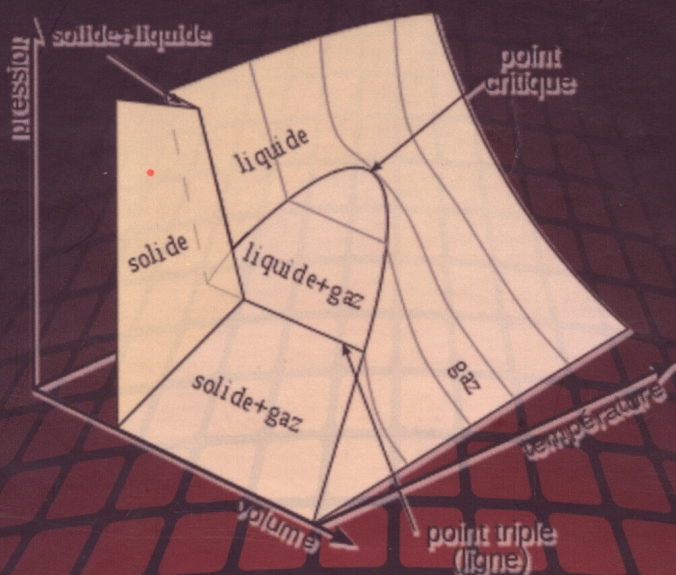


В.П. Желєзний, В.З. Геллер, Ю.В. Семенюк

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ТЕПЛОФІЗИКА

Методи дослідження
теплофізичних властивостей речовин



МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Одеська національна академія харчових технологій

В.П. Желєзний, В.З. Геллер, Ю.В. Семенюк

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ТЕПЛОФІЗИКА

Методи дослідження
теплофізичних властивостей речовин

Підручник

Одеса

«Фенікс»

2016

УДК 536.24(075)

ББК 22.365.5я73

Ж 511

Автори:

Железний В.П. – доктор технічних наук, професор;

Геллер В.З. – доктор технічних наук, професор;

Семенюк Ю.В. – доктор технічних наук, доцент.

Рекомендовано до друку Вченою Радою Одеської національної академії харчових технологій. Протокол № 6 від 18 грудня 2015 р.

Рецензенти:

доктор технічних наук, професор, заступник директора з наукової роботи Фізико-хімічного інституту ім. О.В. Богатського НАН України **В.І. Недоступ**;

доктор фіз.-мат. наук, професор, зав. кафедри теплофізики Одеського національного університету ім. І.І. Мечникова **В.В. Калінчак**;

доктор технічних наук, професор, зав. кафедри теплоенергетики та трубопровідного транспорту енергоносіїв Одеської національної академії харчових технологій

О.С. Тітлов

Железний В.П.

Ж 511 Експериментальна теплофізика. Методи дослідження теплофізичних властивостей речовин : підручник / В.П. Железний, В.З. Геллер, Ю.В. Семенюк. – Одеса : Фенікс, 2016. – 320 с.

ISBN 978-966-928-034-3

У підручнику викладено інформацію про методи експериментального дослідження теплофізичних властивостей речовин - параметрів фазової рівноваги у чистих речовинах та сумішах, термічних, калоричних, поверхневих, транспортних властивостей – та реалізацію цих методів через створення відповідних експериментальних установок. Викладаються особливості досліджень речовин у різних агрегатних станах і в широких діапазонах параметрів стану - від наднизьких до високих тисків та від криогенних до високих температур.

Призначено для студентів та аспірантів спеціальностей «Теплоенергетика» і «Прикладна фізика та наноматеріали».

УДК 536

ББК 22.365.5я73

Навчальне видання

Железний Віталій Петрович, Геллер Володимир Зіновійович, Семенюк Юрій Володимирович
Експериментальна теплофізика.

Методи дослідження теплофізичних властивостей речовин

Підручник

Підписано до друку 27.06.2016 р.

Формат 60х84/16. Ум.-друк. арк. 18,66. Тираж 60 прим. Зам. 1607-08.

Видавець і виготовлювач ПП «Фенікс»

(Свідцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 1044 від 17.09.02).

Україна, м. Одеса, 65009, вул. Зоопаркова, 25. Тел. (048) 7777-591.

e-mail: fenix-izd@ukr.net

ISBN 978-966-928-034-3

© В.П. Железний, В.З. Геллер,

Ю.В. Семенюк, 2016

ЗМІСТ

ВСТУП.....	9
1 ЗАГАЛЬНІ ПОНЯТТЯ ПРО ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИЙ МЕТОД ВИВЧЕННЯ ТЕПЛОФІЗИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ РЕЧОВИН.....	10
1.1 Функції експерименту.....	10
1.2 Загальні риси експериментальних досліджень.....	11
1.3 Визначення та терміни в експериментальній теплофізиці.....	12
1.4 Етапи експериментального дослідження теплофізичних властивостей речовин.....	14
1.5 Структурна схема експериментальної установки.....	15
2 КЛАСИФІКАЦІЯ ТЕПЛОФІЗИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ РЕЧОВИН.....	18
2.1 Термодинамічні властивості речовин.....	18
2.1.1 Термічні властивості речовин.....	18
2.1.2 Калоричні властивості речовин.....	19
2.2 Транспортні властивості речовин.....	20
2.3 Поверхневі властивості речовин.....	21
2.4 Електрофізичні властивості речовин.....	22
3 МЕТОДИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ ФАЗОВИХ РІВНОВАГ.....	23
3.1 Дослідження тиску насиченої пари при сублімації.....	36
3.1.1 Метод випаровування з відкритої поверхні (метод Ленгмюра)...	37
3.1.2 Ефузійний метод (метод Кнудсена).....	40
3.2 Методи визначення температури плавлення.....	45
3.2.1 Визначення температури плавлення при атмосферному тиску...	46
3.2.1.1 Метод термограм.....	46
3.2.1.2 Метод диференціального термічного аналізу (ДТА).....	48
3.2.2 Методи визначення Р-Т залежності при плавленні у широких діапазонах параметрів стану.....	50
3.2.2.1 Метод запаяної скляної ампули.....	50
3.2.2.2 Метод вимірювання температури плавлення у п'єзометрі постійного об'єму.....	51
3.3 Методи дослідження температури кипіння і тиску насиченої пари чистих речовин.....	54
3.3.1 Статичні методи дослідження температури кипіння і тиску насиченої пари чистих речовин.....	54
3.3.2 Динамічні методи дослідження температури кипіння і тиску насиченої пари чистих речовин.....	60
3.3.2.1 Метод точок кипіння.....	60

3.3.2.2 Гіпсометр.....	62
3.3.2.3 Ебуліометр Котреля.....	62
3.3.2.4 Ебуліометр Свентославського.....	63
3.3.2.5 Диференціальний ебуліометр Свентославського.....	64
3.4 Методи дослідження фазових рівноваг розчинів.....	66
3.4.1 Аналітичні методи дослідження фазових рівноваг (An).....	69
3.4.1.1 Аналітичні ізотермічні методи дослідження фазових рівноваг (AnT).....	70
3.4.1.2 Аналітичні ізобарно-ізотермічні методи дослідження фазових рівноваг (AnPT).....	72
3.4.1.3 Аналітичні ізобарні методи дослідження фазових рівноваг (AnP).....	73
3.4.1.4 Аналітичні методи дослідження фазових рівноваг без відбору проб.....	78
3.4.2 Синтетичні методи дослідження фазових рівноваг (Syn).....	79
3.4.2.1 Синтетичні візуальні методи дослідження фазових рівноваг (SynVis).....	80
3.4.2.2 Синтетичні методи дослідження фазових рівноваг без візуального спостереження (SynNon).....	82
3.4.2.3 Синтетичні ізотермічні методи дослідження фазових рівноваг (SynT).....	84
3.4.2.4 Синтетичні ізобарні методи дослідження фазових рівноваг (SynP).....	85
3.4.2.5 Інші синтетичні методи (SynOth).....	86
3.4.3 Важливі зауваження до методів дослідження фазових рівноваг розчинів.....	87
4 МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ P - V - T ВЛАСТИВОСТЕЙ РЕЧОВИН.....	92
4.1 Методи дослідження густини рідини при нормальних умовах.....	92
4.1.1 Вимірювання густини рідини методом гідростатичного зважування.....	93
4.1.2 Вимірювання густини рідини методом пікнометра.....	97
4.1.3 Вимірювання густини рідини методом ареометра.....	100
4.2 Методи дослідження густини твердих тіл при нормальних умовах....	102
4.2.1 Метод гідростатичного зважування для визначення густини твердих тіл.....	102
4.2.2 Метод пікнометра для визначення густини твердих тіл.....	104
4.2.3 Метод ареометра для визначення густини твердих тіл.....	105
4.2.4 Метод В.В. Лермантова для визначення густини пористих матеріалів.....	107

4.3 Методи визначення густини речовин у широкій зоні параметрів стану.....	108
4.3.1 Основні принципи класифікації методів виміру P - V - T залежності.....	110
4.3.2 Метод п'єзометра змінного об'єму.....	111
4.3.2.1 Установки Амага.....	111
4.3.2.2 Установка Міхельса.....	113
4.3.2.3 Методи визначення питомих об'ємів речовин за переміщенням поршня у п'єзометрі.....	114
4.3.3 Метод п'єзометра постійного об'єму.....	115
4.3.4 Методи дослідження критичних явищ.....	117
4.3.4.1 Дослідження стискальності у навіолокритичній зоні.....	118
4.3.4.2 Методи дослідження критичних параметрів, засновані на оптичних спостереженнях.....	121
4.3.4.3 Сучасні методи дослідження критичних явищ.....	124
5 КАЛОРИМЕТРІЯ.....	128
5.1 Основні поняття калориметрії. Теорія і методи калориметрії.....	128
5.1.1 Типи калориметрів.....	128
5.1.2 Основні елементи калориметрів.....	129
5.1.3 Теплове значення калориметра.....	131
5.1.4 Основне рівняння калориметричної системи.....	132
5.1.5 Методика проведення калориметричного дослідження.....	133
5.1.6 Приклади калориметричних пристроїв.....	139
5.1.6.1 Масивний калориметр змінної температури з ізотермічною оболонкою.....	140
5.1.6.2 Калориметр змінної температури з адіабатною оболонкою.....	141
5.1.6.3 Диференціальний калориметр змінної температури з ізотермічною оболонкою.....	143
5.1.6.4 Калориметри постійної температури.....	144
5.1.6.5 Методи введення теплоти в калориметр.....	150
5.2 Методи дослідження теплоємності речовин.....	152
5.2.1 Прямі методи виміру ізобарної теплоємності речовин.....	153
5.2.1.1 Метод безпосереднього нагрівання.....	153
5.2.1.2 Метод змішування для виміру ізобарної теплоємності твердих тіл.....	155
5.2.1.3 Метод змішування для виміру ізобарної теплоємності рідин.....	156

5.2.1.4 Метод змішування для виміру ізобарної теплоємності газів.....	157
5.2.1.5 Метод протоки для виміру ізобарної теплоємності рідин.....	158
5.2.2 Методи дослідження ізохорної теплоємності речовин.....	163
5.2.2.1 Метод вибуху для виміру ізохорної теплоємності речовин.....	163
5.2.2.2 Непрямі методи визначення ізохорної теплоємності речовин.....	164
5.3 Дослідження процесів дроселювання речовин.....	165
5.3.1 Експериментальне дослідження ізотермічного дроселювання.....	166
5.3.2 Експериментальне дослідження адіабатного дроселювання.....	168
5.4 Експериментальне дослідження теплоти фазових переходів.....	169
5.4.1 Експериментальні методи визначення теплоти плавлення.....	170
5.4.2 Експериментальні методи визначення теплоти паротворення.....	172
6 МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ ПОВЕРХНЕВИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ РЕЧОВИН.....	181
6.1 Основні поняття й визначення.....	181
6.2 Вибір експериментального методу дослідження поверхневого натягу рідин.....	182
6.3 Метод максимального тиску в бульбашці.....	184
6.4 Метод зважування крапель.....	187
6.5 Метод відриву кільця.....	188
6.6 Метод лежачої (завислої) краплі.....	189
6.7 Метод капілярного підняття.....	191
6.8 Динамічні методи виміру поверхневого натягу рідин.....	194
6.8.1 Проточні методи (метод коливного струменя).....	194
6.8.2 Метод капілярних хвиль.....	195
6.9 Методи дослідження крайових кутів змочування.....	195
7 МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ В'ЯЗКОСТІ РЕЧОВИН.....	198
7.1 Загальні принципи методів виміру в'язкості речовин.....	198
7.2 Метод капіляра для виміру в'язкості речовин.....	200
7.2.1 Теоретичні засади методу капіляра для виміру в'язкості речовин.....	200
7.2.2 Поправки до показів капілярних віскозиметрів.....	204
7.2.2.1 Поправка на ковзання у пристінному шарі.....	204
7.2.2.2 Поправка на стисливість речовини.....	206
7.2.2.3 Поправка на кінетичну енергію потоку.....	208
7.2.2.4 Фізичні і геометричні види поправок до показів капілярних віскозиметрів.....	211

7.3 Застосовувані типи віскозиметрів.....	211
7.3.1 Віскозиметр Ренкіна.....	212
7.3.2 Віскозиметр Оствальда.....	213
7.3.3 Віскозиметр із висячим рівнем.....	214
7.3.4 Віскозиметр Д.Л. Тімрота.....	215
7.3.5 Віскозиметр І.Ф. Голубева.....	216
7.3.6 Метод вантажу, що падає.....	217
7.3.7 Метод кульки, що котиться.....	218
7.3.8 Ротаційні методи.....	219
7.3.9 Метод обертання циліндрів.....	219
7.3.10 Нестационарні методи дослідження в'язкості рідин і газів.....	220
8 МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛОПРОВІДНОСТІ РЕЧОВИН.....	224
8.1 Закон Фур'є. Диференціальне рівняння теплопровідності.....	224
8.2 Способи визначення кількості теплоти, підведеної до вимірювального осередку.....	232
8.2.1 Метод безпосереднього вимірювання потужності.....	232
8.2.2 Калориметричний метод.....	233
8.3 Стаціонарні методи дослідження теплопровідності.....	234
8.3.1 Метод плоского горизонтального шару.....	234
8.3.2 Метод коаксіальних циліндрів.....	237
8.3.3 Метод нагрітого дроту (нитки).....	239
8.3.4 Метод сферичного шару.....	240
8.4 Уведення поправок і облік похибок при вимірі теплопровідності стаціонарними методами.....	241
8.4.1 Кінцеві втрати теплоти.....	242
8.4.2 Облік променистого теплообміну.....	244
8.4.3 Облік конвективної складової теплообміну.....	245
8.4.4 Врахування ексцентриситету робочих поверхонь вимірювального осередку.....	247
8.4.5 Облік температурного стрибка на поверхнях вимірювального осередку.....	247
8.4.6 Вплив термодифузії на теплопровідність газових сумішей.....	251
8.5 Нестационарні методи дослідження теплопровідності.....	252
8.5.1 Нестационарний метод нагрітої нитки.....	252
8.5.2 Методи регулярного теплового режиму.....	255
8.5.2.1 Метод регулярного теплового режиму першого роду.....	255
8.5.2.2 Метод регулярного теплового режиму другого роду для виміру температуропровідності.....	259
8.5.2.3 Метод регулярного теплового режиму третього роду.....	260

8.5.2.4 Метод безперервного нагрівання зі змінною швидкістю..	261
8.6 Метод ударних хвиль для дослідження газодинамічних властивостей речовин при високих температурах і тисках.....	264
9 МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ ДИФУЗІЇ.....	271
9.1 Основні поняття і визначення.....	271
9.2 Закони Фіка.....	274
9.3 Методи експериментального дослідження взаємної дифузії.....	279
9.3.1 Нестационарні методи дослідження взаємної дифузії.....	279
9.3.2 Квазістационарні методи дослідження взаємної дифузії.....	280
9.3.3 Стационарні (проточні) методи дослідження взаємної дифузії...	283
9.4 Особливості процесу дифузії в рідинах. Методи визначення коефіцієнтів молекулярної дифузії в системі рідина-рідина.....	284
9.4.1 Метод пористої діафрагми.....	284
9.4.2 Кондуктометричний метод.....	286
9.4.3 Оптичні (інтерференційні) методи.....	287
9.4.3.1 Основи інтерференційної мікроскопії.....	287
9.4.3.2 Метод колімованого пучка світла.....	289
9.4.3.3 Метод розділення світлового пучка.....	291
9.4.3.4 Метод поляризованого світлового пучка.....	292
9.5 Самодифузія. Методи визначення коефіцієнтів самодифузії.....	293
9.5.1 Метод мічених атомів.....	293
9.5.2 Метод ядерного магнітного резонансу (ЯМР).....	294
9.5.2.1 Фізичні основи ЯМР і ЯМР-спектроскопія.....	294
9.5.2.2 ЯМР-метод виміру коефіцієнта самодифузії з постійним градієнтом магнітного поля.....	297
9.5.3 Нейтронний метод.....	299
ЛІТЕРАТУРА.....	301
ДОДАТОК: ТЕРМІНИ І ВИЗНАЧЕННЯ ТЕРМОДИНАМІКИ.....	307

ВСТУП

Дисципліна «Експериментальна теплофізика» традиційно є однією з основних у циклі професійної підготовки бакалаврів і магістрів за спеціальністю «Теплоенергетика». Пропонований у цьому підручнику матеріал також стане у нагоді і при підготовці студентів, що навчатимуться за новою спеціальністю «Прикладна фізика та наноматеріали», яку уведено Постановою Кабінету Міністрів України № 266 від 29 квітня 2015 р. «Про затвердження переліку галузей знань і спеціальностей, за якими здійснюється підготовка здобувачів вищої освіти».

Мета викладання дисципліни полягає у вивченні експериментальних методів дослідження теплофізичних властивостей речовин, а саме - теоретичних засад цих методів та практичних способів і засобів їх реалізації.

Вивчення даної дисципліни сприяє підготовці до наукової діяльності експериментального характеру, дозволяє прищепити навички самостійного розв'язання конкретних завдань із дослідження теплофізичних властивостей речовин для безпосереднього використання у науково-дослідній роботі, курсовому проектуванні та при виконанні кваліфікаційних робіт.

Змістом дисципліни «Експериментальна теплофізика» є інформація про методи експериментального дослідження теплофізичних властивостей речовин та рекомендації щодо реалізації цих методів через створення відповідних експериментальних установок.

У курсі вивчаються теоретичні засади методів, будова дослідницьких пристроїв (вимірювальних осередків), окремих систем експериментальних установок, принципи компоновки їх у вимірювальні комплекси, прищеплюються навички складання методики проведення експерименту та обробки емпіричної інформації.

Розглядаються питання, що охоплюють практично увесь спектр теплофізичних властивостей індивідуальних речовин та сумішей: параметри фазової рівноваги; термічні властивості; калоричні властивості (теплоємність, теплоти фазових переходів, дросель-ефекти); поверхневі властивості (поверхневий натяг, крайовий кут змочування); транспортні властивості (теплопровідність, температуропровідність, в'язкість, дифузія).

Викладаються особливості досліджень речовин у різних агрегатних станах і в широких діапазонах параметрів стану - від наднизьких до високих тисків та від криогенних до високих температур.

У підручнику використовуються результати й досвід досліджень, набуті авторами з колегами у лабораторіях кафедри теплофізики та прикладної екології Одеської національної академії харчових технологій.