



Теплотехнологічні процеси і установки – 2. Сушильні процеси та установки

Робоча програма навчальної дисципліни (Силабус)

Реквізити навчальної дисципліни

Рівень вищої освіти	Перший (бакалаврський)
Галузь знань	14 Електрична інженерія
Спеціальність	144 Теплоенергетика
Освітня програма	ОПП Промислова та муніципальна теплоенергетика і енергозбереження
Статус дисципліни	Нормативна
Форма навчання	Очна/денна
Рік підготовки, семестр	4-й курс, осінній семестр
Обсяг дисципліни	4 кредити; 120 годин (з них 52 аудиторних годин та 68 годин самостійної роботи студентів)
Семестровий контроль	Екзамен
Розклад занять	Лекційні заняття – один раз на тиждень; практичні заняття – один раз на два тижні, http://rozklad.kpi.ua/
Мова викладання	Українська
Інформація про керівника курсу / викладачів	Лектор: к.т.н., доцент Середя Володимир Володимирович, email: sereda.volodymyr@lil.kpi.ua
Розміщення курсу	https://classroom.google.com/c/MTUzNTMwMzQ0MTM0

Програма навчальної дисципліни

1. Опис навчальної дисципліни, її мета, предмет вивчення та результати навчання

Однією із глобальних світових проблем сьогодення є економія енергоресурсів, залучення в сферу їх виробництва нетрадиційних джерел, впровадження енергозбережних технологій. Важливою стадією багатьох технологічних процесів, які застосовують у хімічній, фармацевтичній, деревообробній та інших галузях промисловості України є сушіння, на яке витрачається значна кількість енергетичних ресурсів (приблизно 15% видобутого палива та електроенергії). Як свідчить статистика, енергоємність технологічних процесів в Україні є у 3-5 разів вищою, ніж у розвинених країнах. В більшості випадків на процеси сушіння використовується у 2,5-3 рази більше енергії від необхідної для перетворення вологи у пару, що свідчить про недосконалість технології сушіння. Спеціаліст-теплоенергетик в залежності від профілю його практичної роботи повинен мати досить глибокі знання в області теорії, практики та технології сушіння та вміти їх використовувати в своїй професійній діяльності.

Метою дисципліни «Теплотехнологічні процеси і установки – 2. Сушильні процеси та установки» є формування у студентів знань щодо основних принципів побудови та експлуатації сушильної техніки та вміння правильно вибирати технологічні режими сушіння із мінімізацією енерговитрат.

Предметом вивчення дисципліни є основні властивості сушильних агентів та вимоги до них; теоретичні основи та фізична сутність процесів сушіння; основні схеми та конструкція сушильних установок; застосування відновлювальних джерел енергії у складі сушарок різних конструкцій.

Вивчення дисципліни формує такі **компетентності**:

- ЗК 3 Здатність вчитися і оволодівати сучасними знаннями.
- ЗК 4 Здатність застосовувати знання у практичних ситуаціях.
- ФК 2 Здатність застосовувати і інтегрувати знання і розуміння інших інженерних дисциплін для вирішення професійних проблем.
- ФК 8 Здатність використовувати наукову і технічну літературу та інші джерела інформації у професійній діяльності в теплоенергетичній галузі.
- ФК 14 Здатність розробляти і реалізовувати енергозберігаючі заходи при проектуванні та експлуатації теплоенергетичного обладнання, аналізувати схеми теплоенергетичних і теплотехнологічних установок з урахуванням вимог безпеки і сучасних тенденцій розвитку енергетики в залежності від призначення і типу палива, яке використовується.
- ФК 15 Здатність розробляти оптимальні конструкції та експлуатаційні режими теплообмінного обладнання; оцінювати ефективність і загальну економічність використання різних видів ВЕР, нетрадиційних джерел енергії, об'єктів з теплонасосними системами тепlopостачання.

В результаті вивчення дисципліни студент навчиться:

- ПРН 4 Аналізувати і використовувати сучасні інженерні технології, процеси, системи і обладнання у сфері теплоенергетики.
- ПРН 6 Виявляти, формулювати і вирішувати інженерні завдання у теплоенергетиці; розуміти важливість нетехнічних (суспільство, здоров'я і безпека, навколишнє середовище, економіка і промисловість) обмежень.
- ПРН 9 Вміти знаходити необхідну інформацію в технічній літературі, наукових базах даних та інших джерелах інформації, критично оцінювати і аналізувати її.
- ПРН 13 Розуміти ключові аспекти та концепції теплоенергетики, технології виробництва, передачі, розподілу і використання енергії.
- ПРН 16 Розуміти нетехнічні (суспільство, здоров'я і безпека, навколишнє середовище, економіка і промисловість) наслідки інженерної практики.
- ПРН 17 Аргументувати і доносити судження, які відбивають інженерні рішення в сфері теплоенергетики та відповідні соціальні, екологічні та етичні проблеми до фахівців і нефахівців.

2. Пререквізити та постреквізити дисципліни (місце в структурно-логічній схемі навчання за відповідною освітньою програмою)

Освоєння матеріалу дисципліни базується на попередньому вивченні теоретичних дисциплін «Хімія», «Фізика», «Гідрогазодинаміка», «Технічна термодинаміка» та «Тепломасообмін». Отримані знання використовуються під час роботи над дипломною роботою бакалавра, а також в подальшій професійній діяльності.

3. Зміст навчальної дисципліни

Тема 1. Вологий матеріал як об'єкт сушіння.

Сучасний стан техніки сушіння. Вологість і вологовміст. Зв'язок вологи з матеріалом. Класифікація об'єктів сушіння. Термодинамічні, теплофізичні та масопереносні властивості вологих матеріалів.

Тема 2. Сушильні агенти та вимоги до них.

Вологе повітря як сушильний агент. Розрахунки характеристик властивостей вологого повітря. Процеси зміни стану повітря, їх зображення на діаграмах. Позитивні якості і недоліки топкових газів як сушильного агента. Інші сушильні агенти: насичена і перегріта водяна пара; нагріті рідини; інертні гази; перегріта пара розчинників.

Тема 3. Варіанти організації сушильних процесів.

Сушіння з одноразовим використанням сушильного агента. Сушіння топковими газами. Сушіння з рециркуляцією сушильного агента. Сушіння з проміжним підігрівом сушильного агента. Сушіння із частковою рециркуляцією й проміжним нагріванням відпрацьованого повітря. Сушіння із замкненою циркуляцією газу.

Тема 4. Конвекційні сушарки.

Загальні характеристики камерних, тунельних, стрічкових, шахтних та барабанних сушарок. Конвекційні пневматичні та аерофонтанні сушарки. Сушарки з киплячим (псевдозрідженим) шаром та вібраційні сушарки. Розпилювальні сушарки та сушіння на інертних тілах.

Тема 5. Аналітичний і графоаналітичний методи розрахунку статистики процесу конвективного сушіння.

Основне розрахункове рівняння і метод його розв'язування. Межі застосування аналітичного методу. Графоаналітичний метод розрахунку. Побудова політроп «сушіння». Визначення витрат теплоти і сушильного агента на сушіння. Критерій теплової економічності. Визначення ККД сушарки. Вплив параметрів сушильного агента на теплову економічність сушарки.

Тема 6. Кінетика процесу сушіння.

Періоди процесу сушіння. Інтенсивність і швидкість сушіння. Криві кінетики сушіння. Аналіз періодів сушіння. Розрахунок тривалості сушіння.

Тема 7. Контактні сушарки.

Вакуум-сушильна шафи. Гребкові вакуум-сушарки. Вальцьові сушарки. Циліндричні сушарки.

Тема 8. Спеціальні методи сушіння.

Терморадіаційні сушарки. Сушіння струмами високої частоти. Сублімаційне сушіння.

Тема 9. Сонячні колектори і сушіння.

Гібридні сонячно-газові сушарки. Особливості роботи сонячних фруктових та овочевих сушарок. Фруктова сушарка з інтегрованим сонячним колектором на основі матеріалу з фазовим переходом Огляд сонячних сушарок для сільськогосподарської та морської продукції.

Тема 10. Сушарки із тепловими насосами.

Камерна сушильна установка з тепловим насосом. Фруктова сушарка на тепловому насосі. Теплонасосна установка з двома температурними рівнями сушильного агента. Тунельна сушильна установка із абсорбційним тепловим насосом. Шахтна сушарка із двигуном внутрішнього згорання та тепловим насосом.

4. Навчальні матеріали та ресурси

Базовими матеріалами для вивчення дисципліни є навчальні посібники і монографії:

1. Ткаченко С. Й., Співак О. Ю. Сушильні процеси та установки. Навчальний посібник. - Вінниця: ВНТУ, 2007. - 76 с. Доступ: <http://tkachenko.vk.vntu.edu.ua/file/cda121b838067ae3ea7278d7f3afc556.pdf>
2. Системи опалення, вентиляції і кондиціювання повітря будівель [Електронний ресурс]: навч. посіб. для студентів спеціальності 144 «Теплоенергетика» / М.Ф.Боженко ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – 380 с.

3. Куба В.В., Середа В.В. Теплотехнологічні процеси та установки. Розділ «Установка сушильна тунельна». Практикум. Навчальний посібник – Рівне: НУВГП, 2012. – 81 с. Доступ: <http://ep3.nuwm.edu.ua/id/eprint/1805>.
4. Дистанційний курс «Процеси та апарати хімічних виробництв». Тема 27.2 Схеми сушильних установок та типові конструкції сушарок. Доступ: <https://dl.sumdu.edu.ua/textbooks/22852/266179/index.html>.
5. Безродний, Михайло Костянтинович. Теплові насоси та їх використання: навч. посіб. для студ. вищих навч. закл., які навч. за напрямом підготовки «Теплоенергетика» / М.К. Безродний, І.І. Пуховий, Д.С. Кутра; М-во освіти і науки України, НТУУ «КПІ». – Київ: НТУУ «КПІ», 2013. – 312 с.
6. Безродний, М. К. Термодинамічна ефективність теплонасосної конвеєрної сушарки з утилізацією теплоти висушеного зерна / М. К. Безродний, В. В. Вовк // Енергетика: економіка, технології, екологія: науковий журнал. – 2013. - № 3 (34). - С. 37-44. Доступ: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/11272>.
7. Безродний, М. К. Аналіз ефективності рециркуляційної сушарки зерна з тепловим насосом / М. К. Безродний, В. В. Вовк // Наукові вісті НТУУ «КПІ»: науково-технічний журнал. - 2014. - № 2(94). - С. 7-13. Доступ: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/8968>.
8. Озарків І.М. Використання сонячної енергії у промисловості: навч. посібник / І.М. Озарків, Й.С. Мисак, З.П. Копинець. – Л.: НВФ «Українські технології», 2007. – 276 с.
9. López-Vidaña E. C., Méndez-Lagunas L. L., Rodríguez-Ramírez J. Efficiency of a hybrid solar-gas dryer. *Solar Energy* 93 (2013), 23–31. doi:10.1016/j.solener.2013.01.027.
10. Çakmak G., Yıldız C. The drying kinetics of seeded grape in solar dryer with PCM-based solar integrated collector. *Food and Bioproducts Processing*, 89 (2) (2011), 103–108. doi:10.1016/j.fbp.2010.04.001.
11. Lingayat A., Chandramohan V. P., Raju V. R. K. Design, Development and Performance of Indirect Type Solar Dryer for Banana Drying. *Energy Procedia* 109 (2017), 409–416. doi:10.1016/j.egypro.2017.03.041. Доступ: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610217300632>.
12. Castillo-Téllez M., Pilatowsky-Figueroa I., López-Vidaña E. C., Sarracino-Martínez O., Hernández-Galvez G. Dehydration of the red chilli (*Capsicum annuum* L., costeño) using an indirect-type forced convection solar dryer. *Applied Thermal Engineering* 114 (2017), 1137–1144. doi:10.1016/j.applthermaleng.2016.08.114. Доступ: <https://www.researchgate.net/publication/306520623>.
13. Teeboonma U., Tiansuwan J., Soponronnarit S. Optimization of heat pump fruit dryers. *Journal of Food Engineering* 59 (4) (2003), 369–377. doi:10.1016/s0260-8774(02)00496-x.

Допоміжні джерела:

1. Сушильные процессы и установки (примеры, задачи, типовые расчеты). Часть первая. Учебное пособие для студентов направления бакалаврской подготовки 6.050601 «Теплоэнергетика» / Авторы: В.М. Минаковский, И.А. Назарова, – К.: НТУУ «КПІ», ТЭФ. 2016. – 217 с. Доступ: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/16515>.
2. Методичні вказівки та завдання до виконання курсового проекту з дисципліни «Теплотехнологічні процеси і установки» для студентів напряму підготовки 6.050601 «Теплоенергетика» / В.В. Куба, В.В. Середа. – Рівне: НУВГП, 2011р. – 43 с. Доступ: <http://ep3.nuwm.edu.ua/673/>.
3. Бібліотека визначення фізичних властивостей речовин CoolProp. Доступ: <http://www.coolprop.org/>.
4. Мінаковський, Віктор Мирославович. Теплотехнологічні процеси та установки: посібник / В.М. Мінаковський; Мін-во освіти і науки України, НТУУ «КПІ». – Київ: НТУУ «КПІ», 2009. – 128 с.

5. Безродный М.К. Эффективность применения тепловых насосов в установках сушки древесины [Текст]: моногр./ М.К. Безродный, Д.С. Кутра. – К.: НТУУ «КПИ», 2011. – Библиогр.: с. 201 – 209.- 240 с. Доступ: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/6331>.
6. Кутра, Дмитро Сергійович. Ефективність теплонасосних схем енергозабезпечення установок сушіння деревини: [Електронний ресурс]: дис. кандидата технічних наук: спец.: 05.14.06 – технічна теплофізика та промислова теплоенергетика – Київ, 2013. Доступ: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/6331>.
7. Zoukit A., El Ferouali H., Salhi I., Doubabi S., Abdenouri N. Simulation, design and experimental performance evaluation of an innovative hybrid solar-gas dryer. Energy (2019), 116279. doi:10.1016/j.energy.2019.116279.
8. Fudholi A., Sopian K., Ruslan M. H., Alghoul M. A., Sulaiman M. Y. Review of solar dryers for agricultural and marine products. Renewable and Sustainable Energy Reviews 14 (1) (2010), 1–30. doi:10.1016/j.rser.2009.07.032.

Навчальний контент

5. Методика опанування навчальної дисципліни (освітнього компонента)

Опанування навчальної дисципліни базується на попередньому опрацюванні матеріалу кожної лекції, що надсилається викладачем заздалегідь, з подальшим опитуванням і детальним розглядом окремих питань під час проведення лекції або зустрічі при дистанційному режимі навчання. Крім того, в рамках проведення практичних занять, студентам видаються індивідуальні завдання для попереднього їх вирішення і обговорення в рамках часу, передбаченого розкладом практичних занять.

6. Самостійна робота студента

Самостійна робота студента передбачена під час попереднього опрацювання матеріалу лекцій, що надсилається викладачем, а також при самостійному вирішенні індивідуальних завдань, що видаються в рамках програми практичних занять.

Політика та контроль

7. Політика навчальної дисципліни (освітнього компонента)

Система вимог до студентів:

- відповіді на лекційних заняттях;
- відповіді на практичних заняттях;
- виконання завдань СРС;
- виконання МКР (дві частини);
- відповідь на екзамені – максимально 40 балів.

8. Види контролю та рейтингова система оцінювання результатів навчання (РСО)

Рейтинг студента з дисципліни складається з балів, які він отримує за:

- 1) три відповіді в середньому кожного студента на лекційних заняттях (на одному занятті опитуються приблизно 3 студенти; при середній чисельності групи 10 осіб і тринадцяти лекційних заняттях (26 годин) отримуємо: $3 \cdot 13 / 10 \approx 3$ відповіді);
- 2) три відповіді в середньому кожного студента на практичних заняттях (на одному занятті опитуються приблизно 3 студенти; при середній чисельності групи 10 осіб і дев'яти практичних заняттях (18 годин) отримуємо: $3 \cdot 9 / 10 \approx 3$ відповіді);
- 3) виконання завдань СРС;
- 4) виконання МКР;
- 5) відповідь на екзамені – максимально 40 балів.

Система рейтингових балів та критерії оцінювання

1. Робота на лекційних заняттях

Ваговий бал – 2. Максимальна кількість балів студента на всіх заняттях: $r_1 = 2 \text{ бали} \times 3 = 6 \text{ балів}$.

Критерії оцінювання:

2 бали – повна вірна відповідь на поставлене запитання; 1 бал – відповідь має несуттєві помилки; 0 балів – наявність суттєвих помилок в неповній відповіді або відсутність відповіді.

2. Робота на практичних заняттях

Ваговий бал – 2. Максимальна кількість балів студента на всіх заняттях: $r_2 = 2 \text{ бали} \times 2 = 4 \text{ бали}$.

Критерії оцінювання:

2 бали – повна вірна відповідь на поставлене запитання; 1 бал – відповідь має несуттєві помилки; 0 балів – наявність суттєвих помилок в неповній відповіді або відсутність відповіді.

3. Виконання завдань СРС

Ваговий бал – 2. Максимальна кількість балів студента – 18 (завдання СРС видаються після кожного практичного заняття, строк задачі завдання – не пізніше ніж через тиждень): $r_3 = 2 \text{ бал} \times 9 = 18 \text{ балів}$. Виконане завдання надається викладачу у вигляді оформлених розрахунків, виконання завдань СРС обов'язкове.

Критерії оцінювання:

2 бали – в повному об'ємі і вчасно надана відповідь; 1 бал – відповідь має несуттєві помилки; 0 балів – не вчасно надана відповідь.

Штрафні бали:

несвоєчасне виконання завдання СРС без поважної причини (хвороба) – мінус 1 бал за кожне невиконане завдання.

Заохочувальні бали:

участь у наукових та/або науково-практичних конференціях, семінарах, симпозіумах – 5 балів.

4. Модульна контрольна робота (МКР)

Проводиться дві частини МКР. Кожна частина МКР складається із восьми тестових завдань. Ваговий бал кожної частини – 16. Максимальна кількість балів за МКР дорівнює $r_4 = 16 \times 2 = 32 \text{ бали}$.

Критерії оцінювання:

16 балів – повна вірна відповідь на всі тестові завдання; 16...1 бали – наявність неповних та/або невірних відповідей на тестові завдання; 0 балів – відсутність відповіді, МКР не зараховано.

6. Відповіді на екзамені

Екзамен проводиться у письмово-усній формі і складається із двох частин. Теоретична частина включає комп'ютерне тестування за змістом навчальної дисципліни (завдання – 30 тестів закритої форми з однією правильною відповіддю з 5-и запропонованих) і оцінюється у 30 балів. Практична частина містить одну задачу, розв'язок якої оцінюється у 10 балів. Тобто, максимальна кількість балів за екзамен $30 + 10 = 40 \text{ балів}$.

Критерії оцінювання комп'ютерного тестування:

1 бал – повна вірна відповідь на одне тестове завдання; 0 балів – відповідь невірна або відсутня.

Критерії оцінювання розв'язку практичного завдання:

правильне раціональне рішення (не менше 90% потрібної інформації) – 9...10 балів;
правильне рішення (не менше 70% потрібної інформації, або незначні неточності) – 7...8 балів;
рішення з помилками (не менше 50% потрібної інформації та деякі помилки) – 5...6 балів;
відсутність рішення (менше 50% потрібної інформації та помилки) – менше 5 балів.

Штрафні бали:

додаткове питання з тем лекційного курсу отримують студенти, які не брали участі у роботі певного заняття. Незадовільна відповідь з додаткового питання знижує загальну оцінку на 3 бали.

Розрахунок шкали рейтингу з дисципліни (R_d):

Сума вагових балів контрольних заходів в семестрі (стартовий рейтинг) складає:

$$R_i = r_1 + r_2 + r_3 + r_4.$$

де r_i — рейтингові або вагові бали за кожний вид робіт з дисципліни.

Максимально можливий стартовий рейтинг: $R_c = 6+4+18+32 = 60$ балів.

Необхідною умовою допуску до екзамену є позитивна оцінка з виконання всіх завдань СРС, захист ДКР та стартовий рейтинг не менше $0,4 \times R_c = 24$ балів.

Студенти, які набрали в семестрі рейтинг з дисципліни менше, ніж 24 бали, зобов'язані до початку екзаменаційної сесії підвищити його, інакше вони не допускаються до екзамену з цієї дисципліни і мають академічну заборгованість.

Екзаменаційна складова шкали дорівнює: $R_E = 40$ балів.

Таким чином, максимальна кількість балів за рейтинговою шкалою з дисципліни складає

$$R_D = R_c + R_E = 60 + 40 = 100 \text{ балів.}$$

Таблиця відповідності рейтингових балів оцінкам за університетською шкалою

Кількість балів	Оцінка
100-95	Відмінно
94-85	Дуже добре
84-75	Добре
74-65	Задовільно
64-60	Достатньо
Менше 60	Незадовільно
Не виконані умови допуску	Не допущено

За рішенням кафедри, згідно Тимчасового регламенту проведення семестрового контролю в дистанційному режимі (Наказ № 7/86 від 08.05 2020 року), допускається застосувати підхід щодо виставлення оцінки з кредитного модуля «автоматом» шляхом пропорційного перерахунку стартових балів у підсумкові за 100-бальною шкалою. При цьому обов'язковим залишається виконання студентом умов допуску до екзамену. Студентам, які набрали фактичний стартовий рейтинг не менший, ніж 0,9 від максимально можливого (тобто $R_c \geq 54$), екзаменатор може запропонувати виставити оцінку «Дуже добре». Найвища оцінка «автоматом» не виставляється.

Переведення стартових балів у підсумкові здійснюється за формулою

$$R = 60 + \frac{40 \cdot (R_i - R_D)}{(R_c - R_D)},$$

де R — оцінка за 100-бальною шкалою;

R_i — сума балів, набраних студентом продовж семестру;

R_c — максимальна сума вагових балів контрольних заходів продовж семестру;

R_D — бал допуску до екзамену.

Студенти, які хочуть підвищити оцінку з кредитного модуля, виконують екзаменаційну роботу. При цьому переведення стартових балів у підсумкові не здійснюється.

Робочу програму навчальної дисципліни (силабус):

Складено доцент кафедри, к.т.н., доц. Середа Володимир Володимирович

Ухвалено кафедрою ТПТ (протокол № 16 від 24.06.2021 р.)

Погоджено Методичною комісією ТЕФ (протокол № 11 від 24.06.2021 р.)