ЗМІСТ

ПЕРЕДМОВА **13**

РОБОЧА ПРОГРАМА ДИСЦИПЛІНИ (СТИСЛО) **15**

ПЕРЕЛІК ОСНОВНИХ СКОРОЧЕНЬ **17**

ЧАСТИНА І. ЛЕКЦІЙНИЙ КУРС **18**

ЛЕКЦІЯ 1. ГЕОТЕРМАЛЬНА ЕНЕРГЕТИКА ТА СУМІЩЕНЕ ВИДОБУВАННЯ ГЕОРЕСУРСІВ: ПОНЯТТЯ, ІСТОРІЯ, КЛАСИФІКАЦІЇ, НОРМАТИВНА БАЗА **18**

1.1. Геотермальна енергія і геотехнології суміщеного видобування: основні поняття 19
1.2. Історія використання теплоти Землі 20
1.3. Класифікації геотермальних ресурсів і систем 24
1.4. Діаграма Ліндаля і температурні діапазони використання 29
1.5. Місце геотермальної енергетики в енергетичному переході 31
1.6. Термінологія, законодавчо-нормативна база і ресурсні показники України 33
1.7. Інновації та тенденції розвитку 37
1.8. Суміщене видобування і зберігання як предмет дисципліни. Структура курсу 38
1.9. Висновки до лекції 40
1.10. Контрольні запитання 41

ЛЕКЦІЯ 2. ГЕОЛОГІЧНІ, ГІДРОГЕОЛОГІЧНІ ТА ТЕПЛОФІЗИЧНІ ОСНОВИ СУМІЩЕНОГО ВИДОБУВАННЯ ГЕОРЕСУРСІВ **42**

2.1. Геологічне підґрунтя суміщеного видобування: будова Землі, галузі геології та їхня роль 43
2.2. Теплота Землі: джерела, тепловий потік і геотермічний градієнт 45
2.3. Температурне поле надр: кондуктивний і конвективний режими, геотермічні профілі 47
2.4. Теплофізичні властивості гірських порід і пластових флюїдів 51

2.5. Колекторські властивості порід і підземна гідросфера 54
2.6. Пластові води: мінералізація, хімічний склад, солевідкладення і корозія 56
2.7. Геотермальні «плеї» і типи геотермальних систем 58
2.8. Дніпровсько-Донецька западина як суміщена вуглеводнево-геотермальна провінція 60
2.9. Геолого-екологічні аспекти та охорона надр 63
2.10. Інновації і тенденції 65
2.11. Висновки до лекції 65
2.12. Контрольні запитання 66

ЛЕКЦІЯ 3. СВЕРДЛОВИННІ ГЕОТЕРМАЛЬНІ СИСТЕМИ ТА ПЕРЕТВОРЕННЯ ГЕОТЕРМАЛЬНОЇ ЕНЕРГІЇ 67
3.1. Класифікація свердловинних геотермальних систем 68
3.2. Відкриті системи і повторне закачування 70
3.3. Замкнені і стимульовані системи 72
3.4. Односвердловинні системи на базі нафтогазових свердловин: класифікація і двоінтервальні схеми 73
3.5. Термодинамічні основи перетворення геотермальної енергії 76
3.6. Пряме використання теплоти, каскади і діаграма Ліндаля 78
3.7. Паротурбінні ГеоЕС: суха пара, одно- і двоступеневе розширення 80
3.8. Бінарні установки: ORC і цикл Калини 81
3.9. Гібридні установки 84
3.10. Геотермальні теплові насоси 85
3.11. Типові схеми геотермальних теплоенергетичних систем на базі свердловин 86
3.12. Світовий стан і інноваційні тенденції 91
3.13. Висновки до лекції 92
3.14. Контрольні запитання 93

ЛЕКЦІЯ 4. НАФТОГАЗОВІ СВЕРДЛОВИНИ ЯК ДЖЕРЕЛО ГЕОТЕРМАЛЬНОЇ ЕНЕРГІЇ: ПОПУТНІ ВОДИ, ПЕРЕПРОФІЛЮВАННЯ, РЕКОНСТРУКЦІЯ 95
4.1. Історія геотехнологій і геотермального використання в нафтогазовій справі 96

4.2. Обводненість і попутні пластові флюїди як тепловий ресурс 98
4.3. Базові схеми використання нафтогазових свердловин для видобування геотепла 100
4.4. Конструкція і цілісність свердловин 102
4.5. Добурювання, капітальні ремонти та реконструкція свердловин 105
4.6. Наземне обладнання: сепарація, підготовка теплоносія, теплові насоси, компресори 107
4.7. Суміщена свердловинна геотермальна система і її феноменологічна модель 109
4.8. Український досвід: перепрофілювання бездіючих свердловин Єфремівського ГКР 111
4.9. Критерії відбору фонду свердловин для перепрофілювання 113
4.10. Алгоритм вибору технології перепрофілювання і проблема даних про фонд свердловин України 115
4.11. Інновації та тенденції 119
4.12. Висновки до лекції 120
4.13. Контрольні запитання 121

ЛЕКЦІЯ 5. ТЕПЛОМАСООБМІН У СТОВБУРІ СВЕРДЛОВИНИ: НЕІЗОТЕРМІЧНИЙ ЛІФТИНГ ФЛЮЇДІВ 123
5.1. Свердловина як протиточний теплообмінник: постановка задачі 124
5.2. Рівняння енергії потоку флюїду в стовбурі 125
5.3. Модель Рамея: загальний коефіцієнт теплопередачі та функція часу 126
5.4. Розв’язки для температурного профілю видобувної і нагнітальної свердловин 131
5.5. Ефект Джоуля – Томсона, потенціальний і кінетичний члени, тертя 133
5.6. Двофазний потік і підхід Хасана – Кабіра 134
5.7. Зв’язок температурного і тискового профілів 136
5.8. Аналогія з трубопровідним транспортом: формула Шухова 137
5.9. Вплив дебіту, часу і теплоізоляції ліфтової колони. Інновації 137

5.10. Прогноз гирлової температури і калібрування коефіцієнта теплопередачі: модель автора і Ланівське ГКР 141
5.11. Висновки до лекції 144
5.12. Контрольні запитання 145

ЛЕКЦІЯ 6. ФІЛЬТРАЦІЯ ТА ПЕРЕНЕСЕННЯ ТЕПЛОТИ В ПЛАСТІ-КОЛЕКТОРІ. ГЕОТЕРМАЛЬНІ ДУБЛЕТИ 146
6.1. Закон Дарсі і фільтраційно-ємнісні властивості пласта-колектора 147
6.2. Усталений радіальний приплив рідини. Скін-ефект, індекси продуктивності та приймальності 149
6.3. Приплив газу до свердловини: двочленне рівняння, ефекти Клінкенберга і Джоуля – Томсона 151
6.4. Основи гідродинамічних досліджень свердловин 153
6.5. Перенесення теплоти в пористому середовищі. Тепловий фронт і розв’язок Ловер’є 155
6.6. Геотермальний дублет: гідравліка, термічний прорив, відстань між свердловинами 158
6.7. Модель умовно-тонкого пласта-«шайби» і вплив теплопровідності порід на дебіт 161
6.8. Керування розробкою геотермального резервуару: зворотне нагнітання, підтримання тиску, сталість і відновлюваність 163
6.9. Інтегральна модель ефективності цифрового двійника геотермального дублету 165
6.10. Інновації та тенденції 171
6.11. Висновки до лекції 173
6.12. Контрольні запитання 174

ЛЕКЦІЯ 7. ЗАМКНЕНІ СВЕРДЛОВИННІ ТЕПЛООБМІННИКИ ТА ІНТЕНСИФІКАЦІЯ ТЕПЛОЗНІМАННЯ 175
7.1. Призначення і класифікація замкнених свердловинних теплообмінників 176
7.2. Мережа термічних опорів «теплоносій – стінка – цемент – масив» 180
7.3. Нестаціонарна теплопровідність масиву: лінійне і циліндричне джерела, g-функції 182
7.4. Рівняння енергії коаксіального теплообмінника 185

7.5. Замкнені свердловини з горизонтальною ділянкою та односвердловинні системи зі струминним насосом 190
7.6. Коефіцієнт перетворення теплоти, геометрична топологія вибійних теплообмінників і вибір технологічного кейсу 192
7.7. Інтенсифікація теплознімання: нанофлюїди, покриття і системний критерій 199
7.8. Техніко-економічні показники замкнених контурів, інновації і тенденції 201
7.9. Висновки до лекції 203
7.10. Контрольні запитання 204

ЛЕКЦІЯ 8. СУМІЩЕНІ ТЕХНОЛОГІЇ ІНТЕНСИФІКАЦІЇ ВИДОБУВАННЯ ТА ПІДГОТОВКИ ВУГЛЕВОДНІВ З ВИКОРИСТАННЯМ ГЕОТЕПЛА 206
8.1. Теплові методи підвищення нафтовилучення: фізичні основи і тепловтрати 207
8.2. Природне геотепло як внутрішнє джерело енергії інтенсифікації видобування 209
8.3. Газові гідрати: умови утворення, рівноважна температура, інгібітори 211
8.4. Геотермальний підігрів нагнітального і видобувного газу 214
8.5. Газодинамічний тепловий насос у промислових мережах: досвід Юліївського НГКР 216
8.6. Математичне моделювання промислових мереж: граф, матриця інциденцій, двошарова модель 219
8.7. Інтенсифікація видобування пінними ПАР і гідророзривом пласта-теплообмінника 221
8.8. Односвердловинна геотермальна система зі струминним насосом і U-подібною підйомною колоною 223
8.9. Пост-ГРП технологічна пауза як керована стадія розвитку тріщинно-порового простору 228
8.10. Супутнє вилучення мінералів і зниження вуглецевого сліду 233
8.11. Висновки до лекції 235
8.12. Контрольні запитання 236

ЛЕКЦІЯ 9. ПІДЗЕМНЕ ЗБЕРІГАННЯ ТА АКУМУЛЮВАННЯ ЕНЕРГОРЕСУРСІВ У ПЕРЕПРОФІЛЬОВАНИХ ПОКЛАДАХ І СВЕРДЛОВИНАХ 238

9.1. Підземне зберігання природного газу: призначення, типи сховищ, баланс газу 239
9.2. Теплові та баричні надлишки ПСГ і геотермальний підігрів газу 242
9.3. Класифікація способів акумулювання теплової енергії. Підземні акумулятори BTES, ATES, HT-ATES 243
9.4. Сезонне акумулювання теплоти у виснажених покладах 246
9.5. Двопластовий дуплет з керованим термодинамічним стоком 249
9.6. Підземне зберігання водню в пористих середовищах 250
9.7. Геотермальні системи на CO_2 і комбіноване зберігання 253
9.8. Свердловинні енергетичні хаби «теплота – газ – водень» і нанокомпозиції: напрями досліджень 253
9.9. Висновки до лекції 258
9.10. Контрольні запитання 259

ЛЕКЦІЯ 10. ЕКОНОМІКА, ЕКОЛОГІЯ, БЕЗПЕКА ТА ЦИФРОВІЗАЦІЯ ПРОЄКТІВ СУМІЩЕНОГО ВИДОБУВАННЯ ГЕОРЕСУРСІВ 261

10.1. Життєвий цикл і етапи проєкту суміщеного видобування георесурсів 262
10.2. Структура капітальних і експлуатаційних витрат 265
10.3. Показники економічної ефективності 267
10.4. Фактори впливу, шляхи оптимізації, світовий і український досвід 270
10.5. Екологічні аспекти проєктів суміщеного видобування 274
10.6. Промислова безпека і план безпеки проєкту 279
10.7. Цифровізація: моніторинг, SCADA, DTS, цифрові двійники 281
10.8. Інновації і тенденції 284
10.9. Висновки до лекції 285
10.10. Контрольні запитання 286

ЧАСТИНА ІІ. ПРАКТИЧНІ ЗАНЯТТЯ 288

ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ 1. ОЦІНКА ГЕОТЕРМАЛЬНИХ РЕСУРСІВ ДІЛЯНКИ ОБ'ЄМНИМ МЕТОДОМ 288
П1.1. Мета і завдання заняття 288
П1.2. Короткі теоретичні відомості 289
П1.3. Приклад розрахунку 291
П1.4. Індивідуальні завдання 295
П1.5. Порядок виконання та вимоги до звіту 296
П1.6. Контрольні запитання 297

ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ 2. ПОБУДОВА ГЕОТЕРМІЧНОГО ПРОФІЛЮ ТА ВИЗНАЧЕННЯ ТЕПЛОФІЗИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ФЛЮЇДОНАСИЧЕНИХ ПОРІД 298
П2.1. Мета і завдання заняття 298
П2.2. Короткі теоретичні відомості 298
П2.3. Приклад розрахунку 300
П2.4. Індивідуальні завдання 305
П2.5. Порядок виконання та вимоги до звіту 306
П2.6. Контрольні запитання 307

ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ 3. РОЗРАХУНОК БІНАРНОЇ ГЕОТЕРМАЛЬНОЇ УСТАНОВКИ (ORC) ТА ТЕПЛОНАСОСНОЇ СИСТЕМИ 308
П3.1. Мета і завдання заняття 308
П3.2. Короткі теоретичні відомості 308
П3.3. Приклад розрахунку 310
П3.4. Індивідуальні завдання 317
П3.5. Порядок виконання та вимоги до звіту 317
П3.6. Контрольні запитання 318

ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ 4. СКРИНІНГ ФОНДУ НАФТОГАЗОВИХ СВЕРДЛОВИН ДЛЯ ПЕРЕПРОФІЛЮВАННЯ В ГЕОТЕРМАЛЬНІ 319
П4.1. Мета і завдання заняття 319
П4.2. Короткі теоретичні відомості 319
П4.3. Приклад розрахунку 322

П4.4. Індивідуальні завдання 327
П4.5. Порядок виконання та вимоги до звіту 328
П4.6. Контрольні запитання 329
ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ 5. РОЗРАХУНОК ТЕМПЕРАТУРИ ФЛЮЇДУ НА ГИРЛІ ТА ТЕПЛОВТРАТ У ЛІФТОВІЙ КОЛОНІ 330
П5.1. Мета і завдання заняття 330
П5.2. Короткі теоретичні відомості 330
П5.3. Приклад розрахунку 332
П5.4. Індивідуальні завдання 337
П5.5. Порядок виконання та вимоги до звіту 338
П5.6. Контрольні запитання 339
ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ 6. РОЗРАХУНОК ГЕОТЕРМАЛЬНОГО ДУБЛЕТУ 340
П6.1. Мета і завдання заняття 340
П6.2. Короткі теоретичні відомості 341
П6.3. Приклад розрахунку 343
П6.4. Індивідуальні завдання 347
П6.5. Порядок виконання та вимоги до звіту 348
П6.6. Контрольні запитання 349
ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ 7. РОЗРАХУНОК КОАКСІАЛЬНОГО СВЕРДЛОВИННОГО ТЕПЛООБМІННИКА У ПЕРЕПРОФІЛЬОВАНІЙ СВЕРДЛОВИНІ 349
П7.1. Мета і завдання заняття 349
П7.2. Короткі теоретичні відомості 350
П7.3. Приклад розрахунку 352
П7.4. Індивідуальні завдання 358
П7.5. Порядок виконання та вимоги до звіту 360
П7.6. Контрольні запитання 361
ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ 8. РОЗРАХУНОК ГІДРАТНОГО РЕЖИМУ ШЛЕЙФУ ТА ЕФЕКТУ ГЕОТЕРМАЛЬНОГО ПІДІГРІВУ І ПЕРЕРОЗПОДІЛУ ПОТОКІВ 362
П8.1. Мета і завдання заняття 362
П8.2. Короткі теоретичні відомості 362
П8.3. Приклад розрахунку 365
П8.4. Індивідуальні завдання 370

П8.5. Порядок виконання та вимоги до звіту 371
П8.6. Контрольні запитання 372

ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ 9. РОЗРАХУНОК СЕЗОННОГО ТЕПЛОВОГО АКУМУЛЯТОРА У ВИСНАЖЕНОМУ ПОКЛАДІ ТА ЄМНОСТІ ПІДЗЕМНОГО СХОВИЩА ВОДНЮ 373
П9.1. Мета і завдання заняття 373
П9.2. Короткі теоретичні відомості 373
П9.3. Приклад розрахунку 375
П9.4. Індивідуальні завдання 380
П9.5. Порядок виконання та вимоги до звіту 381
П9.6. Контрольні запитання 381

ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ 10. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНА ОЦІНКА ПРОЄКТУ СУМІЩЕНОГО ВИДОБУВАННЯ ТА РОЗРОБЛЕННЯ ПЛАНУ ПРОЄКТУ І ПЛАНУ БЕЗПЕКИ 382
П10.1. Мета і завдання заняття 382
П10.2. Короткі теоретичні відомості 383
П10.3. Приклад розрахунку 384
П10.4. Індивідуальні завдання 393
П10.5. Порядок виконання та вимоги до звіту 394
П10.6. Контрольні запитання 394

ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ 11. ОПТИМІЗАЦІЯ ГЛИБИНИ ВЕРХНЬОГО ГОРИЗОНТУ ДВОШАРОВОГО ДУБЛЕТУ 395
П11.1. Мета і завдання заняття 395
П11.2. Короткі теоретичні відомості 396
П11.3. Приклад розрахунку 397
П11.4. Індивідуальні завдання 399
П11.5. Порядок виконання та вимоги до звіту 399
П11.6. Контрольні запитання 399

ПЕРЕЛІК ПИТАНЬ ДО ПІДСУМКОВОГО КОНТРОЛЮ 399

ГЛОСАРІЙ 405

ДОВІДКОВІ ДАНІ **408**
Д.1. Властивості води на лінії насичення і в однофазній області 408
Д.2. Теплофізичні властивості гірських порід 409
Д.3. Властивості метану 409
Д.4. Співвідношення одиниць 410
Д.5. Параметри моделі пост-ГРП розвитку тріщин 410

СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ТА ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ **410**