зоні. Спочатку в підменю **Display (Geometry Representation)** натискаємо в **Representation** на **Surface** та вибираємо у випадному меню тип відображення частинок **Point Gaussian** (рис. 4.14).

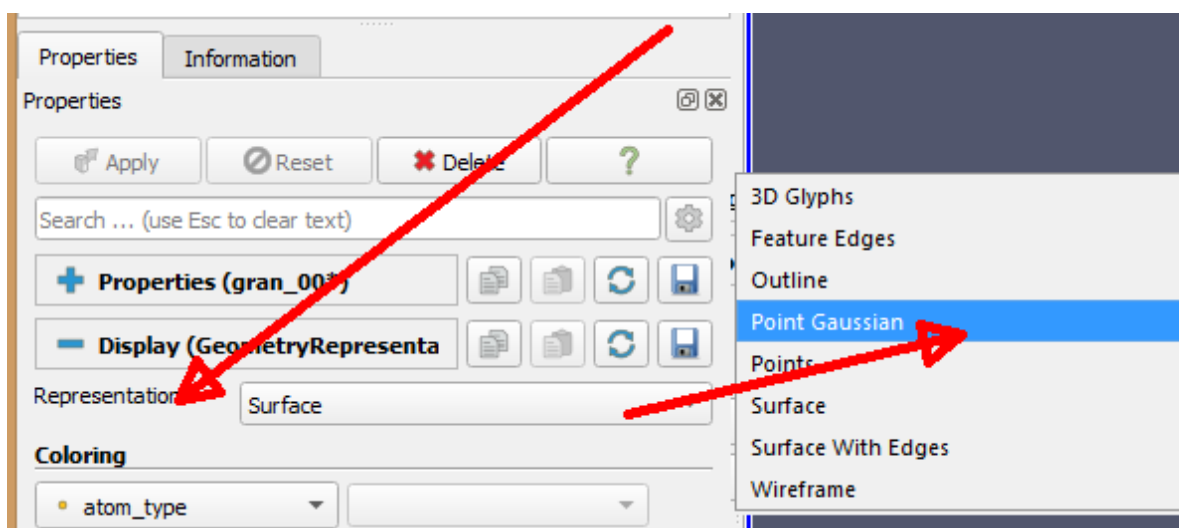


Рис. 4.14. Вибір виду відображення частинок у програмі **ParaView**

Далі можна вибрати опцію **Coloring**, яка розфарбує частинки сипкого середовища відповідно до вибраної властивості, наприклад, кутової швидкості **Omega** або радіусу **Radius** та задати масштаб відображення частинок за допомогою задання величини радіусу **Gaussian radius** вручну або за допомогою множників **0.5x** та **2x**.

Результатом виконання вищеописаних операцій буде такий вигляд вікна програми **ParaView**, який відповідає початку процесу моделювання (рис. 4.15).

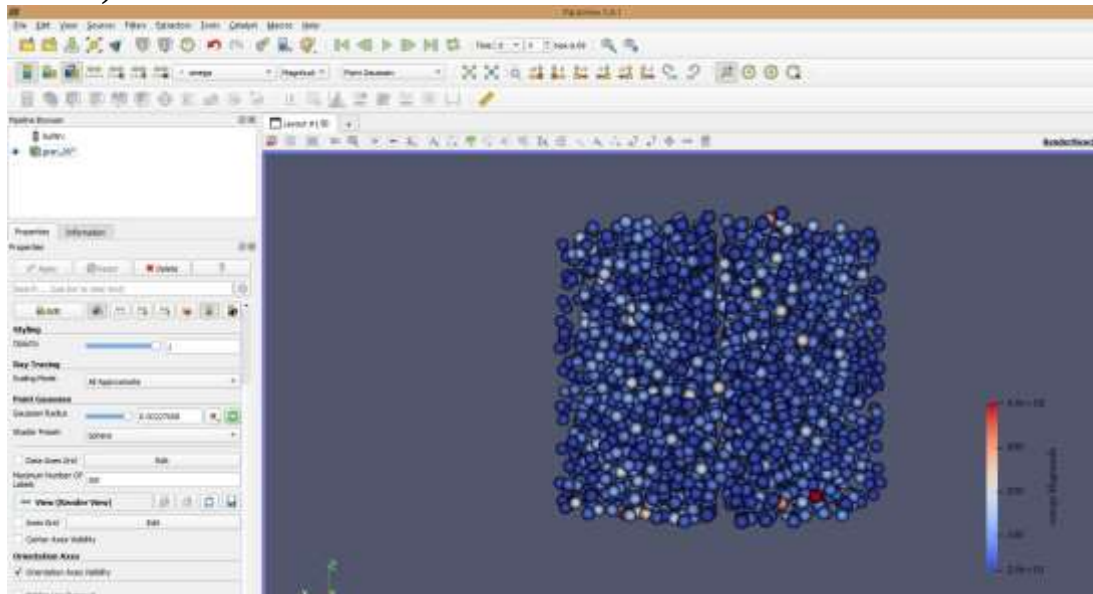


Рис. 4.15. Графічне відображення результатів розрахунків з попередньо виконаними налаштуваннями меню програми **ParaView**

З багатьма іншими налаштуваннями програми ParaView можна більш детально ознайомитись у навчальному посібнику)⁴⁴.

⁴⁴ Моделювання статички і динаміки сипких матеріалів у LIGGGHTS [Електронний ресурс] : навч. посіб. для здобувачів ступеня магістра за спеціальностями 131 Прикладна механіка, 133 Галузеве машинобудування / А. Я. Карвацький, І. О. Мікульонюк, В. М. Витвицький ; Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – 76 с. URL : <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/45613>

РОЗДІЛ 3 ПРИКЛАДИ ПРАКТИЧНОГО ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДІВ ІНЖИНІРИНГУ ІННОВАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ТА ОБЛАДНАННЯ В ПРОМИСЛОВOSTІ

Тема 1 Розробка інноваційних конструкцій та технологічних регламентів експлуатації електрокальцинаторів для прожарювання антрациту та нафтового коксу

Лекція 1.1(15) Інноваційні конструкції та технологічні регламенти експлуатації електрокальцинаторів для прожарювання антрациту та нафтового коксу

15.1 Етапи інноваційного процесу з модернізації електрокальцинаторів

Етапи інноваційного процесу з розробки електрокальцинаторів нового покоління включають:

- аналіз сучасного стану ресурсоенергозбереження з технології виробництва вуглецевмісного наповнювача електродних виробів в електрокальцинаторах, визначення потреби в інноваціях;
- теоретично-експериментальні дослідження наявного промислового обладнання електрокальцинаторів. Верифікація розроблених числових моделей;
- аналіз проведених досліджень та розробка на їх підставі інноваційних конструкцій та технологічних регламентів експлуатації електрокальцинаторів;
- впровадження розроблених інновацій.

Подібні етапи розробки та впровадження інновацій будуть розглянуті в деяких подальших лекціях.

15.2 Технологія виробництва вуглецевмісного наповнювача електродних виробів в електрокальцинаторах, аналіз її сучасного стану та визначення потреби в інноваціях

Напівфабрикатом для виробництва електродних виробів є вуглецевмісні композиції, з яких формують заготовки і потім піддають високотемпературній обробці. Вуглецевмісні композиції отримують у процесі змішування твердого наповнювача з рідким зв'язуючим (сполучним). Сировиною для виробництва вуглецевого наповнювача є різні

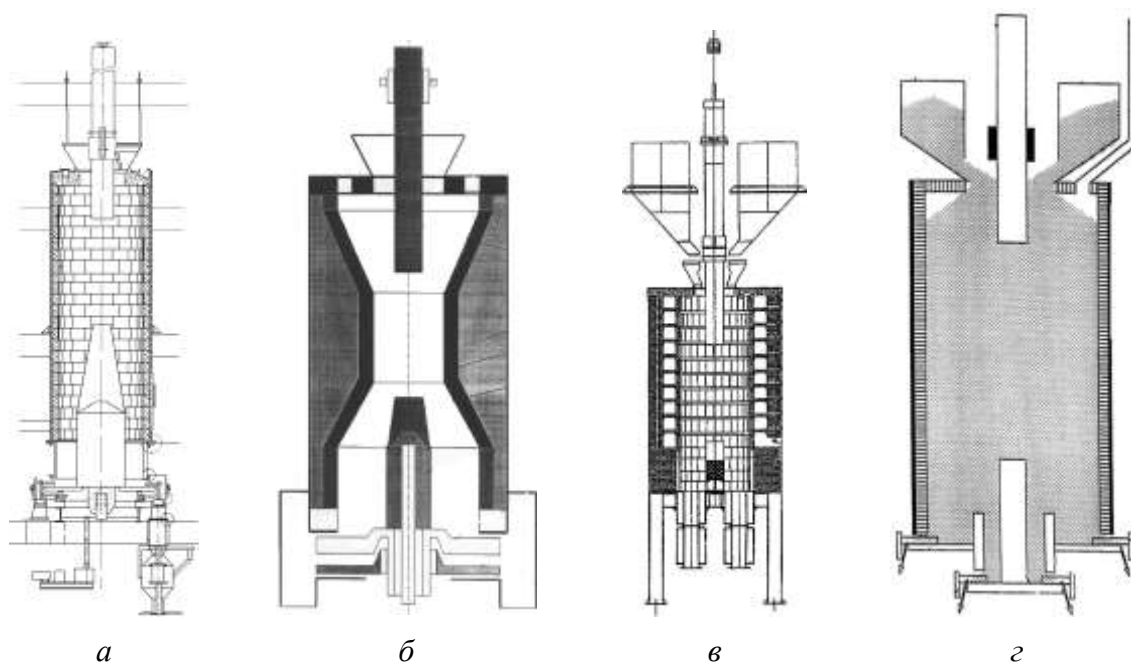
види коксу (нафтовий, пековий, кам'яновугільний тощо), антрацит, термоантрацит)⁴⁵.

Основною метою процесу термообробки під час виготовлення вуглецевого наповнювача з антрациту або сирого коксу різного походження є створення умов для структурної перебудови матеріалу, що прожарюється. Це забезпечує максимальне ущільнення вихідної сировини, збільшення її механічної міцності, електро- й теплопровідності та термостійкості. У процесі прожарювання відбувається стабілізація усадки матеріалу наповнювача, що дає змогу контролювати й керувати об'ємними змінами електродних виробів під час їх подальшої термічної обробки.

Для термооброблення вуглецевмісної сировини за температур (900–1400) °C використовуються обертові барабанні, ретортні та шахтні електричні печі, або електрокальцинатори.

Термооброблення вуглецевмісного матеріалу в електрокальцинаторах полягає в його нагріванні за рахунок джоулевої теплоти, що виділяється під час проходження електричного струму крізь сипкий електропровідний матеріал, що рухається в робочому просторі електропечі (рис. 15.1). Електрокальцинатор – це шахтна електропіч опору постійного або змінного струму, яка складається з металевої циліндричної обичайки, зсередини футерованої вогнетривкими та теплоізоляційними матеріалами, з осьовим розташуванням двох електродів, до яких підводиться електричний струм (рис. 15.1,а). Циліндрична порожнина, або робочий простір, електропечі може бути як постійного, так і змінного по висоті поперечного перерізу (рис. 15.1,б – електрокальцинатор з дроселювальним пристроєм). Зверху робочого простору розташований живильний вузол, призначений для подачі сировини у піч, а знизу – розвантажувальний механізм, призначений для вивантаження термообробленого матеріалу. Рівень електричної потужності печі і продуктивність механізму розвантаження однозначно визначають рівень температури та тривалість перебування оброблюваного матеріалу в зоні прожарювання. Високотемпературне оброблення вуглецевих матеріалів (антрациту) в електрокальцинаторах зазвичай відбувається за температури (1200–1300) °C. Однак існують конструкції електрокальцинаторів для одержання високоякісного графітованого нафтового коксу, у яких рівень термообробки сягає (2600–3000) °C.

⁴⁵ Panov, E., Lazarev, T., Karvatskii, A., Leleka, S., Mikulionok, I., Derkach, V., & Tiutiunnik, P. (2019). The current state of resource and energy saving in the technology of production of carbon-based filler of electrode products (review). *Energy Technologies & Resource Saving*, (1), 17-34. URL : <https://doi.org/10.33070/etars.1.2019.02>



а – рядовий двостадійний; *б* – з дроселювальним пристроєм; *в* – з периферійним нагрівом теплотою від згоряння летких газів; *г* – з подвійним вивантаженням матеріалу.
Рис. 15.1. Конструкції електрокальцинаторів

Прожарювання вуглецевмісного наповнювача в рядовому електрокальцинаторі (рис. 15.1, *а*) відбувається у дві стадії, що знижує продуктивність та відповідно підвищує питомі витрати електроенергії. Двостадійна робота цих агрегатів пов'язана з тим, що після першої стадії прожарювання, внаслідок значної нерівномірності температурного поля в робочому просторі печі, отримують наповнювач зі значною неоднорідністю його фізичних властивостей. Тому для підвищення однорідності властивостей готового продукту використовують другу стадію термооброблення.

Електрокальцинатор з утилізацією теплоти згоряння летких (рис. 15.1, *в*), що виділяються з оброблюваного матеріалу, забезпечує більш високу рівномірність температурного поля печі порівняно з рядовим, але потребує додаткового очисного та пальникового обладнання.

Конструкція електрокальцинатора з двома механізмами вивантаження (рис. 15.1, *г*) надає можливість розділяти термооброблений матеріал на периферійний (з середньою температурою обробки (700–1300) °С) і центральний (з середньою температурою обробки (2300–2600) °С). При цьому одночасно отримуються два види термообробленого матеріалу: вуглецевий наповнювач звичайної якості та високоякісний графітований кокс, який можна також використовувати як карбюризатор у металургії. У конструкції (рис. 15.1, *г*) функцію високотемпературної теплоізоляції також виконує низькотемпературний периферійний шар термооброблюваного

матеріалу, наявність якого значно зменшує вимоги до вогнетривкої футеровки електропечі та підвищує експлуатаційний ресурс обладнання.

На підставі аналізу сучасного стану технології виробництва вуглецевмісного наповнювача електродних виробів в електрокальцинаторах обґрунтовано потребу в інноваціях та визначено такі їх напрямки:

- зменшення нерівномірності електричного і, як наслідок, температурного поля в горизонтальних перерізах електрокальцинатора;
- створення надійної системи керування електроживленням електрокальцинатора, що забезпечує мінімізацію нерівномірності в розподілі електричного струму в оброблюваному матеріалі;
- організація шляху проходження матеріалу крізь робочий простір електропечі, який забезпечить перебування усієї сировини в зоні прожарювання з максимальним рівнем температури;
- вирішення проблеми вигорання вогнетривкої футеровки в зонах найбільшого термічного навантаження;
- усунення нестабільності електричних характеристик процесу електрокальцинування, що пов'язана з циклічністю роботи механізму завантаження/вивантаження.

15.3 Теоретично-експериментальні дослідження наявного промислового обладнання електрокальцинаторів

Для спрощення математичної постановки вихідної задачі та числової реалізації використано її поділ на декілька більш простих пов'язаних між собою складових)¹. Перша з них включає дискретний опис руху сипкого середовища в наближенні моделі дискретного елемента, друга – перехід від дискретної до континуальної постановки, з одержанням поля швидкості, що описує рух сипкого матеріалу як суцільного середовища і третя – зв'язана теплоелектрична задача, в якій враховується динаміка сипкого середовища завдяки наявності конвективної похідної в рівнянні енергії:

$$\begin{cases} m_i \frac{d\mathbf{v}_i}{d\tau} = m_i \mathbf{b} + \sum_{j=1}^k \mathbf{F}_{ij}; \\ I_i \frac{d\boldsymbol{\omega}_i}{d\tau} = \sum_{j=1}^k (\mathbf{T}_{ij} + \mathbf{M}_{ij}), \end{cases} \quad (15.1)$$

$$\bar{\mathbf{v}}_i = \frac{1}{\Delta\tau} \int_{\tau_0}^{\tau_0+\Delta\tau} \frac{\sum_{j=1}^{\ell} w_{\text{space},ij}(\mathbf{r}_i, \mathbf{r}_j) w_{\text{dens},ij}(V_{\text{cell},i}, V_{\text{gran},j}) \mathbf{v}_j^*}{\sum_{i=1}^{\ell} w_{\text{space},ij}(\mathbf{r}_i, \mathbf{r}_j) w_{\text{dens},ij}(V_{\text{cell},i}, V_{\text{gran},j})} d\tau, \quad i = \overline{1, N}, \quad (15.2)$$

$$\begin{cases} c_p(T)\rho(T)\frac{\partial T}{\partial \tau} + \nabla \cdot (T\bar{\mathbf{v}}) = -\nabla \cdot \mathbf{q} + \sigma(T)|\nabla u|^2 + q_{v,chem}, \tau > 0; \\ \nabla \cdot \mathbf{j} = 0, \tau > 0; \\ \mathbf{q} = -\lambda_{eff}(T)\nabla T, \mathbf{j} = -\sigma_{eff}(T)\nabla u, \end{cases} \quad (15.3)$$

де m_i – маса частинки, кг; τ – час, с; i – індекс частинки, відносно якої розглядається система рівнянь (1), $\mathbf{v}_i$ – вектор лінійної швидкості центра маси частинки, м/с; I_i – момент інерції, кг·м²; $\boldsymbol{\omega}_i$ – вектор кутової швидкості, рад/с; $\mathbf{b}$ – вектор масової сили, Н/кг; $\mathbf{F}_{ij}$ – вектор зовнішньої сили, що діє на частинку i через контакт з частинкою j , Н; j – індекс частинки, що взаємодіє з частинкою i ; k – кількість частинок, що перебувають у контакті з частинкою i ; $\mathbf{T}_{ij}$ – зовнішній крутний момент, пов'язаний з контактною взаємодією частинок i та j , Н·м; $\mathbf{M}_{ij}$ – момент опору коченню, Н·м; $\bar{\mathbf{v}}_i$ – осереднене поле швидкості в ейлеревій системі відліку, м/с; $\Delta\tau$ – проміжок часу осереднення швидкості, с; τ_0 – початковий час осереднення, с; $w_{space,ij}(\mathbf{r}_i, \mathbf{r}_j)$ – просторова вагова функція, яка залежить від $\mathbf{r}_i \in \Omega_2$ – радіуса вектора точки осереднення та радіуса-вектора $\mathbf{r}_j \in \Omega_1$ частинок, що перебувають в околі $\mathbf{r}_i$; Ω_1 – розрахункова область дискретної моделі, що належить до лагранжевої системи відліку; Ω_2 – розрахункова область нерозривної моделі, що належить до ейлеревій системи відліку; $w_{dens,ij}(V_{cell,i}, V_{gran,j})$ – вагова функція, за допомогою якої враховується варіація насипної густини частинок Ω_1 і залежить від об'єму гранул ($V_{gran,j}$), які вміщуються в об'ємі розрахункової комірки ($V_{cell,i}$); $\mathbf{v}_j^* = (\mathbf{r}_j|_{\tau_0+\Delta\tau} - \mathbf{r}_j|_{\tau_0})/\Delta\tau$ – швидкість частинок у лагранжевій системі відліку, в якій враховується їх поступальний та обертальний рух, м/с; ℓ – кількість частинок, що перебувають в околі $\mathbf{r}_i$; N – кількість розрахункових комірок, що утворюються в результаті дискретизації Ω_2 ; σ_{eff} – ефективна електропровідність сипкого матеріалу, (Ом·м)⁻¹; u – електричний потенціал, В; c_p – масова ізобарна теплоємність, Дж/(кг·К); ρ – густина, кг/м³; T – абсолютна температура, К; τ – час, с; λ_{eff} – коефіцієнт ефективної теплопровідності сипкого матеріалу, Вт/(м·К); $\mathbf{q}$ – вектор густини теплового потоку, Вт/м²; $\mathbf{j}$ – вектор густини електричного струму, А/м²; $\nabla = \left(\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial z}\right)$ – оператор Гамільтона, м⁻¹; $X(x, y, z) \in \Omega_2$ – декартові координати, м; $q_{v,chem}$ – об'ємна густина джерела теплоти від хімічних реакцій взаємодії матеріалу з повітрям за високих температур, Вт/м³.

Для замикання системи рівнянь (15.1)–(15.3) розглядаються відповідні початкові та граничні умови.

Для числового розв'язання комплексної задачі (15.1)–(15.3) застосовується два вільно відкритих програмних коди LIGGGHTS для

задачі динаміки сипкого середовища (15.1) і OpenFOAM для континуальної задачі (15.3) з використанням поля швидкості (15.2).

Відомо, що основним показником якості термообробленого наповнювача в електрокальцинаторі є значення його питомого електричного опору (ПЕО) за кімнатної температури, подрібненого до порошкоподібного стану. На підставі лабораторних досліджень встановлено, що для термообробленого антрациту (або електроантрацита) ця величина має бути меншою за $\text{ПЕО}_{\text{allow}} = 1000 \text{ мкОм}\cdot\text{м}$, яку можна досягти за мінімального значення температури прожарювання – 1300°C тривалістю не менше 2 год. Для отримання високоякісного графітованого нафтового коксу з ПЕО меншим за $150 \text{ мкОм}\cdot\text{м}$ мінімальна температура обробки має перевищувати 2200°C тривалістю 2 год.

Розглянемо результати натурних досліджень експериментальної кампанії електрокальцинатора з дросель-шайбою під час термооброблення антрациту. Схему проведення вимірювань температур футеровки наведено на рис. 15.2.

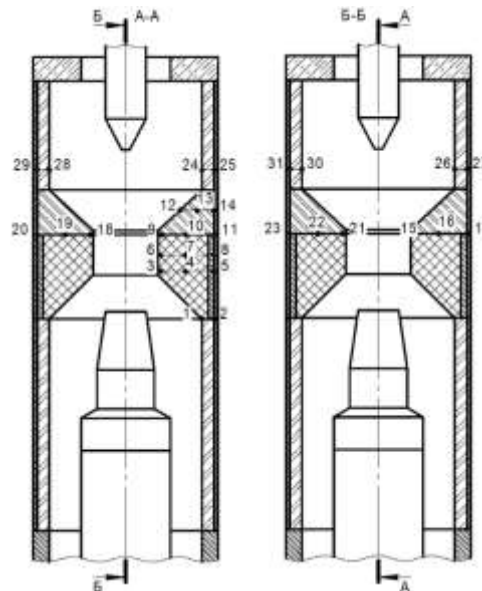


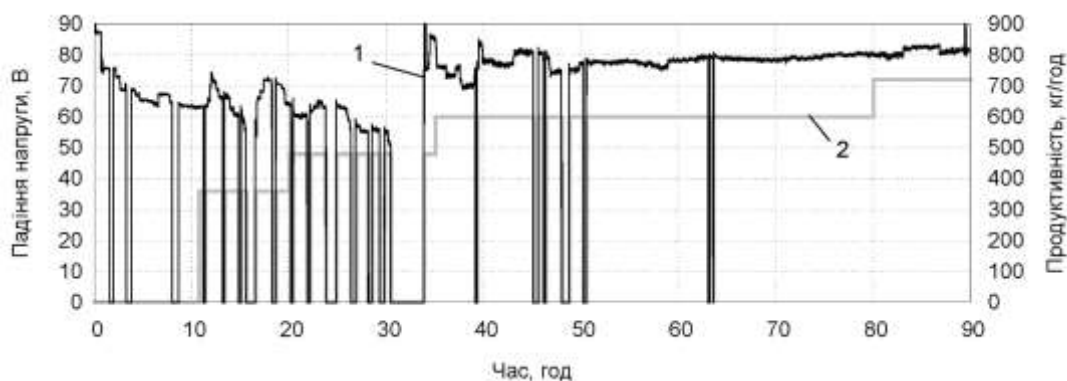
Рис. 15.2. Схема встановлення термометричного обладнання на експериментальній кампанії електрокальцинатора

Під час кампанії прожарювання антрациту на електрокальцинаторі (див. рис. 15.2) проводились вимірювання електричних і термічних параметрів, зокрема електричної потужності, продуктивності, питомого електричного опору прожареного антрациту, рівнів температури футеровки та відхідних газів. Результати експериментальних досліджень наведено на рис. 15.3 і 15.4.

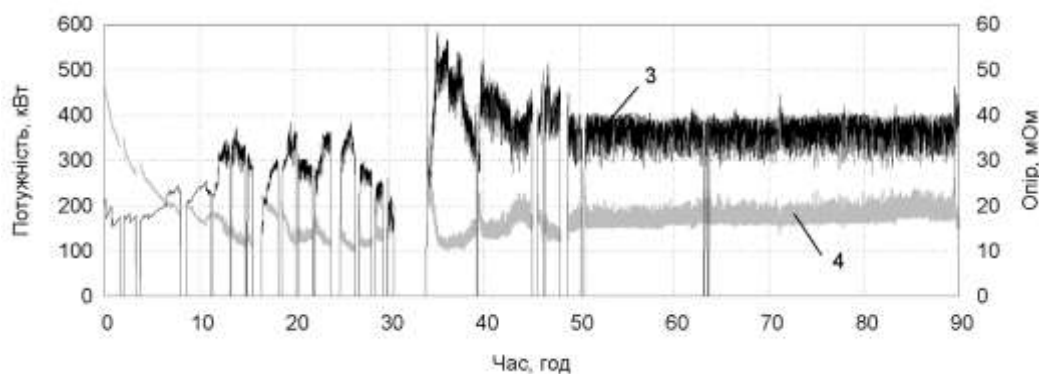
Експериментальна кампанія електрокальцинатора прожарювання антрациту характеризується такими параметрами: тривалість кампанії – 750 год; тривалість пускового періоду або виходу на усталений режим

роботи – 65 год; падіння напруги – (80–85) В; активна потужність – (360–420) кВт; повний електричний опір печі – (18–19) мОм; продуктивність за термообробленим антрацитом – 720 кг/год (див. рис. 15.3); ПЕО прожареного антрациту (550–800) мкОм·м, що набагато менше мінімально потрібного значення 1000 мкОм·м. Тобто, за показником ПЕО електроантрациту можна стверджувати, що під час кампанії його термооброблення температура в зоні прожарювання перевищувала 1300 °С, а витримка за цієї температури становила не менше 2 год. За даними похибка вимірювання температури футеровки за довірчої ймовірності 0,997 складала 3,3 %.

Аналіз експериментальних даних дає підстави зробити такі висновки:
– пусковий режим характеризується поступовим підвищенням активної електричної потужності від 200 кВт до робочого значення 400 кВт, змінним графіком вивантаження матеріалу (рис. 15.3, а), частими відключеннями електрокальцинатора від мережі електроживлення (понад 20 разів) для виконання екстрених технологічних операцій (наприклад, переміщення верхнього електрода з метою мінімізації нерівномірності електричного та теплового полів у поперечних перерізах печі);



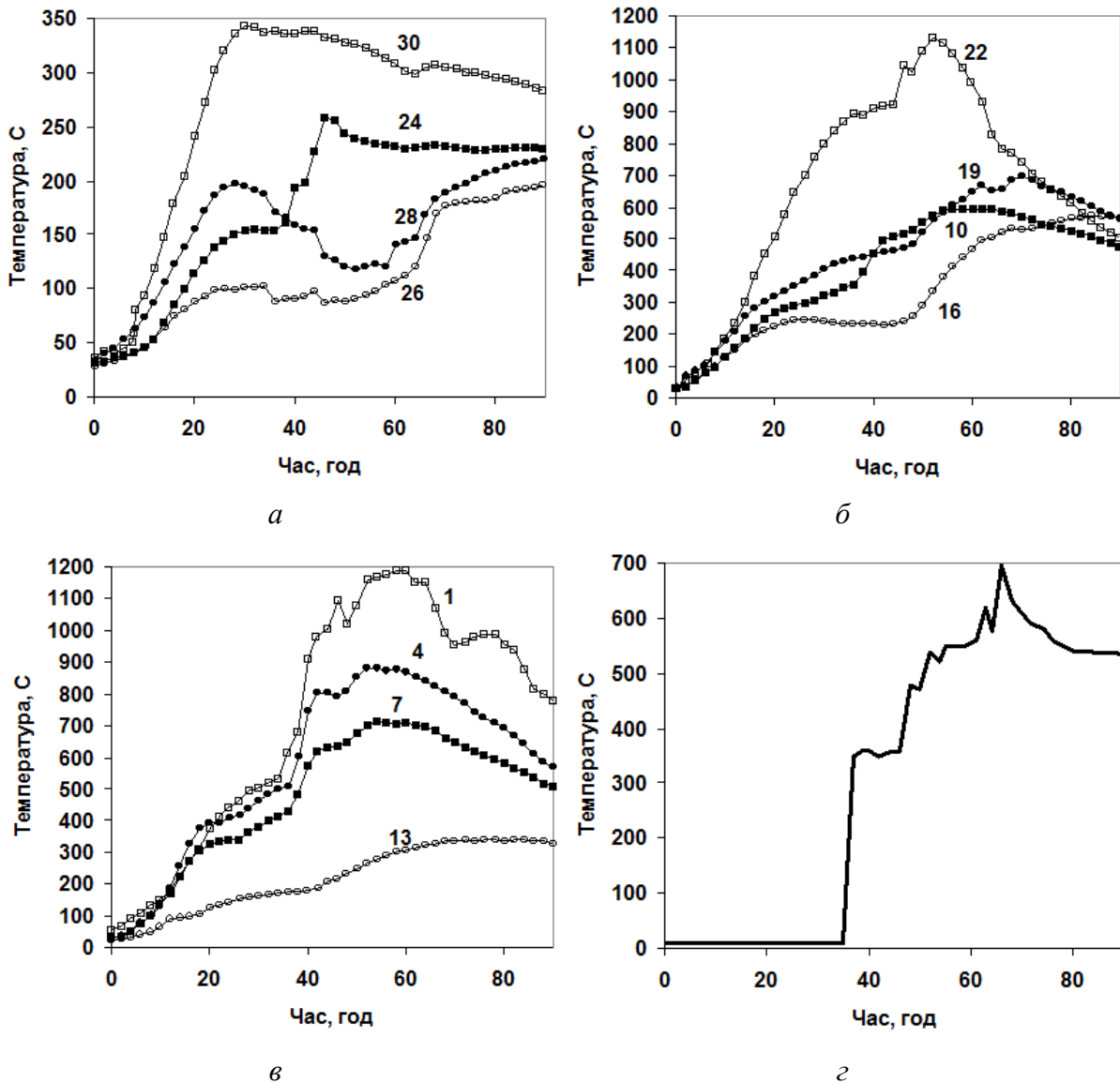
а



б

1 – падіння напруги; 2 – продуктивність; 3 – активна діюча потужність; 4 – повний електричний опір

Рис. 15.3. Параметри експериментальної кампанії електрокальцинатора за період 90 год після пуску



пуску а – розподіл температури над дросель-шайбою (т. 24, 26, 28, 30); б – розподіл температури в контактi між неелектропровiдною та електропровiдною частинами дросель-шайби

(т. 10, 16, 19, 22); в – розподіл температури по висоті дросель-шайби (т. 1, 4, 7, 13); г – температура вiдхiдних газiв

Рис. 15.4. Температури у вимірюваних точках футеровки експериментальної кампанії електрокальцинатора (див. рис. 15.2) за період 90 год після

– експериментальні дані показують значні коливання електричних параметрів (рис. 15.3), що пов'язано зі зміною контактного електричного опору системи (перманентної перебудови контактних пар між частинками) внаслідок руху сипкого матеріалу, спричиненого вивантаженням матеріалу з печі;

– температурне поле в електрокальцинаторі характеризується значною нерівномірністю в поперечних перерізах з яскраво вираженим перегрівом

одної з його сторін (рис. 15.4, т. 1, 22, 30). Найбільш високий рівень температур спостерігається під дросель-шайбою, що вказує на основну зону прожарювання матеріалу в печі;

– причиною зупинки електрокальцинатора під час кампанії прожарювання антрациту є перевищення допустимої температури металевого кожуха печі в зоні під дросель-шайбою.

15.4 Верифікація числової дискретно-континуальної моделі фізичного стану електрокальцинатора

Практика застосування числових моделей для проектування промислового обладнання передусім потребує оцінки похибки розрахунків (верифікації), яку зазвичай виконують за допомогою порівнянь з точними розв'язками або експериментальними даними. У праці верифікація проводився в декілька етапів: на першому налаштування та оцінка похибки виконувалися окремо для дискретної й континуальної числових моделей; на другому – об'єднаній дискретно-континуальної числової моделі.

Налаштування дискретної моделі статички та динаміки сипкого матеріалу з властивостями, близькими до антрациту, з використанням програмного коду LIGGGHTS виконувалося на прикладі формування кута природного укусу. При цьому також визначався вплив гранулометричного складу сипкого матеріалу та ефективних коефіцієнтів тертя ковзання й кочення на формування кута природного укусу. У результаті числових експериментів було встановлено, що за умови використання однакових сферичних частинок сипкого матеріалу з еквівалентним діаметром $d = 4$ мм та ефективних коефіцієнтів тертя ковзання й кочення зі значеннями $\mu_s = 0,6$, $\mu_r = 0,3$, відповідно, похибка визначення кута природного укусу антрациту не перевищує 3 %.

Для апробації програмного коду OpenFOAM проведено серію тестів на розв'язках стаціонарних і нестаціонарних теплоелектричних задач та їх порівняння з відповідними аналітичними та числовими розв'язками. У результаті було встановлено, що похибка розрахунків лежить у межах (0,1–0,6) %.

Верифікація дискретно-континуальної числової моделі фізичних полів електрокальцинатора з урахуванням щільного руху сипкого середовища та хімічної взаємодії виконувалася за вищенаведеними експериментальними даними кампанії прожарювання антрациту. За результатами зіставлення розрахунків за дискретно-континуальною числовою моделлю теплоелектричного стану електрокальцинатора з експериментальними даними можна зробити такі висновки:

– числова модель теплоелектричних полів шахтної електропечі є вісесиметричною, тому в ній не враховується нерівномірність розподілу електричного струму в азимутальному напрямку та відповідно несиметричний каналізований струм, а також локальні перегріву матеріалу та їх зміна в часі;

– повний електричний опір шахтної печі відтворюється з похибкою: не більше 10 % – на етапі пускового періоду, коли сипкий матеріал не рухається, та не більше 14 % – в усталеному режимі, що відповідає експлуатаційному періоду. Значна розбіжність між значеннями повного електричного опору електрокальцинатора в період (10–17) год з початку вивантаження матеріалу пов'язана з комплексом явищ, що не можуть бути враховані в числовій моделі через інерційність руху сипкого матеріалу, оскільки матеріал в електропечі приходить до руху в об'ємі робочого простору тільки через деякий час після початку вивантажень; а також регулярні відключення від мережі електроживлення;

– температурні залежності фізичних властивостей термообробленого матеріалу значно відрізняється від сирого. Тому в числовій моделі використовується ефективні значення фізичних властивостей сипкого наповнювача, які є характерними для сталого співвідношення сирий/оброблений матеріал, що досягається через деякий час після початку вивантажень;

– амплітуда коливань повного електричного опору електрокальцинатора, розрахованого за допомогою числової моделі, становить $\pm(3-6) \%$, у той час як експериментальні значення перебувають у межах $\pm 10 \%$. Це можна пояснити тим, що в числовій моделі враховується лише короткочасне охолодження системи за час вивантаження дози;

– розроблена числова модель адекватно відтворює характер зміни температури в експериментальних точках футеровки та прогнозує їхні значення, що перебувають між зональними мінімумами та максимумами. Осереднена похибка розрахункових значень температури за відсутності локальних перегрівів не перевищує 17 %.

15.5 Аналіз проведених досліджень та розробка на їх підставі інноваційних конструкцій та технологічних регламентів експлуатації електрокальцинаторів

Для розробки інноваційних технічних рішень з ресурсоенергозбереження в технології виробництва наповнювача електродних виробів доцільно використовувати числове моделювання. Саме такий підхід реалізовано в праці на прикладі електрокальцинатора з дросель-шайбою для термооброблення антрациту, в якій досліджено вплив

зміни конструкції дросель-шайби та її геометричних параметрів (тобто типорозміру дросель-шайби), електричної потужності та продуктивності на технологічні показники роботи електрокальцинаторів і виконано розробку ефективних регламентів пуску та експлуатації.

Вплив конструкції дросель-шайби на технологічні показники роботи електрокальцинатора досліджено за допомогою серії числових експериментів на прикладі чотирьох найбільш ймовірних варіантах її конструктивного оформлення (рис. 15.5).

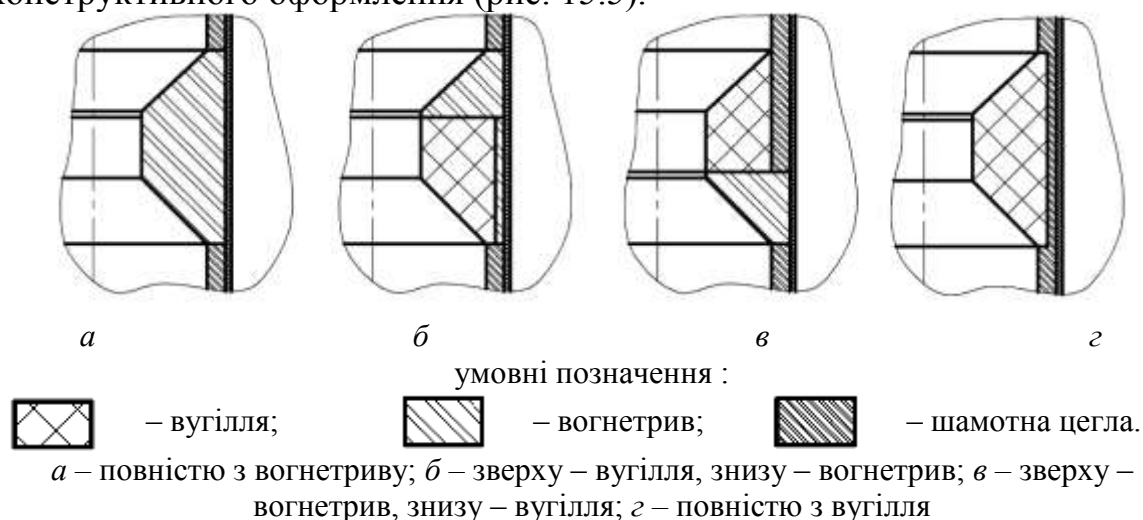


Рис. 15.5. Конструкції дросель-шайби електрокальцинатора залежно від її матеріалу

При цьому для оцінки ресурсоенергоефективності запропонованих конструкцій дроселювальних пристроїв обрано такі технологічні показники ефективності:

– $C_{q,calc} = \text{ПЕО}_{\min} / \text{ПЕО}_{\text{allow}}$ – безрозмірний коефіцієнт якості прожарювання наповнювача, де $\text{ПЕО}_{\min}$ – мінімальне значення експериментально визначеного ПЕО матеріалу, отриманого в електрокальцинаторі; $\text{ПЕО}_{\text{allow}} = 1000 \text{ мкОм} \cdot \text{м}$ – допустиме або регламентоване значення ПЕО для електроантрациту;

– $C_{sh,top} = V_{top\ 1300} / V_{sh,top}$, $C_{sh,bot} = V_{bot\ 1300} / V_{sh,bot}$ – безрозмірні об'ємні коефіцієнти зон шамотної футеровки з температурою понад 1300°C (максимальна температура застосування шамотної цегли) верхньої й нижньої частин футеровки печі, де $V_{top\ 1300}$, $V_{bot\ 1300}$ – об'єм зон верхньої й нижньої частин шамотної футеровки з температурою понад 1300°C , відповідно, м^3 ; $V_{sh,top}$, $V_{sh,bot}$ – об'єми зон верхньої й нижньої частин шамотної футеровки, відповідно, м^3 ;

– $C_{mull,alum} = V_{1600} / V_{mull,alum}$ – безрозмірний об'ємний коефіцієнт зони мулітокорундової футеровки з температурою понад 1600°C (максимальна температура застосування мулітокорундового вогнетриву), де V_{1600} – об'єм

зони з температурою понад 1600 °С, м³; $V_{\text{mull.alum}}$ – повний об’єм зони з мулітокорундовою футеровкою, м³;

– I_p – сила робочого струму на електрокальцинаторі, кА.

Результати розрахунків вищенаведених показників наведено в табл. 15.1.

Табл. 1. Показники роботи електрокальцинатора за різної конструкції дросель-шайби

Конструкції дросель-шайби за рис. 6	$C_{q.calc}$	$C_{sh.top}$	$C_{sh.bot}$	$C_{mull.alum}$	I_p
<i>a</i>	1,0	0,0	0,074	0,005	4,0
<i>b</i>	0,95	0,0	0,025	0,045	5,9
<i>в</i>	0,81	0,003	0,224	0,18	6,3
<i>г</i>	0,99	0,054	0,0	0,0	8,6

З аналізу даних табл. 15.1 випливає, що за інтегральним показником, який включає якість прожареного антрациту, температурні умови експлуатації вогнетривкої футеровки та робочу силу струму, тобто у підсумку ресурсоенергоефективність, є запатентована конструкція дросель-шайби, наведеної на рис. 15.5, б.

Для дослідження впливу зміни геометричних параметрів дросель-шайби, активної електричної потужності та продуктивності на технологічні показники ефективності електрокальцинатора $C_{q.calc}$, $C_{sh.top}$, $C_{sh.bot}$, $C_{mull.alum}$ використано таку систему безрозмірних незалежних параметрів:

– безрозмірний діаметр дросель-шайби

$$\bar{D} = \frac{D_{др}}{D_{вн}}, \quad (15.4)$$

де $D_{др}$ – внутрішній діаметр дросель-шайби, м; $D_{вн}$ – внутрішній діаметр робочого простору печі без дросельшайби, м;

– безрозмірна висота дросель-шайби

$$\bar{S} = \frac{H_{др} \delta_{др}}{\max\{H_{др} \delta_{др}\}}, \quad (15.5)$$

де $H_{др}$ – висота дросель-шайби, м; $\delta_{др} = (D_{вн} - D_{др})/2$ – товщина дросель-шайби, м;

– безрозмірна активна електрична потужність

$$\bar{P} = \frac{P - P_{min}}{P_{max} - P_{min}}, \quad (15.6)$$

де P , P_{max} , P_{min} – поточна, максимальна й мінімальна активна електрична потужність на електрокальцинаторі, відповідно, Вт;

– безрозмірна продуктивність

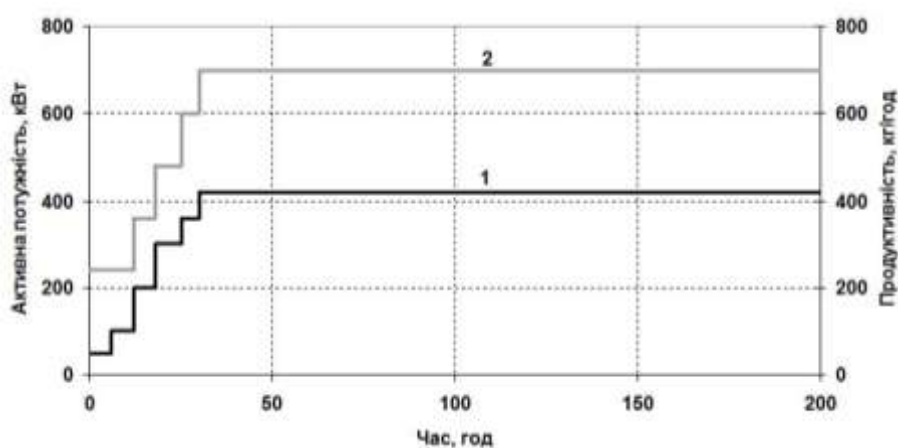
$$\bar{G} = \frac{G - G_{min}}{G_{max} - G_{min}}, \quad (15.7)$$

де G , $G_{\max}$, $G_{\min}$ – поточна, максимальна й мінімальна продуктивність електрокальцинатора, відповідно, кг/год.

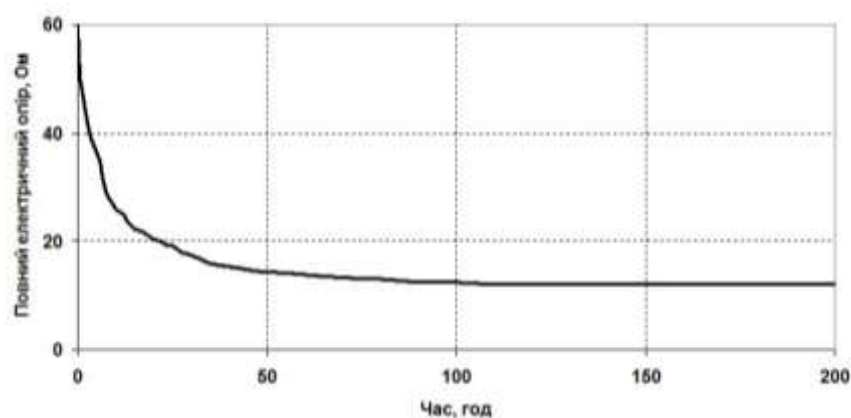
На підставі проведених числових досліджень фізичних полів електрокальцинатора під час термооброблення антрациту з конструкцією дросель-шайби (рис. 15.5, б) було встановлено такі раціональні діапазони зміни безрозмірних незалежних параметрів, що можуть бути корисними для проектування дроселювальних пристроїв і режимів експлуатації печей, які забезпечують ресурсоенергоєфективність електротермічного обладнання: $\bar{D} = 0,35\text{--}0,6$; $\bar{s} = 0,14\text{--}0,38$; $\bar{P} = 0,4\text{--}0,62$; $\bar{G} = 0,5\text{--}0,75$.

З використанням числового аналізу розроблено модернізований регламент пуску та експлуатації електрокальцинатора з дросель-шайбою для прожарювання антрациту (рис. 15.6). Розробка модернізованого регламенту здійснювалася за таких обмежень режимних параметрів:

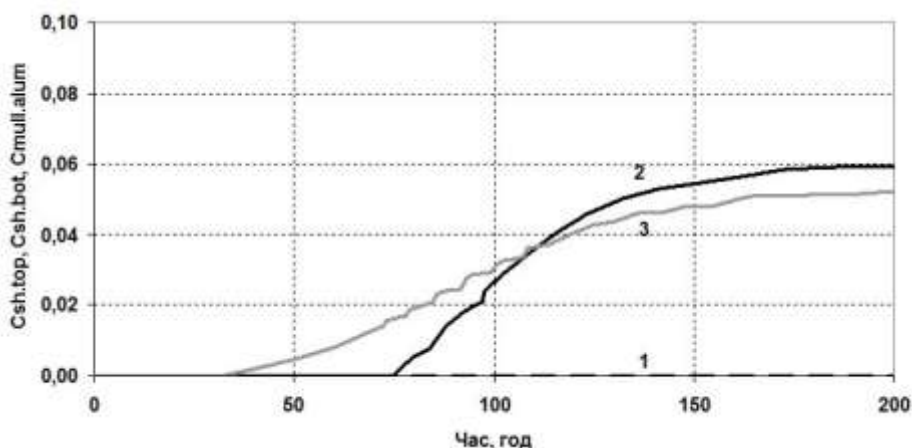
- тривалість пускового періоду не більше 30 год;
- рівномірне зростання електричної потужності протягом пускового періоду;
- вивантаження матеріалу здійснюється з моменту пуску й рівномірно зростає до робочого значення з початком експлуатаційного періоду.



а



б



в

a – регламент пуску та експлуатації: 1 – режим підводу активної електричної потужності;

2 – режим зміни продуктивності; *b* – повний електричний опір; *v* – технологічні показники роботи: 1 – $C_{sh.top}$; 2 – $C_{sh.bot}$; 3 – $C_{mul.alum}$

Рис. 15.6. Розроблений регламент пуску та експлуатації електрокальцинатора для прожарювання антрациту

15.6 Впровадження розроблених інновацій

Розроблений регламент пуску та експлуатації електрокальцинатора для високотемпературного оброблення антрациту впроваджено на ПрАТ «Укрграфіт» (м. Запоріжжя, Україна). У результаті впровадження модернізованого регламенту ресурс роботи обладнання збільшився від 1 міс. до 6 міс., а питомі витрати електроенергії зменшилися на (50–100) кВт·год/т.

З використання наведеної методології також виконано розробки конструкції і регламенту пуску та експлуатації електрокальцинатора для прожарювання нафтового коксу за температури понад 2200 °С, результати впровадження яких на ПрАТ «Укрграфіт» показали: ресурс роботи збільшився від 2 діб до 1 року, а питомі витрати електроенергії становили 1889 кВт·год/т. Для порівняння класична технологія отримання графітованого наповнювача в печах Рідгамера та Ачесона сягає понад 3500 кВт·год/т.

Удвічі більший ресурс роботи електрокальцинатора для термооброблення нафтового коксу порівняно з електрокальцинатором для прожарювання антрациту пояснюється набагато меншою ніж у антрациту абразивністю коксу, що знижує швидкість зношення футеровки.

Тема 2 Розробка інноваційних технологічних регламентів експлуатації та обладнання обертових печей для прожарювання антрациту та нафтового коксу

Лекція 2.1(16) Інноваційні технологічні регламенти експлуатації та обладнання обертових печей для прожарювання антрациту та нафтового коксу

На відміну від попередньої лекції у цій лекції замість розгляду інноваційного процесу буде представлена інноваційна розробка у формі завершеної НДКР (тобто як кінцевий продукт з певними характеристиками).

16.1 Мета, за ради якої модернізовано технологію

полягає у зменшенні витрати природного газу в технологічному процесі високотемпературного оброблення вуглевмісних сипучих матеріалів в обертових печах.

16.2 Основна суть розробленої (модернізованої) технології

полягає у використанні енергоефективних технічних рішень із часткового або повного заміщення природного газу на синтетичний газ у технологічному процесі високотемпературного оброблення вуглевмісних сипучих матеріалів у прожарювальних обертових печах з використанням теплоти матеріалу, що виходить з печі, для забезпечення температурних умов процесу газифікації.

16.3 Анотований зміст інноваційної розробки

Розроблено технічні рішення з термооброблення вуглецевмісного наповнювача електродної промисловості в обертових печах з частковим або повним заміщенням природного газу синтез-газом та рекомендації щодо модифікації конструкцій термічного обладнання і технологічних регламентів його експлуатації. Розроблені технічні рішення включають ескізні проекти газифікатора-охолоджувача обертової печі, який представляє собою модернізоване діюче обладнання барабана-охолоджувача, водоохолоджуваного пальникового пристрою для спалювання синтез-газу разом з природним без попереднього змішування та пристрій для подавання атмосферного повітря в зону прожарювання обертової прожарювальної печі. На промисловій обертовій печі для прожарювання сипучих вуглевмісних матеріалів (антрациту, нафтового або сланцевого коксу) отримано дані експериментальних досліджень, що підтверджують енергоефективність розроблених технічних рішень.

16.4 Проблеми, які інноваційна технологія дає змогу вирішувати

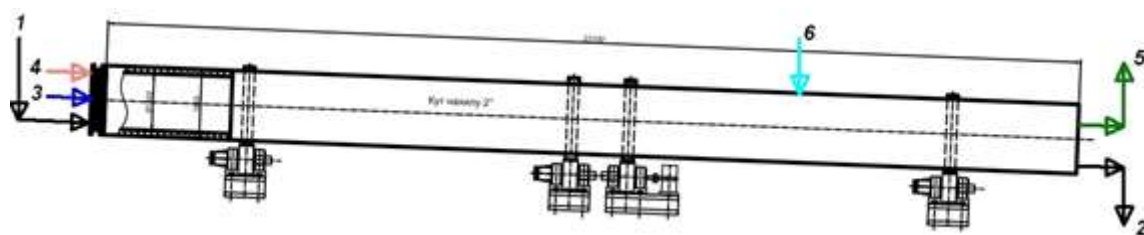
- 1) Підвищення енергоефективності наявного обладнання за рахунок зменшення витрати природного газу.
- 2) Зменшення собівартості вуглевмісного матеріалу – наповнювача вуглецево-графітової продукції.

16.5 Ознаки новизни інноваційної технології
полягають у інноваційних розробках, що забезпечують зменшення витрати природного газу та собівартості наповнювача вуглецево-графітової продукції, порівняно з існуючою технологією.

16.6 Складові інноваційної технології
полягають у таких розробках:

- 1) газифікатора-охолоджувача обертової печі, який представляє собою модернізоване діюче обладнання барабана-охолоджувача печі, в якому спалюється пилова фракція термообробленого вуглецевмісного сипкого матеріалу (рис. 16.1);
- 2) водоохолоджуваного пальникового пристрою для спалювання в обертовій прожарювальній печі синтез газу разом з природним без попереднього змішування (рис. 16.2);
- 3) пристрою для подавання атмосферного повітря в зону прожарювання обертової печі з установленням нагнітачів повітря безпосередньо на її кожусі, перевагою якого є відсутність втрат напору повітря, а також забезпечується рівномірність його подачі в зону прожарювання печі (рис. 16.3);
- 4) спосіб одержання прожареного нафтового коксу;
- 5) числова та експериментальна перевірка розроблених технічних рішень з одержання та використання синтез-газу на модернізованому промисловому обладнанні. Числове моделювання процесу газифікації виконано за математичною постановкою (12.1)– (12.19) (див. лекцію 12), (рис. 16.4–16.7)⁴⁶.

⁴⁶ Determination of parameters of the carbon-containing materials gasification process in the rotary kiln cooler drum / A. Karvatskii, T. Lazarev, S. Leleka, I. Mikulionok, O. Ivanenko // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2020. Vol. 106. No 4/8. P. 65–76. DOI: 10.15587/1729-4061.2020.210767 URL : <http://journals.uran.ua/eejet/article/view/210767/210939>



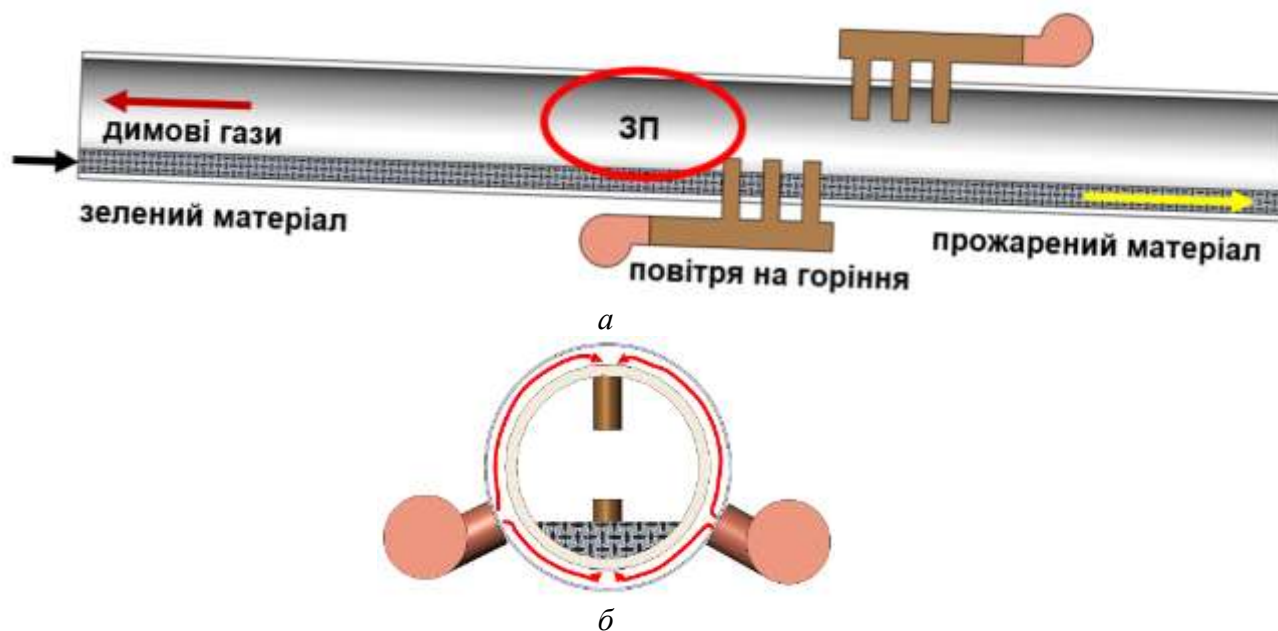
1 – подача вуглецевмісного сипкого матеріалу; 2 – вивантаження вуглецевмісного сипкого матеріалу; 3 – подача пилової фракції термообробленого вуглецевмісного сипкого матеріалу; 4 – подача повітря разом з водяною парою, розведеного гарячими димовими газами печі; 5 – вихід синтез-газу; 6 – зона водяного зрошувального охолодження (на половині довжини барабану)

Рис 16.1. Ескізний проєкт газифікатора-охолоджувача обертової печі



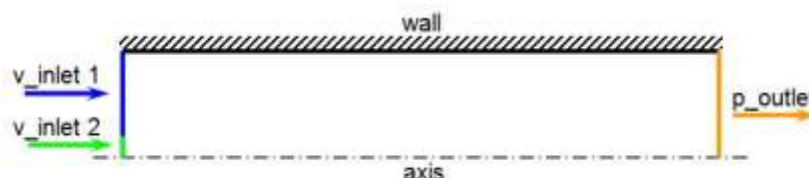
1 – подача метану; 2 – подача синтез-газу; 3 – подача охолодної води; 4 – вихід охолодної води

Рис. 16.2. Комбінований водоохолоджуваний пальниковий пристрій для спільного спалювання синтез газу разом з природним без попереднього змішування



а – перша схема; б – друга схема; ЗП – зона прожарювання

Рис. 16.3. Схеми підведення повітря в зону прожарювання обертової печі за пропонованим способом



axis – вісь симетрії барабана; wall – тверда стінка; v_inlet 1, v_inlet 2 (velocity inlet) – вхід потоків за заданою швидкістю; p_outlet (pressure outlet) – вихід потоку;
розміри барабана: діаметр 1400 мм, довжина 23000 мм

Рис. 16.4. Схема типів ГУ числової моделі газифікації вуглецевмісного наповнювача в барабані-охолоджувачі у вісесиметричному формулюванні

16.7 Технічні характеристики інноваційної технології

Експериментальна перевірка розроблених технічних рішень з одержання та використання синтез-газу на модернізованому промисловому обладнанні показала:

- за умови співвідношення $O_2/C = (40-53) \%$ в розробленому газифікаторі-охолоджувачі обертової печі кількісний склад горючих газів синтетичного газу в молярних частках складає: $CO = (32-38) \%$, $H_2 = (17-19) \%$;

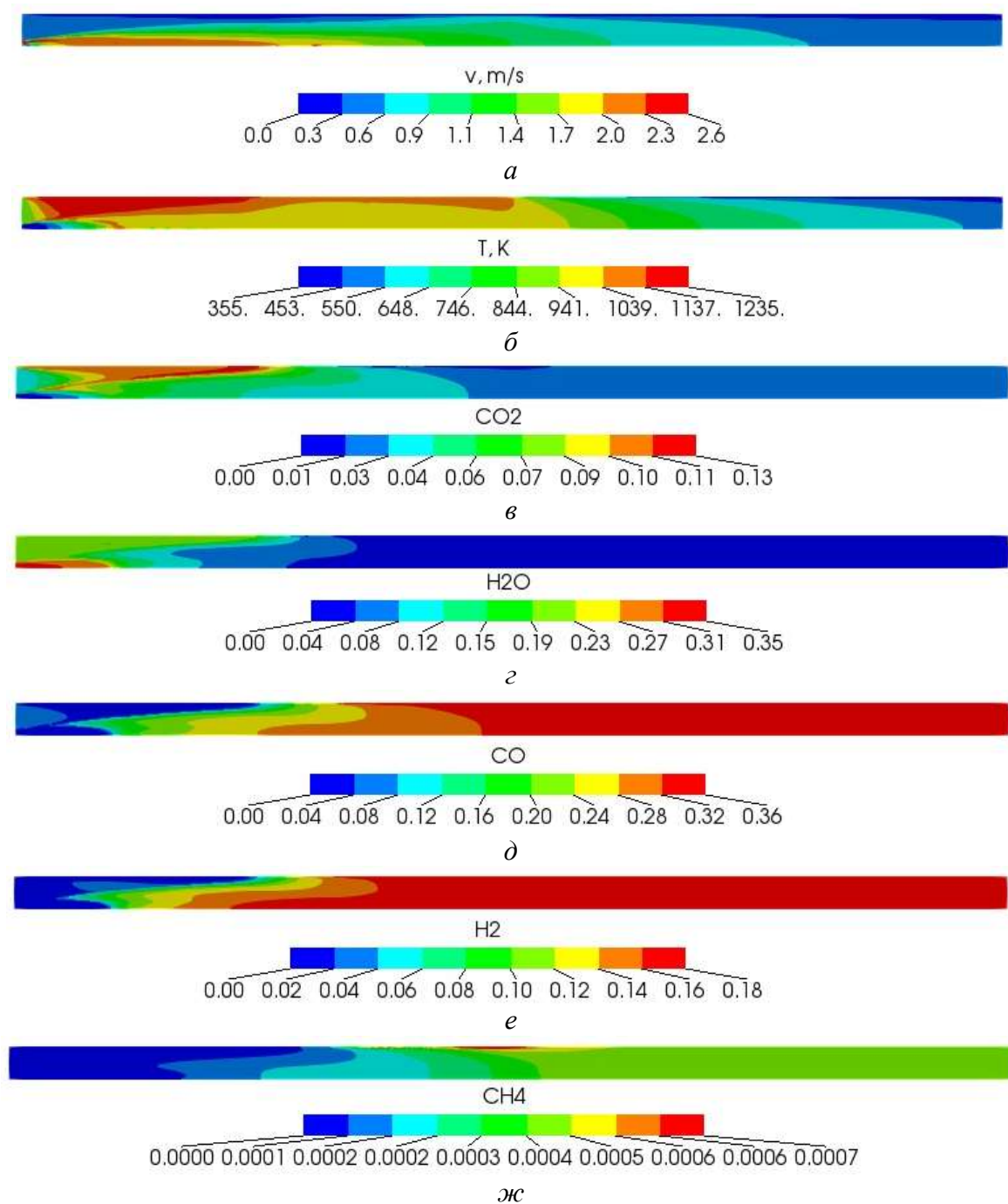
- безпосередня генерація синтез-газу та його спалювання в обертовій прожарювальній печі за рахунок подачі в її робочий простір водяної пари дає змогу заощадити до 40 % витрати природного газу на підтримку потрібного температурного рівня процесу прожарювання вуглецевмісної сировини в печі.

16.8 Техніко-економічний ефект від впровадження інноваційної технології

Чинниками для створення економічного ефекту від впровадження технології є такими:

- перший – генерація в барабані-охолоджувачі обертової печі синтетичного газу продуктивністю та його спалювання в робочому просторі обертової печі з частковою або повною заміною природного газу;
- другий – безпосередня генерація синтез-газу та його спалювання в обертовій прожарювальній печі за рахунок подачі в її робочий простір водяної пари дає змогу заощадити до 40 % витрати природного газу на підтримку потрібного температурного рівня процесу прожарювання вуглецевмісної сировини в печі.

Економічний ефект від впровадження розробок у промисловість полягає у зменшенні споживання природного газу на $(10,5-26,3) \text{ нм}^3$ на тону продукції.



a – швидкість; b – температура; v – молярна частка CO_2 ; $г$ – молярна частка H_2O ;

$д$ – молярна частка CO ; $е$ – молярна частка H_2 ; $ж$ – молярна частка CH_4

Рис. 16.5. Фізичні поля під час процесу газифікації пилової фракції вуглецевмісного наповнювача за граничних умов III роду, довжини ізотермічної зони барабана 11,5 м і співвідношення $\text{O}_2/\text{C} = 48,5 \%$

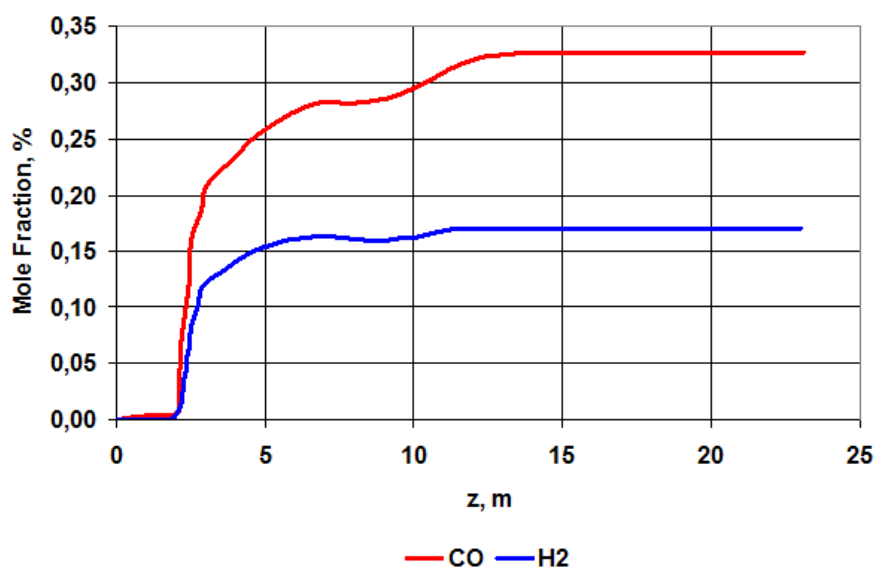


Рис. 16.6. Розподіл молярних часток основних горючих складових синтез-газу CO і H₂ по осі барабана-охолоджувача граничних умов III роду, довжини гарячої зони барабана 11,5 м і співвідношення O₂/C = 48,5 %

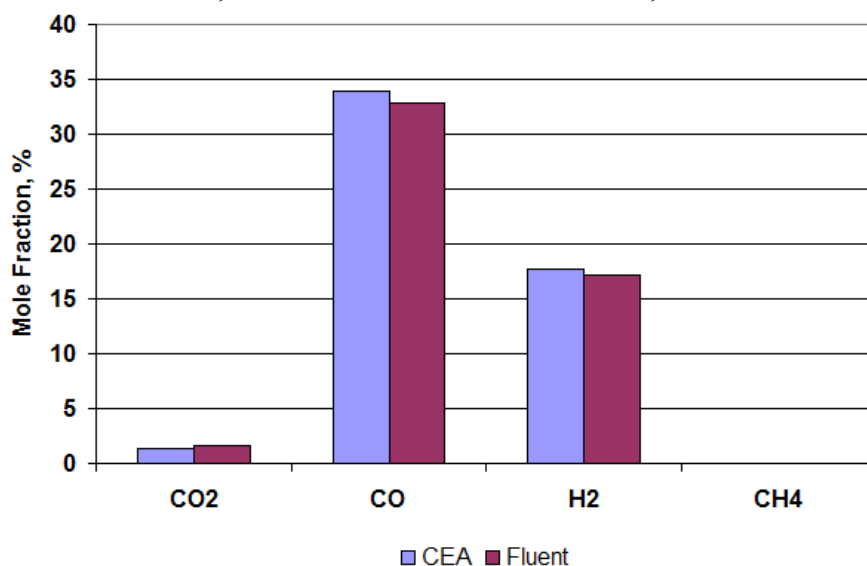


Рис. 16.7. Порівняння кількісного складу синтез-газу на виході з барабана-охолоджувача обертової печі за граничних умов III роду і довжини гарячої зони 11,5 м за співвідношення O₂/C = 48, 5 %, отриманого з використанням програмних продуктів Fluent і CEA

16.9 Об'єкти інтелектуальної власності та галузь застосування

Отримано 7 патентів України на корисну модель. Галузь застосування – електродна та металургійна промисловість.

16.10 Основні переваги інноваційної технології порівняно з існуючими технологіями

Порівняно з існуючими технологіями одержання синтетичного газу нова технологія часткового або повного заміщення природного газу на синтез-газ в обертових прожарювальних печах електродної промисловості має такі переваги:

- для одержання та спалювання синтетичного газу використовується наявне модернізоване обладнання, а не дороге спеціалізоване устаткування, яке застосовується в існуючих технологіях;
- за рахунок часткового або повного заміщення природного газу синтетичним газом можна зменшити витрату природного на (10,5–26,3) нм^3 на тону продукції;
- часткове заміщення синтез-газом природного зменшує собівартість вуглевмісного матеріалу – наповнювача вуглецево-графітової продукції, головним споживачем якої є чорна металургія.

Тема 3 Розробка інноваційних конструкцій та технологічних регламентів експлуатації печей Рідгамера для випалювання вуглеграфітових електродних виробів

Лекція 3.1(17) Інноваційні конструкції та технологічні регламенти експлуатації печей Рідгамера для випалювання вуглеграфітових електродних виробів

17.1 Етапи інноваційного процесу з модернізації печей Рідгамера

Етапи інноваційного процесу модернізації печей Рідгамера включають:

- аналіз сучасного стану ресурсоенергозбереження в технології випалювання вуглеграфітових електродних виробів, визначення потреби в інноваціях;
- теоретично-експериментальні дослідження наявного промислового обладнання багатокамерних печей Рідгамера. Верифікація розроблених числових моделей;
- аналіз проведених досліджень та розробка на їх підставі інноваційних конструкцій та технологічних регламентів експлуатації печей Рідгамера;
- впровадження розроблених інновацій.

17.2 Місце технології випалювання в технології виробництва вуглеграфітових електродних виробів, аналіз її сучасного стану та визначення потреби в інноваціях

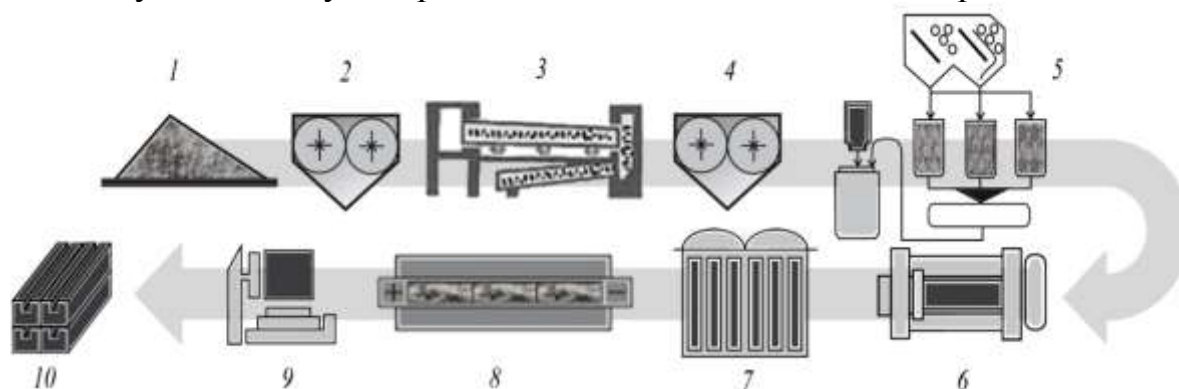
Розглянемо процес випалювання в технології виробництва електродних виробів. Згідно з технологічною схемою, наприклад, вироблення електродних виробів (ЕВ) (рис. 17.1) спочатку сирі вуглецеві матеріали (наповнювач) попередньо подрібнюють, а потім здійснюють їх термічну обробку за високих температур без доступу повітря в печах прожарювання.

Після охолодження прожарений матеріал подрібнюється, здійснюється його помел та наступне змішування зі сполучним. Шихта в змішувачах перемішується упродовж 1–5 год, її температуру підвищують до 125–150 °С. У процесі перемішування маси до неї додають хімічно активні речовини, які сприяють удосконаленню структури графіту.

Отримана вуглецева маса після попереднього охолодження пресується в так звані «зелені» заготовки, які потім випалюються в

спеціальних печах упродовж 20–40 діб. У разі виробництва вуглеграфітових ЕВ стадія випалювання є заключною.

Завершальною стадією технологічного процесу виробництва графітованих виробів є процес графітування, сутність якого полягає у високотемпературній обробці цих матеріалів за температури 2500–3000 °С у печах Ачесона або Кастнера. У процесі графітування цих виробів застосовуватися сипучі пересипкові та теплоізоляційні матеріали.



1 – сировина; 2 – подрібнення; 3 – прожарювання; 4 – подрібнення;
5 – приготування вуглецевої маси; 6 – пресування; 7 – випалювання;
8 – графітування; 9 – механічна обробка; 10 – складування готових виробів
Рис. 17.1. Технологічна схема виробництва вуглеграфітових електродних виробів

Графітовані вироби після їх охолодження, за необхідності, можуть додатково просочуватися різноманітними імпрегнатами та піддаватись нанесенню захисних покриттів.

По закінченню процесів термообробки графітовані вироби підлягають механічній обробці, перевірці якості та складуванню.

Технологія випалювання. Охолоджені після пресування електродні заготовки випалюють у спеціальних печах різних конструкцій. У цьому процесі в результаті термічної обробки виробів за температур 850–1300 °С органічне сполучне переходить у кокс і скріплює частинки наповнювача)⁴⁷.

Послідовність технологічних операцій випалювання для будь-яких типів печей є практично однаковою і складається із таких стадій: підготовки та завантаження печі, випалювання заготовок, охолодження і розвантаження печі.

Стадія підготовки полягає в очищенні печі і профілактичному ремонті конструкції. Завантаження печі розпочинається із засипання в об'єм касет камер печі шару засипки товщиною 100 ± 25 мм. Далі встановлюють заготовки паралельно між собою, відстань між ними регулюється залежно від їх розмірів та схеми завантаження. Проміжки між заготовками заповнюють засипкою на

⁴⁷ Теплообмен в многокамерных печах обжига углеграфитовых изделий: монография / И. В. Пулинец, Е. Н. Панов, А. Я. Карвацкий, С. В. Лелека, Т. В. Лазарев, Т. В. Чирка. К.: НТУУ «КПИ», 2014. 175 с. URL: https://cpsm.kpi.ua/nauka/knigi/Monograph_Burn_2014.pdf

100–150 мм вище торців заготовок. У подальшому камера печі закривається теплоізолювальним укриттям – склепінням печі.

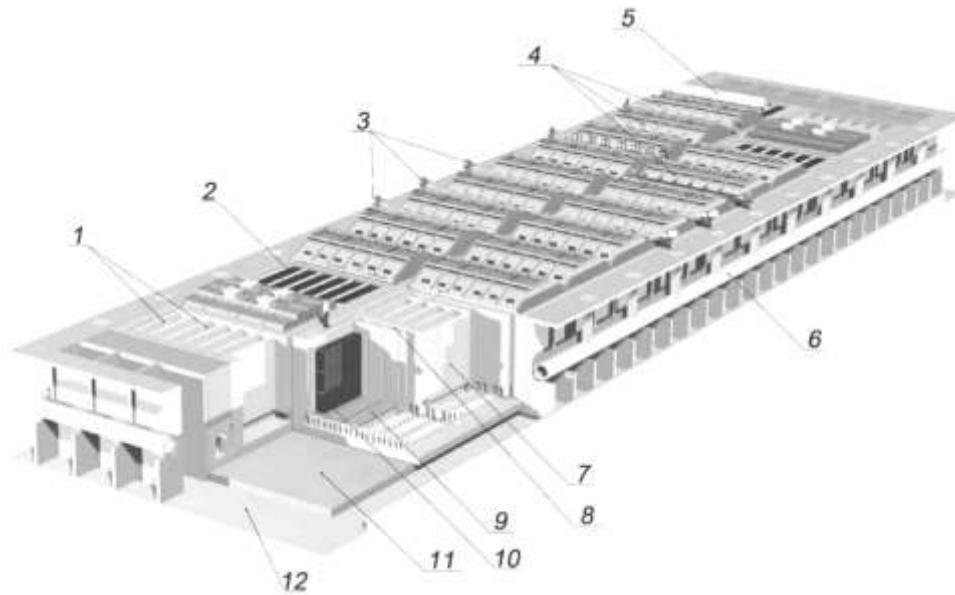
Безпосередньо процес випалу здійснюється за рахунок теплоти спалюваного природного газу. Тривалість випалу може складати 360–480 год. При цьому питомі витрати енергії (ПВЕ) становлять 3,9–4,5 ГДж/т.

За характером фізико-хімічних процесів нагрівання вуглеграфітових електродних заготовок під час випалювання поділяють на декілька етапів. На першому етапі нагрівання до 100–120 °С відбувається часткове розм'якшення пеку і послаблення пресових напружень, що супроводжується незначним збільшенням розмірів заготовок, переважно в поперечному перерізі. У процесі подальшого нагріву до температур 200–230 °С відбувається розширення заготовок, яке зумовлене термопластичними змінами сполучного. При цьому їх довжина досягає свого максимального значення.

Дослідження показують, що уповільнення швидкості нагрівання електродних заготовок на початку випалювання (приблизно до 250 °С у тілі заготовок) сприяє надмірному їх розширенню в перерізі і осіданні по довжині. У випадку підвищеної пластичності «зелених» заготовок це може призвести до значної їх деформації. Уповільнення швидкості нагрівання на початку випалу також сприяє втраті сполучного із заготовок за рахунок витіснення його частини на поверхню, що в свою чергу посилює прикоксовування пересипки на поверхні заготовок. Збільшення швидкості нагріву заготовок в інтервалі температур до 250 °С, навпаки, сприяє зменшенню розширення і, відповідно, їх деформації і імовірності прикоксовування пересипки.

Охолоджені після пресування електродні заготовки випалюють у спеціальних печах різних конструкцій. В цьому процесі в результаті термічної обробки виробів за температур 850–1300 °С органічне сполучне переходить у кокс і скріплює частинки наповнювача.

У вітчизняній практиці використовують, в основному, багатокамерні кільцеві закриті печі типу Рідгамера (рис. 17.2). Багатокамерна піч випалу складається з заглиблених у землю 28–32 камери, що розташовані в двох паралельних рядах. Камери знаходяться в безпосередній близькості одна від однієї й сполучені між собою по торцях каналами для послідовного переходу газів з однієї камери в іншу.



1 – камера з касетами; 2 – пересипка; 3 – рампи з пальниками; 4 – склепіння;
 5, 6 – обладнання для відводу і транспортування димових газів відповідно;
 7, 8 – торцеві і бічні муфельні канали відповідно; 9 – подина; 10 – заготовки;
 11 – цегляна кладка; 12 – бетон

Рис. 17.2. Конструкція печі Рідгамера для випалу вуглеграфітових виробів

Кожна з камер відокремлена від суміжних міжкамерними простінками. Муфельні простінки усередині камери утворюють декілька касет для розміщення виробів, що випалюються, пересипаних коксовою крихтою. Пересипка забезпечує відновне середовище в зоні випалювання заготовок, запобігаючи деформації продукції, що випалюється, під дією власної ваги на початку процесу, і зменшує непродуктивні тепловтрати в довкіллі.

Для визначення раціональних теплових режимів роботи випалювальних печей доцільно окремі експериментальні дослідження поєднувати з методами математичного моделювання, що дає змогу значно зменшити матеріальні витрати та скоротити термін розробок.

Однак, аналіз наведених в доступних літературних джерелах даних з математичного моделювання процесу випалу показує, що вони є неповними і недостатніми, щоб у повній мірі моделювати тепло-гідродинамічні процеси, які протікають під час випалювання вуглеграфітової продукції в багатокамерних печах.

У жодному з доступних літературних джерел не розглядається процес горіння природного газу під час випалювання електродних заготовок в цих печах. Тому поряд з експериментальними дослідженнями нагальним завданням є розробка методики математичного моделювання процесу горіння та виконання відповідних розрахунків тепло-гідродинамічних полів в багатокамерних печах випалу «зелених» заготовок.

До загальних невирішених проблем випалювання електродних заготовок можна віднести такі: діючі конструкції печей, схеми завантаження й технологічний регламент в якому не враховано динаміку газовиділення, можуть спричиняти значну нерівномірність температурного поля заготовок, самозапалення летючих тощо, що в результаті призводить до неоднорідності фізичних властивостей випалених заготовок і, відповідно, вихід бракованих виробів може становити до 15–20 %. Звідки і впливає потреба в інноваціях стосовно технології випалювання вуглеграфітових електродних виробів в багатокамерних печах Рідгамера.

На підставі аналізу сучасного стану технології випалювання вуглеграфітових електродних виробів в печах Рідгамера обґрунтовано потребу в інноваціях та визначено такі їх напрямки:

- виконати експериментальні дослідження кампаній випалювання вуглеграфітової продукції у печах типу Рідгамера з різними конструкціями й технологічними регламентами;
- теоретично дослідити вплив зміни теплофізичних властивостей нагрівальних газів й матеріалів печі, параметрів технологічного регламенту, схем завантаження, конструкції камери печі на процес випалу електродної продукції в багатокамерних печах випалу;
- розробити експериментально-розрахункову методику прогнозування технологічних параметрів переділу випалу «зелених» заготовок залежно від графіка зміни температури димових газів під склепінням печі і спеціалізоване програмне забезпечення для модернізації температурних регламентів з урахуванням динаміки газовиділення зв'язувального;
- розробити науково-обґрунтовані (з урахуванням динаміки газовиділення сполучного) технологічні регламенти випалу вуглеграфітової продукції в багатокамерних печах, які забезпечують ресурсо-енергоефективність, зменшення виходу бракованих виробів та техногенного впливу на оточуюче середовище.

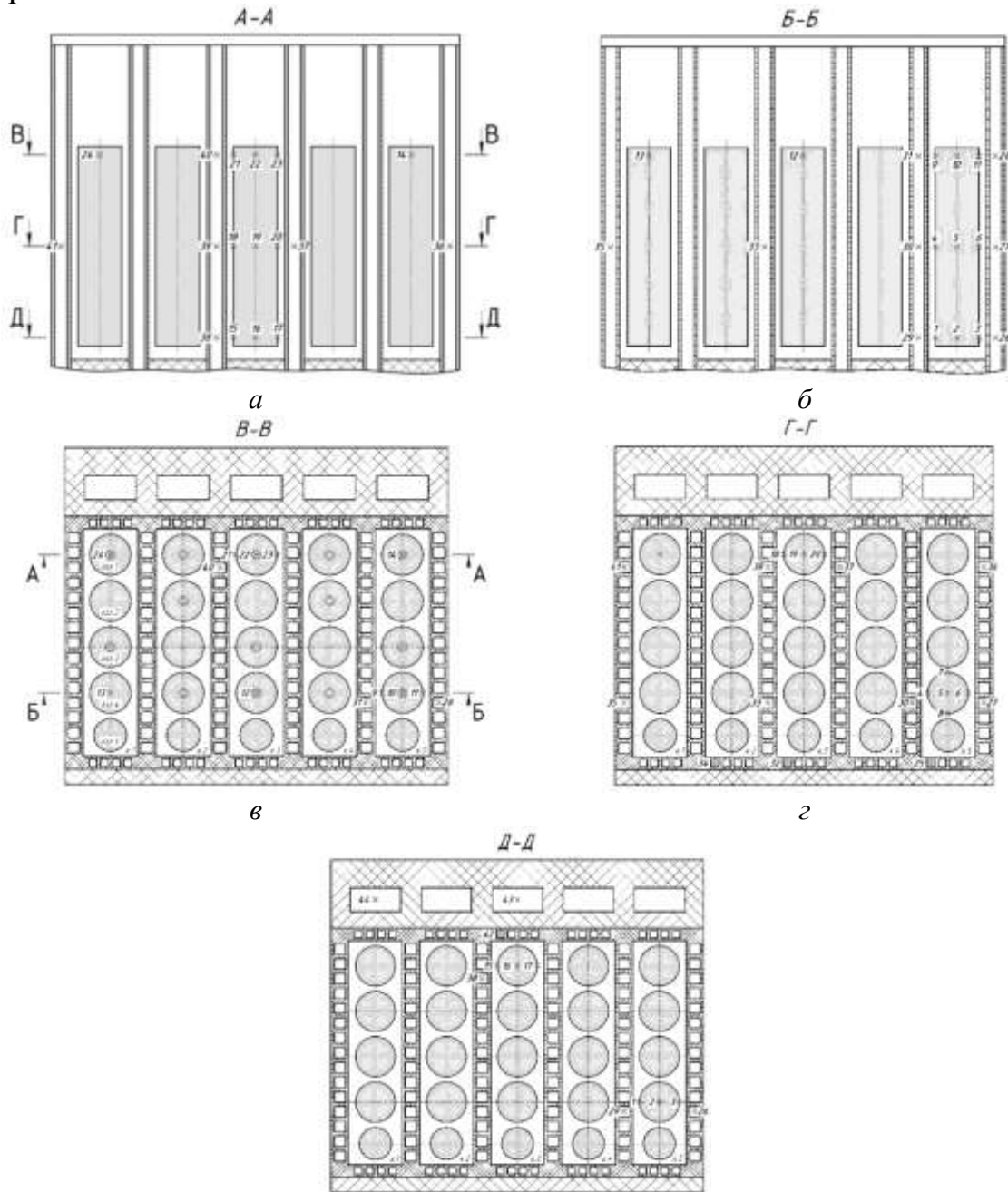
17.3 Теоретично-експериментальні дослідження наявного промислового обладнання багатокамерних печей Рідгамера

Завдання експериментальних досліджень процесу випалювання «зелених» заготовок у багатокамерних печах Рідгамера полягали у визначенні:

- рівня температур у заготовках та газових каналах протягом всього процесу;
- швидкості росту мінімальної, максимальної й середньої об'ємної температур у заготовках;

- перепаду температур у заготовках і по камері печі в цілому;
- зіставлення рівня температур під склепінням печі з температурами, що досягаються в пересипці й заготовках;
- проведенні аналізу теплового стану процесу випалу в цілому.

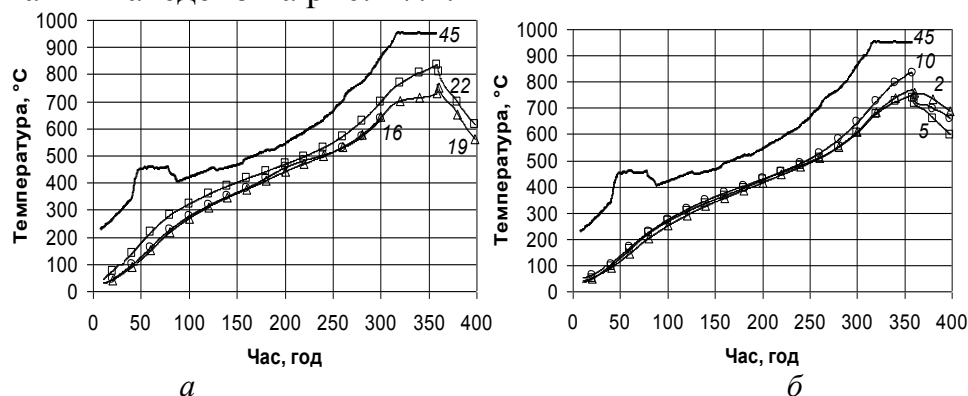
Схему встановлення термопар в одній з камер печі Рідгамера наведено на рис. 17.3.



а, б – по висоті камери печі; *в, г, д* – на відстані 100 мм від верхніх та нижніх торців заготовок і їх середині, відповідно

Рис. 17.3. Схема встановлення термопар в одній з камер печі під час її експериментальної кампанії

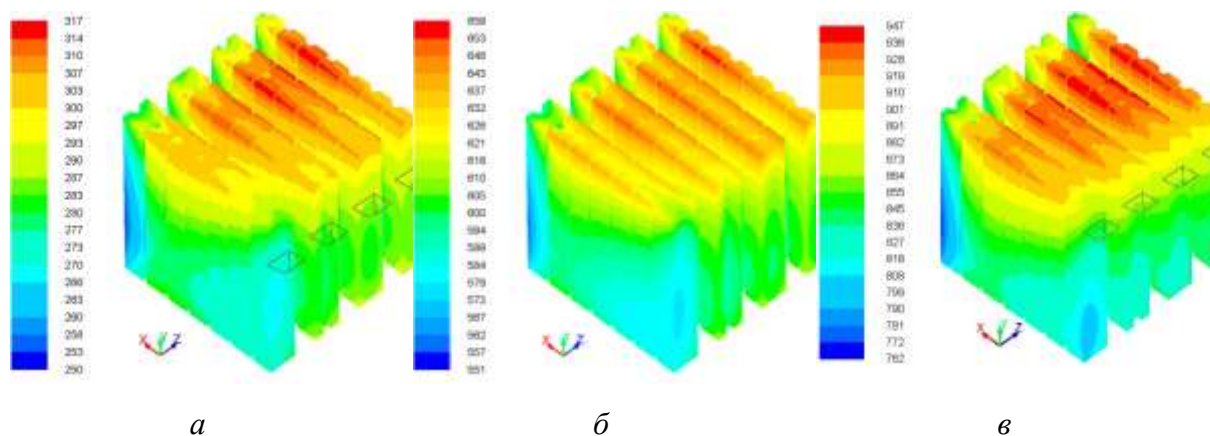
Результати характерних експериментальних досліджень кампанії печі випалювання наведено на рис. 17.4.



а, б – 3 заготовка 1 ряду й 5 заготовка 4 ряду, відповідно; 2, 5, 10, 16, 19, 22 – точки вимірювання температури (див. рис. 17.3); 45 – температура під склепінням печі (штатна термопара)

Рис. 17.4. Зміна температури заготовок і під склепінням камери печі під час експериментальної кампанії

На базі сформульованої математичної моделі ((12.1), див. Лекцію №12) з використання одноступінчастої реакції згоряння метану розроблено числову модель нестационарного тепло-гідродинамічного стану печі Рідгамера під час випалювання електродних заготовок, результати моделювання якої наведено на рис. 17.5.



а – 120 год; *б* – 240 год; *в* – 360 год

Рис. 17.5. Зміна температурних полів завантаження камери катодними блоками під час їх випалювання в печі Рідгамера

Результати верифікації розробленої числової моделі теплового стану багатокамерних печей за даними натурних експериментів показали, що похибка числових розв'язків не перевищує 6–15 % (в абсолютному значенні максимальна різниця між даними розрахунків становить 20–85 °C), що є підтвердженням її адекватності і дає підставу застосування для числового

аналізу впливу зміни параметрів процесу на тепло-гідродинамічний стан печей випалювання та розробки модернізованих регламентів випалу електродів.

17.4 Аналіз проведених досліджень та розробка на їх підставі інноваційних конструкцій та технологічних регламентів експлуатації печей Рідгамера

Комбінована пересипка. З метою зменшення перепаду температур по висоті заготовок використовують багатошарову пересипку, яка містить шамотну цеглу й тирсу.

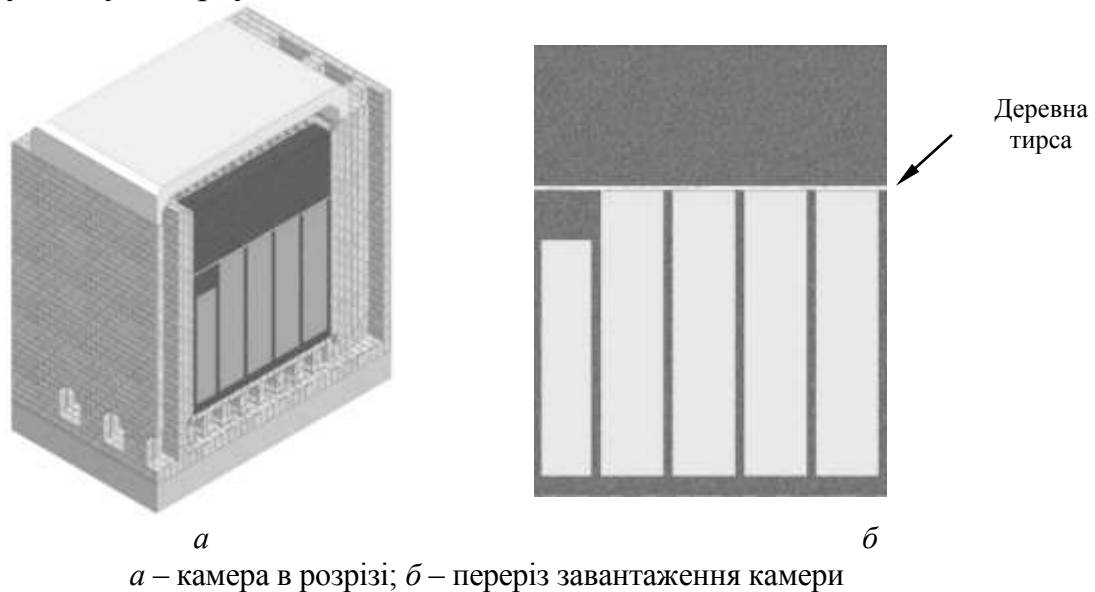
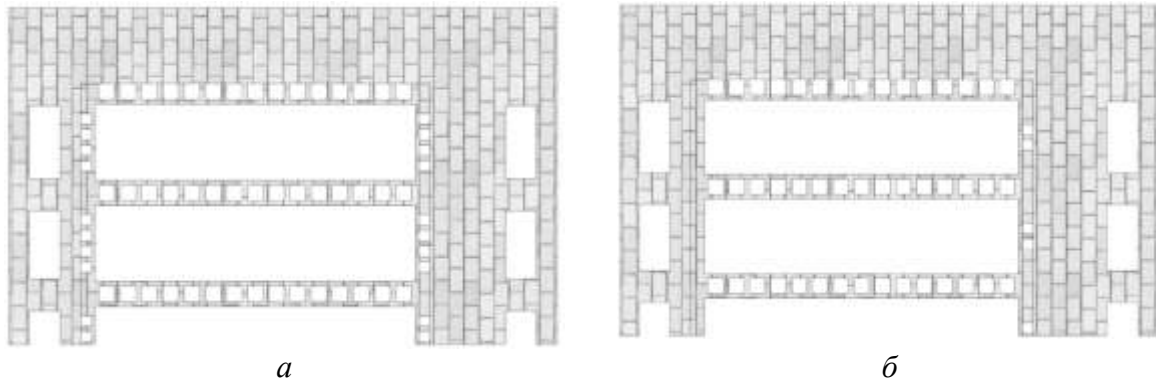


Рис. 17.6. Схема завантаження заготовок у камеру печі з використанням шару тирси

Аналіз отриманих температурних даних за розробленою схемою завантаження (див. рис. 17.6) показав, що досліджена схема завантаження з використанням теплоізоляційного шару тирси в моделі камери печі дає змогу зменшити перепад температури в заготовках $\varnothing 610$ мм на 11,5 % (від 110 К до 97,5 К), при цьому мінімальна температура заготовок майже не змінилася, а максимальна зменшилась на 1,1 % (від 1155 К до 1143 К).

Часткове перекриття газових каналів. Аналіз динаміки нагрівання заготовок у камері дослідженої печі показав, що висока температура торцевих заготовок у касетах пов'язана з наявністю вогневих й торцевих газових каналів. З метою зменшення перепаду температур у заготовках було розглянуто конструкцію камери печі з усіма перекритими торцевими каналами зі сторони вогневих колодязів і двома – з протилежної сторони (рис. 17.7).



а – базова конструкція; *б* – конструкція з частково перекритими торцевими муфельними каналами

Рис. 17.7. Конструкція камери дослідженої печі

Аналіз отриманих температурних даних за часткового перекриття газових каналів (див. рис. 17.7) показав:

- нерівномірність температури в заготовках на кінець процесу випалювання знизилась на 19,8 % (від 144 К до 115 К);
- мінімальна температура заготовок $\varnothing$ 610 мм залишилася незмінною, а максимальна – знизилася на 2,5% (від 1188,5 К до 1159 К).

Прогнозування технологічних параметрів випалювання. Особливо важливими даними під час розробки раціональних регламентів випалу «зелених» заготовок є дані з прогнозу температур заготовок залежно від наперед заданого графіка часової зміни температури димових газів під склепінням, завантаження камери, швидкості вигорання пересипки й заготовок. Ці дані можливо отримати за результатами математичного моделювання процесу випалу ((12.1), див. Лекцію №12) за допомогою розроблених числових моделей. Однак такий шлях є достатньо складним для використання в умовах промислових підприємств. Тому значний практичний інтерес представляє розробка спрощеної методики, яка ґрунтується на даних натурного й числового експериментів, що виконуються одноразово для конкретної конструкції печі випалювання. Саме тому була розроблена відповідна методика, що базується на рівняннях результуючого теплового балансу між нагрівальними димовими газами й завантаженням печі (пересипкою й заготовками) для однієї камери багатокамерної печі за весь період випалу:

$$\left\{ \begin{aligned} \sum_{k=2}^M \bar{\alpha}_{\text{эф.газ-зав}} \left(\bar{T}_{\text{газ-склеп}} - \frac{\bar{m}_{\text{пер}} \bar{T}_{\text{пер}} + \bar{m}_{\text{заг}} \bar{T}_{\text{заг}}}{\bar{m}_{\text{пер}} + \bar{m}_{\text{заг}}} \right) S_{\text{газ-зав}} (t_k - t_{k-1}) = \\ = \sum_{k=2}^M [\bar{m}_{\text{пер}} \bar{c}_{\text{пер}} (T_{\text{пер}}^k - T_{\text{пер}}^{k-1}) + \bar{m}_{\text{заг}} \bar{c}_{\text{заг}} (T_{\text{заг}}^k - T_{\text{заг}}^{k-1})] \\ \sum_{k=2}^M \frac{(\bar{T}_{\text{пер}} - \bar{T}_{\text{заг}}) S_{\text{заг}}}{\bar{r}_{\text{пер-заг}}} (t_k - t_{k-1}) = \sum_{k=2}^M \bar{m}_{\text{заг}} \bar{c}_{\text{заг}} (T_{\text{заг}}^k - T_{\text{заг}}^{k-1}) \end{aligned} \right. \quad (17.1)$$

де k – номер кроку інтегрування за часом; M – число часових кроків; $\bar{\alpha}_{\text{эф.газ-зав}}$ – середній на часовому інтервалі $(t_k - t_{k-1})$ коефіцієнт тепловіддачі між газом й завантаженням печі, Вт/(м²·К); K – коефіцієнт форми камери; $\bar{T}$ – середня температура димових газів, пересипки й заготовок, К; $S_{\text{газ-зав}}$ – площа теплообміну між димовими газами й завантаженням печі, м²; t – час, с; $\bar{m}$ – середня маса завантаження, кг; $\bar{c}$ – середня масова ізобарна теплоємність завантаження, Дж/(кг·К); $\bar{r}_{\text{пер-заг}}$ – контактний термічний опір між пересипкою й заготовками, (К·м²)/Вт; $S_{\text{заг}}$ – поверхня заготовок, м².

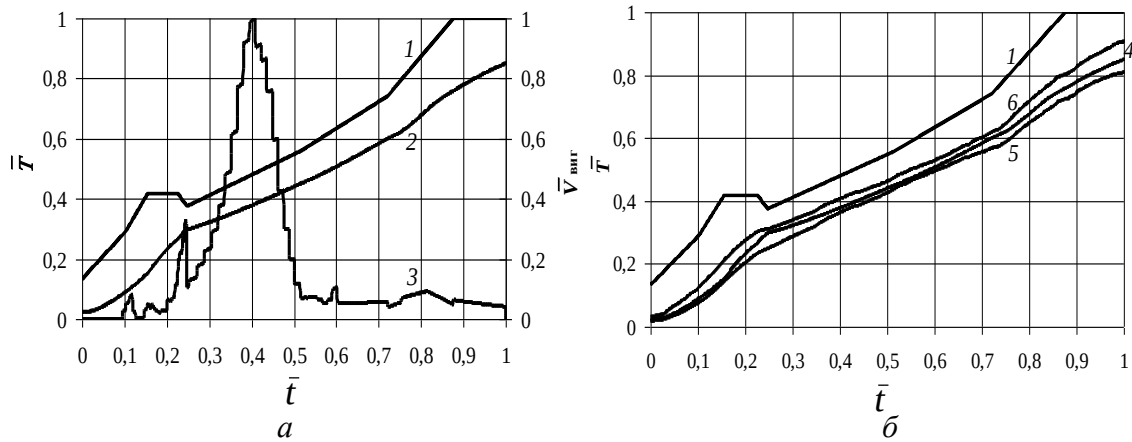
$$\begin{aligned} \bar{\alpha}_{\text{эф.газ-зав}} &= K(\alpha_{\text{эф.газ-зав}}^k + \alpha_{\text{эф.газ-зав}}^{k-1})/2; \\ \bar{T} &= (T^k + T^{k-1})/2; \\ \bar{m} &= [m(t^k) + m(t^{k-1})]/2; \\ \bar{c} &= [c(T^k) + c(T^{k-1})]/2; \\ \bar{r}_{\text{пер-заг}} &= [r_{\text{пер-заг}}^k + r_{\text{пер-заг}}^{k-1}]/2. \end{aligned}$$

Із розв'язку системи рівнянь (17.1) розмірністю $2(M-1)^2$ визначаються температури заготовок й пересипки на поточний момент часу випалу. Коефіцієнти $\bar{\alpha}_{\text{эф.газ-зав}}$ й $\bar{r}_{\text{пер-заг}}$ визначаються за даними натурного й числового експериментів. Причому $\bar{\alpha}_{\text{эф.газ-зав}}$ є характеристикою конструкційних особливостей камери печі, а $\bar{r}_{\text{пер-заг}}$ – завантаження камери печі.

Запропонована методика, яка реалізована у відповідному програмному забезпеченні, дає змогу прогнозувати такі технологічні параметри камери багатокамерної печі:

- режим випалу за заданою функціональною залежністю температури димових газів під склепінням $\bar{T}_{\text{газ-склеп}} = f_T(t)$;
- раціональне завантаження камери за заданими масою пересипки й заготовок, поверхні контакту між ними;
- вигар заготовок й пересипки за заданими функціональними залежностями втрати їх маси $\Delta m = f_m(t)$.

Приклад прогнозу технологічних параметрів переділу випалу «зелених» заготовок з використання розробленої методики показано на рис. 17.8.



a – за загального завантаження (пересипка й заготовки); *б* – за заготовками;

1 – $\bar{T}_{\text{газ-склеп}}$; 2 – $\bar{T}_{\text{зав}}$; 3 – $\bar{V}_{\text{виг}}$; 4 – $\bar{T}_{\text{заг-mid}}$; 5 – $\bar{T}_{\text{заг-min}}$; 6 – $\bar{T}_{\text{заг-max}}$

Рис. 17.8. Результати прогнозу режимних параметрів випалу заготовок у багатоканальній печі

Розроблена комплексна розрахунково-експериментальна методика захищена патентом України на корисну модель № 69350, впроваджена у виробництво й використовується для розробок раціональних режимів експлуатації пічного випалювального обладнання й оцінки ефективності технічних рішень з енергозбереження в електродному виробництві.

17.5 Впровадження розроблених інновацій

Розроблені інноваційні технічні рішення із завантаження печі Рідгамера та комплексна розрахунково-експериментальна методика для визначення раціонального регламенту випалювання «зелених» електродних заготовок (з урахуванням динаміки газовиділення зв'язувального) впроваджено на ПрАТ «Укрграфіт» (м. Запоріжжя, Україна). У результаті експериментальної перевірки впроваджених інновацій встановлено, що розроблені технічні рішення підвищують ресурсо-енергоефективність процесу випалювання електродних заготовок у печах Рідгамера, забезпечують зменшення виходу бракованих виробів на 7–10 % та техногенного впливу на оточуюче середовище.

Тема 4 Розробка інноваційного обладнання та технологічних регламентів експлуатації печей Кастнера для графітування електродних виробів

Лекція 4.1(18) Інноваційне обладнання та технологічні регламенти експлуатації печей Кастнера для графітування електродних виробів

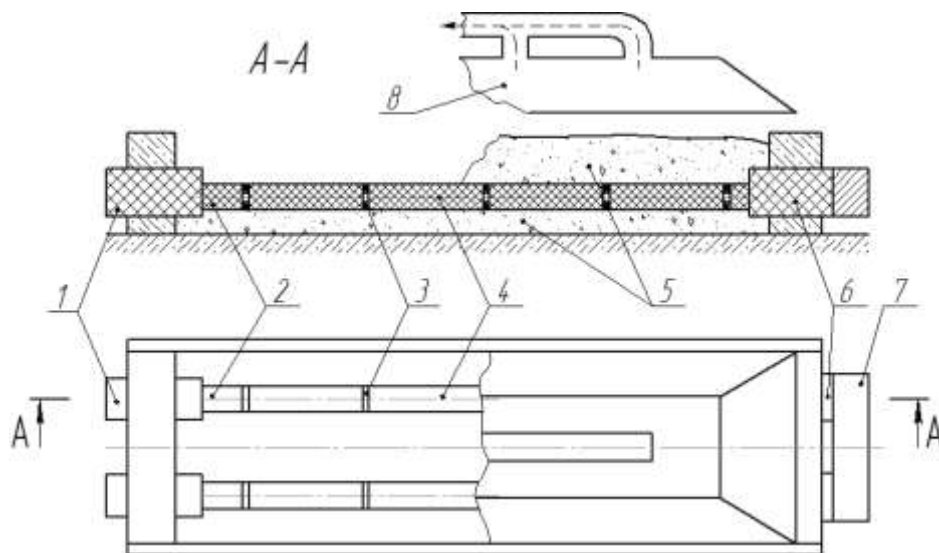
У цій лекції також буде представлена інноваційна розробка у формі завершеної НДКР.

18.1 Мета, за ради якої модернізовано технологію

полягає у зменшенні питомої витрати електроенергії, тривалості кампаній та простоїв між кампаніями печей Кастнера в технології графітування електродних виробів.

18.2 Основна суть розробленої (модернізованої) технології

полягає у використанні енергоефективних високотехнологічних технічних рішень з модернізації способу формування колон керна та інтенсифікованих регламентів підводу електричної потужності печей Кастнера (рис. 18.1), що забезпечують зменшення питомої витрати електроенергії, тривалості кампаній та простоїв між кампаніями печей, тобто сприяють підвищенню продуктивності обладнання.



1 – рухомі струмопідводи; 2 – компенсаційні вставки; 3 – кільцеві резистивні прокладки; 4 – електродні заготовки; 5 – теплоізоляційна шихта; 6 – нерухомі струмопідводи; 7 – електрична перемичка; 8 – укриття для відведення газів

Рис. 18.1. Схема печі графітування Кастнера

18.3 Анотований зміст інноваційної розробки

Виготовлення електроконтактних прокладок (ЕКП) з терморозширеного графіту певної густини, форми та товщини для заданого діаметру електродних заготовок з використанням спеціально розроблених пресформ. Формування колон електродних заготовок за межами печі Кастнера з фіксацією ЕКП між торцями заготовок за допомогою декстринового або алюмосилікатного клею з додаванням графітового порошку. Переміщення сформованої частини колони електродних заготовок у робочий простір печі Кастнера за допомогою спеціального пристрою (механізованої траверси для транспортування колон заготовок). Після закінчення формування керна піч Кастнера підключається до мережі електроживлення постійного струму і розпочинається процес графітування за спеціально розробленим інтенсифікованим регламентом підводу електричної потужності, який залежить від марки продукції, що графітується. Після закінчення цього процесу піч охолоджується і далі розвантажується з використанням зазначеної механізованої траверси.

18.4 Проблеми, які інноваційна технологія дає змогу вирішувати

- 1) зменшення питомої витрати електроенергії;
- 2) тривалість простоїв між кампаніями печей, тобто підвищення продуктивності;
- 3) зменшення виходу бракованої продукції.

18.5 Ознаки новизни інноваційної технології

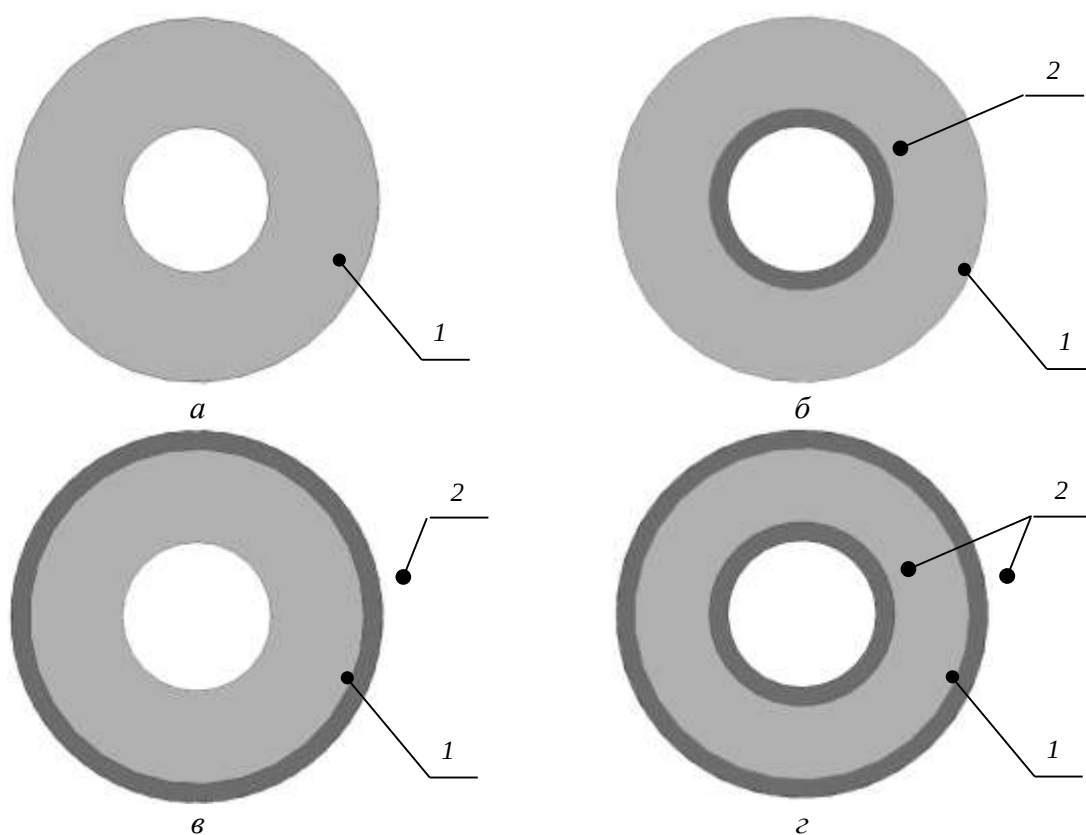
полягають у інноваційних розробках, що забезпечують зменшення питомої витрати електроенергії і виходу бракованої продукції та підвищення продуктивності виробництва, порівняно з існуючою технологією.

18.6 Складові інноваційної технології

полягають у таких розробках:

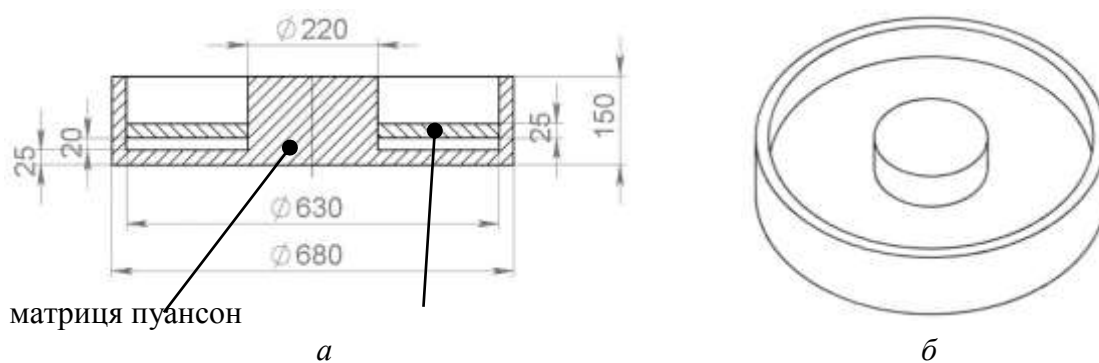
- 1) спосіб виготовлення електроконтактних з'єднань та їх фіксації між електродними заготовками, що забезпечують високу рівномірність теплоелектричних полів у колонах керна (рис. 18.2–18.5);
- 2) спосіб формування колон керна, що складаються з електродних заготовок та електроконтактних з'єднань між ними, за межами печей Кастнера, що дає змогу значно скоротити термін простоїв печей між кампаніями (рис. 18.6–18.7);
- 3) інтенсифіковані енергоефективні регламенти введення електричної потужності в піч Кастнера, що забезпечують мінімізацію питомої витрати електроенергії. Інтенсифіковані регламенти були розроблені з

використанням числової моделі теплоелектричного стану печі, побудованої на основі математичної постановки (6.1)–(6.7) (див. Лекцію 6) (рис. 18.8–18.11).



1 – спресований порошок – подрібнені відходи графітової фольги; 2 – графітова фольга;
а – однорідна прокладка; б, в, г – комбіновані прокладки

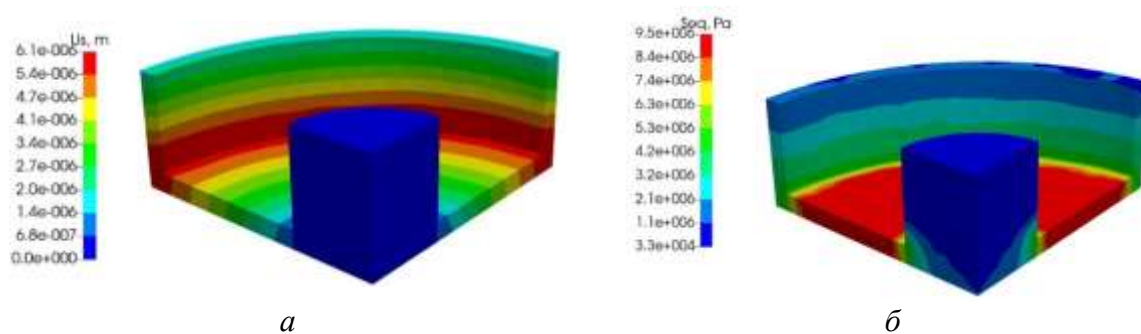
Рис. 18.2. Види електроконтактних прокладок



матриця пуансон

а – ескіз; б – тривимірний вигляд; матеріал пресформи – сталь Ст3

Рис. 18.3. Ескіз пресформи для пресування електроконтактних прокладок $\varnothing 220/\varnothing 630$ мм завтовшки 20 мм для електродних заготовок $\varnothing 630 \times 2815$ мм



a – поле результуючих переміщень; *б* – поле еквівалентного напруження за Мізесом; запас міцності понад 15

Рис. 18.4. Результати розрахунків НДС матриці пресформи в разі пресування електроконтактних прокладок густиною 1000 кг/м³



Рис. 18.5. Етапи монтажу електроконтактної прокладки $\varnothing 220/\varnothing 630$ мм товщиною 20 мм на торцевій поверхні електродної заготовки $\varnothing 630 \times 2815$ мм

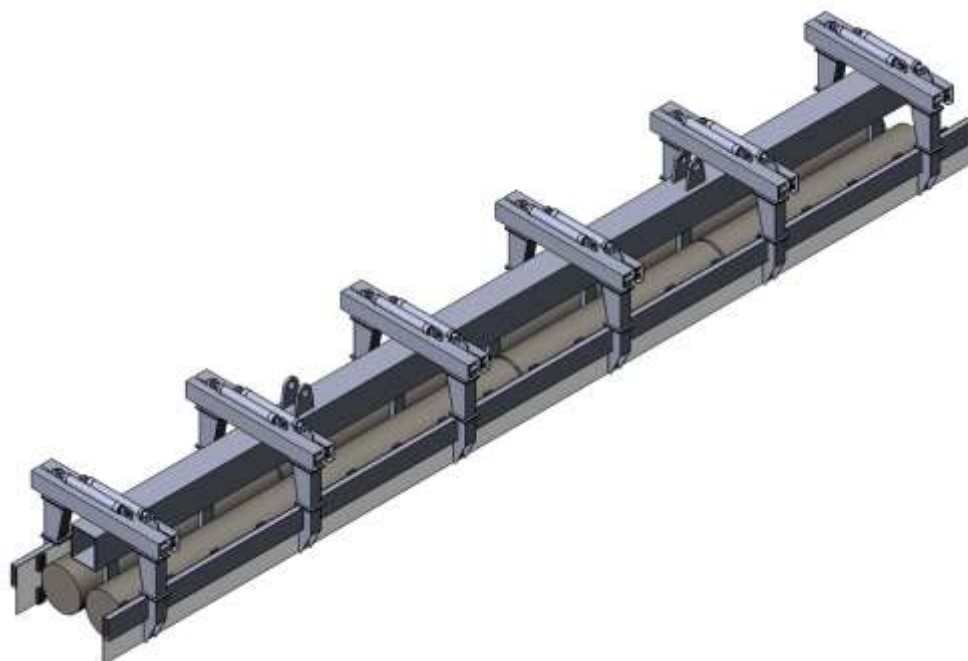
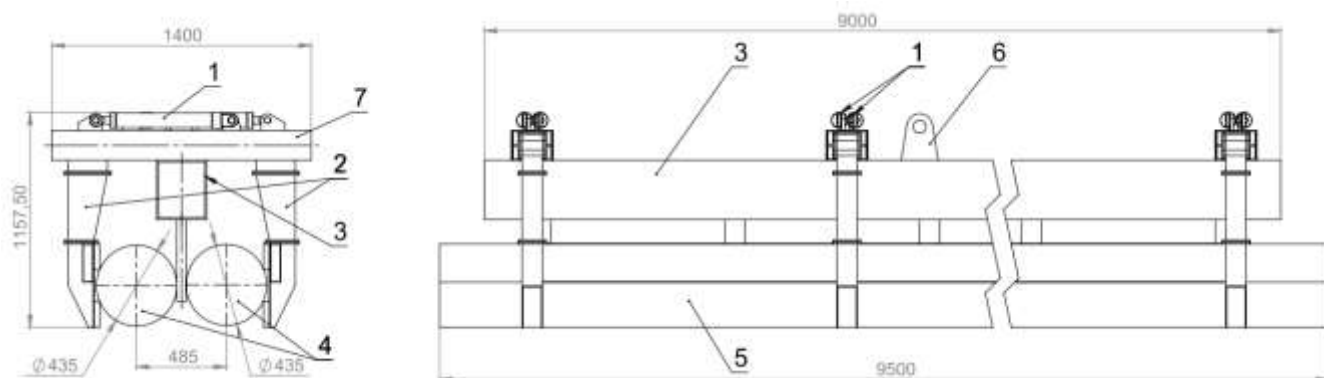
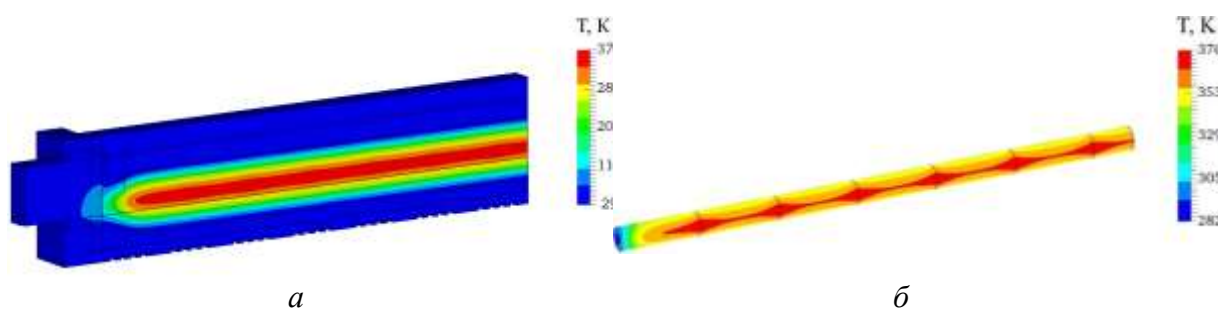


Рис. 18.6. Твердотільна модель механізованої траверси для транспортування колон заготовок з місця формування за межами печі в піч прямоточного графітування Кастнера



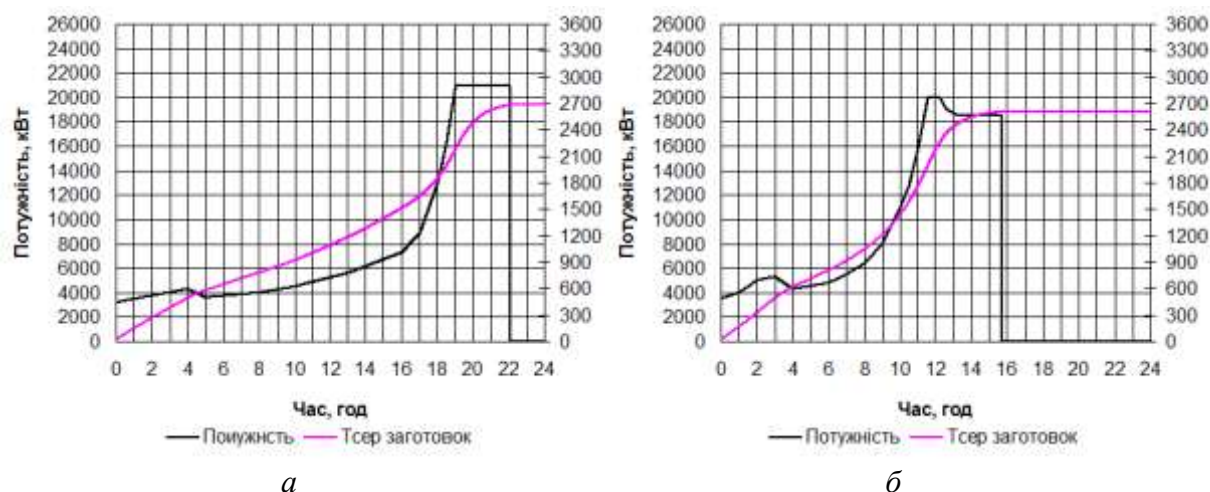
1 – пневмоциліндр (12 шт.); 2 – важіль (12 шт.); 3 – несуча балка; 4 – електродні заготовки (8 шт); 5 – щока (2 шт.); 6 – такелажне вушко (4 шт.); 7 – поперечна траверса (12 шт.)

Рис. 18.7. Ескізний проект механізованої траверси для транспортування колон заготовок з місця формування за межами печі в піч прямоочного графітування Кастнера



a – повздовжній переріз печі; *б* – колона електродних заготовок

Рис. 18.8. Температурні поля в ППН на 12 год кампанії графітування



a – без ЕКП; *б* – з ЕКП

Рис. 18.9. Регламент зміни електричної потужності і графік часової залежності середньої температури ядра печі Кастнера під час кампанії графітування заготовок ЕГСП Ø600 мм без та з використанням ЕКП

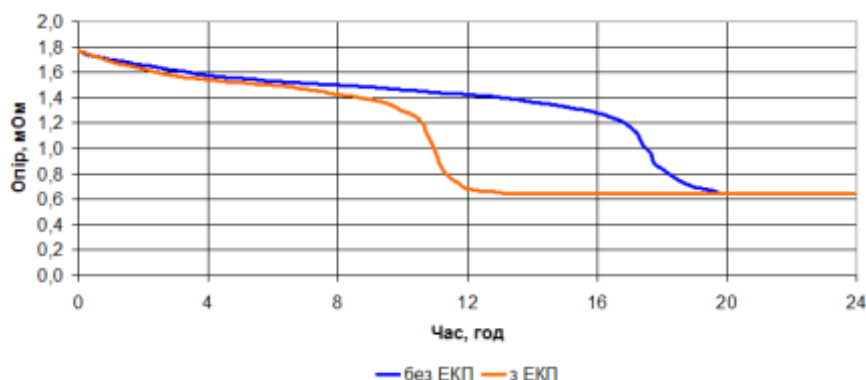


Рис. 18.10. Графіки часових залежностей електричного опору керу печі Кастнера під час кампанії графітування заготовок ЕГСП Ø600 мм без та з використанням ЕКП

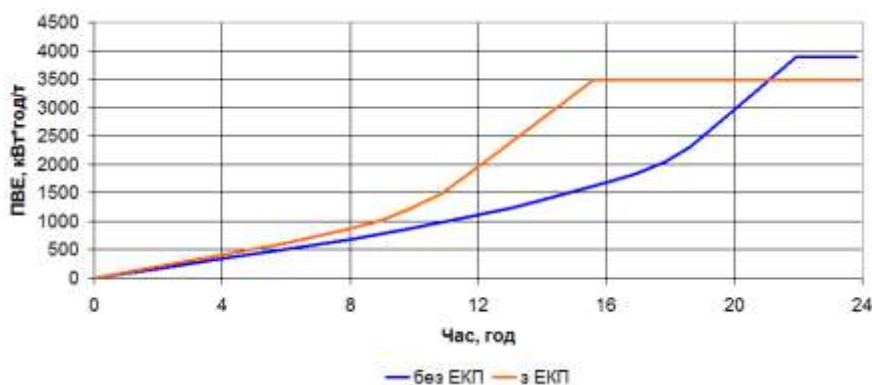


Рис. 18.11. Графіки часових залежностей ПВЕ печі Кастнера під час кампанії графітування заготовок ЕГСП Ø600 мм без та з використанням ЕКП

18.7 Технічні характеристики інноваційної технології

Експериментальна перевірка розроблених технічних рішень з промислового випробування регламентів графітування електродних заготовок у печах Кастнера з використанням ЕКП показала їхню високу енергоефективність:

- розроблені регламенти дають можливість зменшити питому витрату електроенергії процесу графітування на (190–390) кВт*год/т порівняно з регламентами без використання ЕКП;
- тривалість регламенту графітування електродних заготовок в печі Кастнера зменшилась більш ніж на 6 год порівняно з регламентом без використання ЕКП;
- тривалість простоїв між кампаніями печі зменшилась на (8–12) год;
- вихід бракованої продукції зменшився на (5–7) % порівняно з регламентами без використання ЕКП;
- відхилення між прогнозованими електричними параметрами розроблених регламентів від отриманих даних їхньої експериментальної перевірки лежить у межах (3–16) %.

18.8 Техніко-економічний ефект від впровадження інноваційної технології

Чинниками для створення економічного ефекту від впровадження технології є такими:

- зменшення питомої витрати електроенергії;
- зменшення тривалості кампанії печей Кастнера та простоїв між ними (тобто підвищення продуктивності печей);
- зменшення виходу бракованих виробів.

Економічний ефект від впровадження розробок у промисловість тільки за рахунок зменшення ПВЕ становить 0,113 тис. грн на тону продукції.

18.9 Об'єкти інтелектуальної власності та галузь застосування

Отримано 9 патентів України на корисну модель. Галузь застосування –електродна та металургійна промисловість.

18.10 Основні переваги інноваційної технології порівняно з існуючими технологіями

Порівняно з існуючою технологією графітування електродної продукції у печах Кастнера модернізована технологія має такі переваги:

- питома витрата електроенергії зменшується на (190–390) кВт·год/т;
- тривалість процесу зменшується більш ніж на 6 год;
- вихід бракованої продукції зменшується на (5–7) %;
- тривалість простоїв між кампаніями печі зменшується на (8-12) год;
- підвищується енергоефективність печей за рахунок часткової рекуперації теплоти попередньої кампанії.

СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Тугай О.А., Власенко Т.В. Загальні основи інжинірингової діяльності та її сучасний стан в Україні. // Нові технології в будівництві. № 34. 2018. http://ntinbuilding.ndibv.org.ua/archive/2018/34_2018/5.pdf
2. Єсилевський С. Лип. 24, 2017. Про науку, інновації та велику різницю між ними. <https://innovationhouse.org.ua/columns/o-nauke-ynnovatsyyah-y-bolshoj-raznytse-mezhdu-nymy-2/>
3. Кондратюк А.А. Розвиток міжнародного інжинірингу: світові тенденції та вітчизняні реалії / А.А. Кондратюк, І.М. Манаєнко. // Збірник наукових праць молодих учених ФММ НТУУ "КПІ ім. Ігоря Сікорського". – 2017. – № 11.
4. Кузьмін О.Є. Іноземний досвід інжинірингової діяльності / О.Є. Кузьмін, В.Й., Жежуха, Н.А. Городиська // Проблеми економіки. – 2014. – №3. – С. 240 – 245.
5. Вимоги Matchtech Engineering Recruitment Specialists до фахівця. <https://www.matchtech.com/job/EMP404273/innovation-engineer--product-development-havant-england>
6. Метод скінченних елементів у задачах механіки суцільних середовищ. Лабораторний практикум з навчальної дисципліни [Електронний ресурс]: навч. посіб. для студ. спеціальностей 131 «Прикладна механіка», 133 «Галузеве машинобудування», спеціалізації «Інжиніринг, комп'ютерне моделювання та проектування обладнання пакування», «Інжиніринг, комп'ютерне моделювання та проектування обладнання виробництв полімерних і будівельних матеріалів і виробів» / А. Я. Карвацький. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. 391 с. URL : <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/23916>
7. Інжиніринг пакувального обладнання. Конспект лекцій з навчальної дисципліни : навч. посіб. для студ. спеціальності 131 «Прикладна механіка», спеціалізації «Інжиніринг, комп'ютерне моделювання та проектування обладнання пакування» / А. Я. Карвацький. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. 142 с. URL : <http://ela.kpi.ua/handle/123456789/23915>
8. Ikhlaq Sidhu. Innovation Engineering: Principles and Methodology. May 22, 2019. <https://scet.berkeley.edu/innovation-engineering-principles-and-methodology/>
9. Technological innovations and practices in engineering education: a review. Marcela Hernandez-de-Menendez & Ruben Morales-Menendez . International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM), volume 13, pages713–728(2019).

10. Моделювання статичної і динамічної поведінки матеріалів у LIGGGHTS [Електронний ресурс] : навч. посіб. для здобувачів ступеня магістра за спеціальностями 131 Прикладна механіка, 133 Галузеве машинобудування / А. Я. Карвацький, І. О. Мікульонюк, В. М. Витвицький ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл: 4,16 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – 76 с. <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/45613>
11. SolidWorks. Training. Dassault Systems SolidWorks Corporation, a Dassault Systems S.A. company, 300 Baker Avenue, Concord, Massachusetts 01742 USA, 2010. 333 с.
12. Dassault Systems SolidWorks Corporation, a Dassault Systems S.A. company, 300 Baker Avenue, Concord, Massachusetts 01742 USA, 1995–2009, 534 р.
13. Autodesk Inventor. URL : <http://www.autodesk.ru/products/autodesk-inventor-family/overview>.
14. LIGGGHTS Open Source Discrete Element Method Particle Simulation Code. URL: <https://www.cfdem.com/>
15. ParaView. An open-source, multi-platform data analysis and visualization application. URL: <https://www.paraview.org/>
16. ANSYS Engineering Simulation & 3D Design Software ANSYS. URL : <https://www.ansys.com/>
17. Panov, E., Lazarev, T., Karvatskii, A., Leleka, S., Mikulionok, I., Derkach, V., & Tiutiunnik, P. (2019). The current state of resource and energy saving in the technology of production of carbon-based filler of electrode products (review). Energy Technologies & Resource Saving, (1), 17-34. <https://doi.org/10.33070/etars.1.2019.02>
18. Leleka, S., Karvatskii, A., Mikulionok, I., Vytvytskyi, V., Glukhov, O., Bondarenko, O., & Pavelko, O. (2020). Improving the energy efficiency of a rotary kiln for calcining carbon-containing raw materials. Energy Technologies & Resource Saving, (2), 63-72. <https://doi.org/10.33070/etars.2.2020.08>
19. Determination of parameters of the carbon-containing materials gasification process in the rotary kiln cooler drum / A. Karvatskii, T. Lazarev, S. Leleka, I. Mikulionok, O. Ivanenko // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2020. Vol. 106. No 4/8. P. 65–76. DOI: 10.15587/1729-4061.2020.210767 <http://journals.uran.ua/eejet/article/view/210767/210939>
20. Теплообмен в многокамерных печах обжига углеграфитовых изделий: монографія / И. В. Пулинец, Е. Н. Панов, А. Я. Карвацкий, С. В. Лелека, Т. В. Лазарев, Т. В. Чирка. К.: НТУУ «КПИ», 2014. 175 с. URL: https://cpsm.kpi.ua/nauka/knigi/Monograph_Burn_2014.pdf

21. Теоретично-експериментальні дослідження печей графітування Кастнера: монографія / А. Ю. Педченко, Є. М. Панов, А. Я. Карвацький, С. В. Лелека, Т. В. Лазарєв. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017. 174 с. URL: <http://ela.kpi.ua/handle/123456789/20800>

Питання для самоконтролю

Лекція 1.1(1)

- 1) Термін «інновація», що під ним треба розуміти?
- 2) Охарактеризуйте термін «інжиніринг», що під ним розуміють? Опишіть його види.
- 3) Проаналізуйте розвиток міжнародного інжинірингу.
- 4) Проаналізуйте світові тенденції розвитку інжинірингу.
- 5) Охарактеризуйте роль України на світовому ринку інжинірингових послуг.

Лекція 2.1(2)

- 1) Опишіть сутність інновації. Розкрийте зміст, типи та етапи інноваційних процесів.
- 2) Проаналізуйте технічні, організаційні, інформаційні, соціальні, економічні аспекти інновації.
- 3) Охарактеризуйте життєвий цикл інновації.
- 4) Охарактеризуйте життєвий цикл продукції.
- 5) Проаналізуйте фактори формування адекватного розуміння потреб замовника.
- 6) Стейкхолдери. Розкрийте їх роль у системній інженерії, у процесах організаційного забезпечення проектів тощо.

Лекція 3.1(3)

- 1) Проаналізуйте стратегію та вибір шляхів інноваційної діяльності.
- 2) Проаналізуйте особливості планування інноваційної діяльності підприємства.
- 3) Проаналізуйте особливості інноваційної політики і сталого розвитку підприємства.
- 4) Охарактеризуйте Internet-технології. Розкрийте їх сутність.

Лекція 4.1(4)

- 1) Охарактеризуйте способи скорочення тривалості виробничого циклу. Наведіть приклади.
- 2) Охарактеризуйте сутність процесу проєктування нових видів продукції та обладнання для їх виготовлення.

- 3) Проаналізуйте сутність науково-дослідних та дослідно-конструкторських робіт при проектуванні нових видів продуктів в рамках розробок інноваційних технологій та обладнання.
- 4) Охарактеризуйте принципи оцінки інноваційних проектів.
- 5) Опишіть наявні концепції теорії інноваційних процесів.
- 6) Проаналізуйте особливості теорії інноваційних процесів.
- 7) Проаналізуйте ризики інноваційних проектів.

Лекція 1.1(5)

- 1) Опишіть постановку задачі стаціонарної теплопровідності.
- 2) Опишіть постановку задачі статичної пружності.
- 3) Опишіть постановку задачі нестаціонарної теплопровідності.
- 4) Опишіть постановку задачі динамічної пружності з врахуванням великих деформацій та контактної взаємодії механічної природи.

Лекція 1.2(6)

- 1) Проаналізуйте постановку нелінійної нестаціонарної термоелектричної задачі.
- 2) Охарактеризуйте фізичні рівняння, початкові та граничні умови нестаціонарної термоелектричної задачі.
- 3) Проаналізуйте постановку зв'язаної нелінійної задачі термопружності.
- 4) Охарактеризуйте фізичні рівняння, початкові та граничні умови зв'язаної нелінійної задачі термопружності.

Лекція 1.3(7)

- 1) Опишіть постановку задачі тепло-гідродинаміки під час ламінарної течії нестисливої ньютонівської рідини.
- 2) Проаналізуйте початкові та граничні умови тепло-гідродинамічної задачі під час ламінарної течії нестисливої ньютонівської рідини.
- 3) Опишіть постановку задачі тепло-гідродинаміки під час турбулентної течії нестисливої ньютонівської рідини на базі стандартної моделі.
- 4) Охарактеризуйте фізичні рівняння, початкові та граничні умови в задачах тепло-гідродинаміки.

Лекція 1.4(8)

- 1) Опишіть сутність фізичних рівнянь неньютонівської рідини, моделі дилатантних (комполитних) речовин.
- 2) Опишіть постановку задачі тепло-гидродинамічного стану рідини типу Bingham-Papanastasiou.
- 3) Сформулюйте математичну модель процесу просочення поруватих середовищ.
- 4) Сформулюйте математичну модель процесу плавлення полімерного матеріалу.

Лекція 1.5(9)

- 1) Опишіть в чому полягає головна відмінність між дискретним та континуальним уявленням про рух середовища?
- 2) Проаналізуйте постановку задачі рухомого шару сипкого матеріалу з використанням методу дискретного елемента.
- 3) Охарактеризуйте початкові і граничні умови системи рівнянь балансу механічного руху частинки сипкого матеріалу.
- 4) Проаналізуйте фізичну постановку механотермічної задачі для теоретичного визначення теплофізичних властивостей сипких матеріалів.
- 5) Опишіть математичну постановку механотермічної задачі для теоретичного визначення теплофізичних властивостей сипких матеріалів.
- 6) Проаналізуйте алгоритм розв'язання задачі теоретичного визначення теплофізичних властивостей сипких матеріалів.

Лекція 1.6(10)

- 1) Сформулюйте математичну постановку задачі ізотермічного змішування двох потоків неньютонівської рідини.
- 2) Опишіть початкові та граничні умови задачі ізотермічного змішування двох потоків неньютонівської рідини.
- 3) Сформулюйте математичну постановку континуально-дискретної задачі неізотермічної двофазної течії (рідина – тверді частинки).
- 4) Опишіть початкові та граничні умови континуально-дискретної задачі неізотермічної двофазної течії.

Лекція 2.1(11)

- 1) Опишіть математичні постановки задачі багатофазних потоків на базі моделі VOF.
- 2) Проаналізуйте початкові і граничні умови задачі багатофазних потоків на базі моделі VOF.
- 3) Проаналізуйте основні обмеження та недоліки моделі VOF.
- 4) Опишіть математичні постановки задачі багатофазних потоків на базі моделі Ейлера.
- 5) Проаналізуйте початкові і граничні умови задачі багатофазних потоків на базі моделі Ейлера.

Лекція 2.2(12)

- 1) Опишіть математичне формулювання задачі газифікації вуглецевмісного матеріалу на базі DPM для суміші реагуючих газів із врахуванням турбулентного режиму течії.
- 2) Проаналізуйте глобальні гетерогенні та гомогенні реакції, що описують процес газифікації вуглецевмісного матеріалу.

Лекція 1.1(13)

- 1) Опишіть призначення, область застосування та історичний розвиток програмних продуктів ANSYS Workbench.
- 2) Опишіть призначення, область застосування та історичний розвиток програмного продукту LIGGGHTS.
- 3) Опишіть призначення, область застосування та історичний розвиток програмного продукту ParaView.

Лекція 1.2(14)

- 1) Опишіть окремі ресурси програмних продуктів Solidworks.
- 2) Опишіть приклади використання програмних продуктів Solidworks, ANSYS Workbench, LIGGGHTS, ParaView.
- 3) Опишіть структуру вихідного скрипта програми LIGGGHTS та команди, які визначають тип моделювання.
- 4) Охарактеризуйте загальні правила розробки скрипта програми LIGGGHTS.
- 5) Охарактеризуйте інтерфейс програми ParaView, опишіть його головні групи меню.

Лекція 1.1(15)

- 1) Проаналізуйте головні етапи застосування наукоємного комп'ютерного інжинірингу в рамках дисципліни «Інжиніринг інноваційних технологій та обладнання».
- 2) Проаналізуйте сутність розробок інноваційних конструкцій та технологічних регламентів експлуатації електрокальцинаторів для прожарювання антрациту та нафтового коксу.
- 3) Проаналізуйте технології виробництва вуглецевмісного наповнювача електродних виробів в електрокальцинаторах, аналіз її сучасного стану та визначення потреби в інноваціях.
- 4) Опишіть сутність теоретично-експериментальні дослідження наявного промислового обладнання електрокальцинаторів.
- 5) Охарактеризуйте розробки інноваційних конструкцій та технологічних регламентів експлуатації електрокальцинаторів.
- 6) Опишіть ефекти від впровадження розроблених інновацій.

Лекція 2.1(16)

- 1) Проаналізуйте сутність розробок інноваційних технологічних регламентів експлуатації та обладнання обертових печей для прожарювання антрациту та нафтового коксу.
- 2) Опишіть проблеми, які вирішує інноваційна технологія одержання наповнювача в обертових печах.
- 3) Опишіть ознаки новизни інноваційної технології технології прожарювання наповнювача в обертових печах.
- 4) Охарактеризуйте складові інноваційної технології одержання наповнювача в обертових печах.
- 5) Опишіть технічні характеристики інноваційної технології технології прожарювання наповнювача в обертових печах.
- 6) Наведіть техніко-економічний ефект від впровадження технології прожарювання наповнювача в обертових печах.
- 7) Опишіть основні переваги інноваційної технології одержання наповнювача в обертових печах.

Лекція 3.1(17)

- 1) Проаналізуйте сутність розробок інноваційних конструкцій та технологічних регламентів експлуатації печей Кастнера для графітування електродних виробів.

- 2) Охарактеризуйте місце технології випалювання в технології виробництва вуглеграфітових електродних виробів, виконайте аналіз її сучасного стану та визначте потреби в інноваціях.
- 3) Охарактеризуйте сутність теоретично-експериментальні дослідження наявного промислового багатоканальних печей Рідгемера.
- 4) Проаналізуйте проведені дослідження і розробки інноваційних конструкцій та технологічних регламентів експлуатації печей Рідгемера
- 5) Опишіть ефективність від впровадження розроблених інновацій.

Лекція 4.1(18)

- 1) Проаналізуйте сутність розробок інноваційних конструкцій та технологічних регламентів експлуатації печей Кастнера для графітування електродних виробів.
- 2) Опишіть проблеми, які вирішує інноваційна технологія графітування електродних виробів в печах Кастнера.
- 3) Опишіть ознаки новизни інноваційної технології графітування електродних виробів в печах Кастнера.
- 4) Охарактеризуйте складові інноваційної технології графітування електродних виробів в печах Кастнера.
- 5) Опишіть технічні характеристики інноваційної технології графітування електродних виробів в печах Кастнера.
- 6) Наведіть техніко-економічний ефект від впровадження технології графітування електродних виробів в печах Кастнера.
- 7) Опишіть основні переваги інноваційної технології графітування електродних виробів в печах Кастнера.

[illegible]

Електронне мережне навчальне видання

Карвацький Антон Янович

ІНЖИНІРИНГ ІННОВАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ТА ОБЛАДНАННЯ

Конспект лекцій з навчальної дисципліни

*для здобувачів ступеня магістра
за спеціальністю 131 Прикладна механіка*

Комп'ютерна правка та верстка – *авторська*

Реєстр. № 22/23-238. Обсяг 7,0 авт. арк.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
проспект Перемоги, 37, м. Київ, 03056
<https://kpi.ua>

Свідоцтво про внесення до Державного реєстру видавців, виготовлювачів
і розповсюджувачів видавничої продукції ДК № 5354 від 25.05.2017 р.