



# ФІЗИКА ГОРІННЯ

## Робоча програма навчальної дисципліни (Силабус)

### Реквізити навчальної дисципліни

Рівень вищої освіти	Другий (магістерський)
Галузь знань	10 Природничі науки
Спеціальність	105 Прикладна фізика та наноматеріали
Освітня програма	Прикладна фізика
Статус дисципліни	Вибіркова (цикл професійної підготовки)
Форма навчання	очна (денна)
Рік підготовки, семестр	1 курс, осінній семестр
Обсяг дисципліни	Загальна кількість: (4.5 кр.) 135 год. Лекційних занять: 54 год. Самостійна робота студентів: 81 год.
Семестровий контроль / контрольні заходи	залік, поточний контроль, модульна контрольна робота
Розклад занять	<a href="http://ipt.kpi.ua/navchalnij-protses">http://ipt.kpi.ua/navchalnij-protses</a>
Мова викладання	Українська
Інформація про керівника курсу / викладачів	Лектор: доцент, к.ф.-м.н., доцент Пономаренко Сергій Миколайович ( <a href="mailto:s.ponomarenko@kpi.ua">s.ponomarenko@kpi.ua</a> ).
Розміщення курсу	<a href="http://phes.ipt.kpi.ua/?p=1299">http://phes.ipt.kpi.ua/?p=1299</a>

### Програма навчальної дисципліни

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

XIX століття ознаменувалося відкриттям одного з найважливіших принципів сучасної науки, який призвів до об'єднання різноманітних явищ природи. Згідно з цим принципом, існує величина, яка називається *енергією*, що залишається сталою при будь-яких процесах, що відбуваються в природі. Енергія – це єдина міра руху і взаємодії всіх видів матерії.

Історично склалось так, що найпершим видом енергії, яким оволоділо людство, була теплова енергія, що виділялась в результаті горіння. На його основі горіння виникли нові галузі людської діяльності, наприклад високотемпературний синтез, мирне освоєння космосу, гірничорудна промисловість, нетрадиційні методи отримання нових речовин, ефективні способи обробки матеріалів тощо.

Все це кардинально змінило підхід до горіння і зажадало детального вивчення механізму і характерних особливостей горіння. Виникла наука про горіння і вибуху, що дозволили зрозуміти механізм, основні принципи виникнення і розвитку процесу горіння, а також методи до його припинення.

В результаті вивчення дисципліни «Фізика горіння», у студентів формується цілісне уявлення про основні положення теорії горіння, виникають загальні поняття про процеси горіння, а також від-

бувається отримання навичок, необхідних для кількісної оцінки параметрів, що описують процеси горіння і вибуху що протікають в енергетичних установках.

Після засвоєння навчальної дисципліни мають продемонструвати такі результати навчання:

**знання:** закономірностей процесів горіння твердих, рідких та газоподібних палив;

**уміння:** самостійно формулювати, аналізувати та розв'язувати задачі фізики горіння;

**досвід:** застосування понять методів фізики горіння щодо аналізу роботи та оптимізації елементів конструкцій в енергетичних установках та в експериментальному обладнанні для фізичних досліджень.

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

Для засвоєння матеріалу курсу «Фізика горіння» студенти повинні знати курс фізики в рамках шкільної програми та засвоїти термінологію та поняття курсів:

1. Математичний аналіз;
2. Тензорний аналіз;
3. Хімія;
4. Термодинаміка та молекулярна фізика;
5. Термодинаміка газового потоку.
6. Теорія теплопровідності;
7. Основи конвективного теплообміну;
8. Термодинаміка складних систем.

Отримані практичні навички та засвоєні теоретичні знання під час вивчення навчальної дисципліни «Фізика горіння» можна використовувати в подальшому в навчальних дисциплінах, пов'язаних з теоретичними та практичними аспектами прикладної фізики.

## **3. Зміст навчальної дисципліни**

Розділ 1. Термодинаміка процесів горіння.

Розділ 2. Хімічна кінетика процесів горіння.

Тема 2.1 Основи хімічної кінетики.

Тема 2.2 Ланцюгові реакції в процесах горіння.

Тема 2.3 Механізми утворення оксидів азоту в процесах горіння.

Розділ 3. Гідродинаміка хімічно реагуючих середовищ.

- Диференціальні закони збереження для хімічно реагуючих середовищ та явища переносу.
- Випаровування та горіння крапель рідкого палива.

Розділ 4. Горіння ламінарного потоку.

- Теорія горіння ламінарного попередньо змішаного потоку.
- Теорія ламінарного дифузійного горіння.

Розділ 5. Турбулентне горіння.

Тема 5.1 Турбулентне горіння попередньо змішаних сумішей.

Тема 5.2 Турбулентне дифузійне горіння.

Розділ 6. Теорія займання.

Розділ 7. Горіння твердих тіл.

Тема 7.1 Горіння вугільних частинок.

Тема 7.2 Горіння металів.

Розділ 8. Детонація.

#### 4. Навчальні матеріали та ресурси

Нижче наводиться перелік навчальних матеріалів та ресурсів для засвоєння матеріалу, розглянутого на лекційних заняттях та для додаткового вивчення.

##### Базові

1. Пономаренко С. М. Основы фізики горіння. — НТУУ «КПІ», 2016. — 85 с.
2. Сполдинг Д. Б. Горение и массообмен / пер. Р. Н. Гизатуллин, В. И. Ягодкин. — М. : Машиностроение, 1985. — 237 с.
4. Turns R. S. An Introduction to Combustion : Concepts and Applications. — 3rd ed. — New York : McGraw-Hill, 2012. — 754 p. — ISBN 978-0-07-338019-3.

##### Додаткові

3. Сполдинг Д. Б. Основы теории горения / пер. Л. А. Клячко, М. П. Самозванцева. — М. : ГЭИ, 1959. — 320 с.
5. Liberman M. A. [Introduction to Physics and Chemistry of Combustion: Explosion, Flame, Detonation](#). — 1st ed. — Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008. — ISBN 9783540787587.
6. Law C. K. [Combustion Physics](#). — 1st ed. — CUP, 2006. — ISBN 9780521154215.
7. Peters N. Combustion Theory. — CEFRC Summer School Princeton, 2010.
8. Glassman I., Yetter R. A. Combustion. — 4-е вид. — Academic Press, 2008. — 794 с. — ISBN 9780120885732.
9. Варнатц Ю., Маас У., Диббл Р. [Горение. Физические и химические аспекты, моделирование, эксперименты, образование загрязняющих веществ](#). — Физматлит, 2003. — ISBN 3540677518.
10. Зельдович Я. Б., Баренблатт Г. И., Либрович В. Б., Махвиладзе Г. М. [Математическая теория горения и взрыва](#). — Наука, 1980.

#### Навчальний контент

#### 5. Методика опанування навчальної дисципліни (освітнього компонента)

##### Лекційні заняття

№	Назва теми лекції та перелік основних питань
Розділ 1. Термодинаміка процесів горіння.	
1.	<b>Основні поняття та означення теорії горіння.</b> Основні поняття фізики горіння. Історія науки про горіння. Класифікація процесів горіння. Основні області застосування процесів горіння. [1, Глава 1], [2, Глава 1]

№	Назва теми лекції та перелік основних питань
2.	<b>Застосування законів термодинаміки до процесів горіння.</b> Основи термодинамічних розрахунків. Ентальпія формування та ентальпія горіння. Вища та нижча теплоти згорання та методи їх визначення.
3.	<b>Газові суміші та їх характеристики.</b> Розрахунок стехіометричного коефіцієнту. Коефіцієнт надлишку палива. Параметр змішування [1, Глава 2], [3, Глава 1]
4.	<b>Рівновага в реагуючих сумішах.</b> Критерії рівноваги термодинамічної системи. Рівновага в газових сумішах. Хімічний потенціал. Адіабатична температура полум'я. Приклад розрахунку рівноваги в водне-повітряній суміші. Закономірності теплового вибуху. Перетворення Франка-Каменецького. Адіабатичний тепловий вибух. Стаціонарний тепловий вибух в неадіабатичних умовах. [1, Глава 2], [3, Глава 1]
<b>Розділ 2. Хімічна кінетика процесів горіння.</b>	
5.	<b>Хімічна кінетика.</b> Швидкість хімічної реакції. Закон Ареніуса. Елементарні реакції, молекулярність реакції. Механізми реакцій. Проста реагуюча хімічна система. Закономірності ланцюгових реакцій на прикладі реакції горіння водню в атмосфері кисню $H_2 + O_2 \longrightarrow \frac{1}{2} H_2O$ . [1, Глава 2]
<b>Розділ 3. Гідродинаміка хімічно реагуючих середовищ.</b>	
6.	<b>Теорія масообміну.</b> Диференціальні рівняння теорії масообміну. Закон Фіка. Стефанівський потік. Поняття скаляру, що зберігається. Математична модель випаровування краплі рідини. Параметр Сполдінга для масообміну. [1, Глава 3], [2, Глава 2, 3], [3, Глава 3, 4]
7.	<b>Енергообмінні процеси при горіння</b> Диференціальні рівняння теорії переносу енергії. Закон Фур'є. Рівняння Шваба-Зельдовича. Випаровування краплі рідини з позицій енергообміну. Швидкість випаровування. Математична модель випаровування краплі рідини. Число Льюїса. Параметр Сполдінга для енергообміну. Горіння краплі рідини. Швидкість горіння. Радіус полум'я. Дифузійно-кінетична модель горіння частинки вуглецю. [1, Глава 4], [2, Глава 4 – 7], [3, Глава 3, 4]
<b>Розділ 4. Горіння ламінарного потоку.</b>	
8.	<b>Структура ламінарного полум'я.</b> Характеристики розповсюдження полум'я. Теорія ламінарного полум'я школи М. М. Семенова. Залежність швидкості горіння від властивостей реагентів. Межі поширення горіння. Відрив і проскок полум'я. Стійкість горіння. [1, Глава 6], [2, Глава 10]
9.	<b>Горіння попередньо перемішаних сумішей (кінетичне горіння)</b> Горіння гомогенних газофазних горючих сумішей. Математична модель. Нормальна швидкість горіння. Нормальна швидкість горіння. Ширина зони прогріву. Залежності цих величин від тиску та температури. Способи вимірювання нормальної швидкості горіння. [1, Глава 6], [2, Глава 18]
10.	<b>Дифузійне горіння.</b> Ламінарний струмінь та його структура. Диференціальні рівняння, що описують струмінь. Розподіл температури та швидкості в струмені. Ламінарне дифузійне полум'я. Диференціальні рівняння, що описують полум'я. Задача Бурке-Шумана. Форма полум'я. Принцип регулювання довжини факела. [1, Глава 5], [2, Глава 9]
<b>Розділ 5. Турбулентне горіння.</b>	
<b>Розділ 7.1. Турбулентне горіння попередньо змішаних сумішей.</b>	
11.	<b>Структура турбулентного полум'я.</b> Цілі і задачі теорії турбулентного горіння. Режими турбулентного горіння перемішаних реагентів. Швидкість турбулентного полум'я. Стабілізація полум'я. Теорія і експерименти Дамкелера та теорія Щолькіна. Швидкість вигорання реагентів в турбулентному полум'ї. Інші моделі турбулентного горіння перемішаних реагентів. [2, Глава 11, 12]
<b>Розділ 7.2. Турбулентне дифузійне горіння.</b>	
12.	<b>Факельне горіння.</b> Класифікація режимів турбулентного дифузійного горіння. Довжина факела. Статистичний підхід до опису турбулентного дифузійного горіння.

№	Назва теми лекції та перелік основних питань
Розділ 6. Теорія займання.	
13.	<b>Вимушене займання.</b> Якісна теорія запалювання нагрітим тілом. Кількісна теорія запалювання нагрітим тілом. [1, Глава 8], [2, Глава 19]
Розділ 7. Горіння твердих тіл.	
14.	<b>Горіння пористих частинок.</b> Горіння вугільного пилу. [2, Глава 20]
Розділ 8. Детонація.	
15.	<b>Механізми детонації.</b> Одновимірний аналіз. Детонаційна адіабата. Модель Чепмена—Жуге. Модель Зельдовича, Неймана та Дьорінга (ZND). Детонація в техніці.

## 6. Самостійна робота студента

Самостійна робота студентів має на меті розвиток творчих здібностей та активізація їх розумової діяльності, формування потреби безперервного самостійного поповнення знань та розвиток морально-вольових зусиль. Завданням самостійної роботи студентів є навчити студентів самостійно працювати з літературою, творчо сприймати навчальний матеріал і осмислювати його та формування навичок до щоденної роботи з метою одержання та узагальнення знань, умінь і навичок.

На самостійну роботу відводяться наступні види завдань:

- обробка і осмислення інформації, отриманої безпосередньо на заняттях;
- робота з відповідними підручниками та особистим конспектом лекцій;
- самостійне вивчення окремих тем або питань із розробкою конспекту;
- підготовка до МКР;
- підготовка до складання семестрового контролю.

## Політика та контроль

## 7. Політика навчальної дисципліни (освітнього компонента)

### Відвідування занять

Відвідування лекцій, а також відсутність на них, не оцінюється. Однак, студентам рекомендується відвідувати заняття, оскільки на них викладається теоретичний матеріал та розвиваються навички, необхідні для успішного складання заліку. В разі великої кількості пропусків студент може бути недопущений до заліку.

### Пропущені контрольні заходи

Результат модульної контрольної роботи для студента, який не з'явився на контрольний захід, є нульовим. У такому разі, студент має можливість написати модульну контрольну роботу, але максимальний бал за неї буде дорівнювати 50 % від загальної кількості балів. Повторне написання модульної контрольної роботи не допускається.

## Календарний рубіжний контроль

Проміжна атестація студентів (далі — атестація) є календарним рубіжним контролем. Метою проведення атестації є підвищення якості навчання студентів та моніторинг виконання графіка освітнього процесу студентами<sup>1</sup>.

Термін атестації	Перша атестація 8-й тиждень	Друга атестація 14-й тиждень
Критерій: поточний контроль	≥ 20 балів	≥ 30 балів

## Академічна доброчесність

Політика та принципи академічної доброчесності визначені у розділі 3 Кодексу честі Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». Детальніше: <https://kpi.ua/code>.

## Норми етичної поведінки

Норми етичної поведінки студентів і працівників визначені у розділі 2 Кодексу честі Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». Детальніше: <https://kpi.ua/code>.

## Процедура оскарження результатів контрольних заходів

Студенти мають можливість підняти будь-яке питання, яке стосується процедури контрольних заходів та очікувати, що воно буде розглянуто згідно із наперед визначеними процедурами (згідно «Положення про систему забезпечення якості вищої освіти у Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», «Положення про організацію навчального процесу»).

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

Видами контролю успішності засвоєння матеріалу дисципліни є модульна контрольна робота (МКР), розрахунково-графічна робота (РГР) та семестровий контроль.

### Бліц-опитування на лекційних заняттях

На початку заняття проводиться бліц-опитування, за відповідь на запитання якого, студент може отримати максимум 2 бали.

### Модульна контрольна робота

Модульна контрольна робота проводиться після завершення першої частини курсу «Фізика горіння» проводиться протягом 2-х академічних годин на практичних заняттях. Вона складається з 4 задач і передбачає письмовий розв'язок задачі, подібних до тих, що розглядалися на практичних заняттях та під час виконання домашніх робіт.

Оцінюється за чіткими критеріями з позначенням коректної або некоректної відповіді, а також з коментарями, зауваженнями тощо. Критерії оцінювання модульної контрольної роботи:

<sup>1</sup>Рейтингові системи оцінювання результатів навчання: Рекомендації до розроблення і застосування. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. 20 с.

- максимальна кількість балів за кожне питання – повна правильна відповідь, 95% інформації, там де треба наведено рисунки, позначення, є письмовий коментар щодо базових понять та законів, які використовуються під час розв'язку задачі,
- 75% — розв'язок правильний, не всі умови попереднього пункту виконано,
- 60% — наведено основні базові поняття для розв'язку, розв'язок неправильний.
- списані відповіді, які студент не може пояснити, не зараховуються.

## Умови допуску до заліку

В таблиці наведені умови допуску до семестрового контролю.

№	Обов'язкова умова допуску до заліку	Критерій
1	Поточний рейтинговий бал	$\geq 40$
2	МКР	виконана
3	РГР	здана

Додаткові умови допуску до заліку, які заохочуються:

- Залучення при виконанні РГР нових програмних засобів та застосунків для візуалізації результатів обрахунків, оптимізації обрахунків, використання оригінальних методик (додаються заохочувальні бали).
- Активна самостійна робота над теоретичним матеріалом: пошук та використання інформаційних ресурсів, ілюстрацій, відео, медіа ресурсів, що доповнюють поточний курс (додаються заохочувальні бали).
- Позитивний результат першої та другої атестації.

## Семестровий контроль (залік)

залік приймається усно на останньому занятті у вигляді співбесіди. На співбесіді задається 2 питання, за кожне з яких студент отримує 20. Максимальний бал за залік дорівнює 40.

Загальна оцінка за залік складається із стартового рейтингу, отриманого протягом семестру, та рейтингових балів набраних під час заліку. Бали за кожне з питань залік нараховуються згідно наступних критеріїв:

- від 15 до 20 — повна правильна відповідь, 95% інформації, наведено рисунки, позначення, є письмовий коментар щодо базових понять та законів, формулювання та терміни точні, терміни роз'яснено, повна правильна відповідь на уточнюючі запитання
- від 10 до 15 — правильна відповідь, 80% інформації, наведено рисунки, позначення, є письмові коментарі щодо базових понять та законів, формулювання та терміни по суті правильні але не повні, терміни роз'яснено, правильна відповідь на уточнюючі запитання
- від 5 до 10 — по суті правильна але неповна відповідь, 70% інформації, наведено рисунки та позначення, відсутні письмові коментарі щодо базових понять та законів, формулювання та терміни по суті правильні але не повні, терміни не роз'яснено, правильна відповідь на більшість уточнюючих запитання
- від 0 до 5 — відповідь неповна, 50% інформації, не наведено рисунки та позначення, відсутні письмові коментарі щодо базових понять та законів, формулювання та терміни в основному правильні але не повні, терміни не роз'яснено, відповіді на уточнюючі запитання не повні

Остаточна оцінка **RD** є сумою рейтингових балів отриманих за поточний контроль та балів отриманих на заліку після співбесіди зі студентом.

№	Контрольний захід	Бал	Кількість	Всього
1	Бліц-опитування на лекціях	2	25	50
2	Модульна контрольна робота	10	1	10
3	залік	40	1	40
Всього				100

Таблиця відповідності рейтингових балів оцінкам за університетською шкалою.

Значення рейтингу	Оцінка ECTS
$95 \leq \mathbf{RD} \leq 100$	відмінно
$85 \leq \mathbf{RD} < 95$	дуже добре
$75 \leq \mathbf{RD} < 85$	добре
$65 \leq \mathbf{RD} < 75$	задовільно
$60 \leq \mathbf{RD} < 65$	достатньо
$\mathbf{RD} < 60$	незадовільно
Не здана МКР	не допущено

**Робочу програму навчальної дисципліни (силабус):**

**Складено:** \_\_\_\_\_ доцент, к.ф.-м.н., доцент Пономаренко Сергій Миколайович  
(посада, науковий ступінь, вчене звання, ПІБ)

**Ухвалено:** кафедрою фізики енергетичних систем (протокол № 2 від 4 вересня 2020 р.)  
(повна назва кафедри)

**Затверджено:** Вченою радою ФТІ (протокол № 7/1 від 7 вересня 2020 р.)  
(назва факультету/інституту)