

А. О. РЕДЬКО, М. К. БЕЗРОДНИЙ, М. В. ЗАГОРУЧЕНКО,
Г. С. РАТУШНЯК, О. Ф. РЕДЬКО, М. Г. ХМЕЛЬНЮК

НИЗЬКОПОТЕНЦІЙНА ЕНЕРГЕТИКА

Рекомендовано
Міністерством освіти і науки України
як навчальний посібник для студентів
вищих навчальних закладів

УДК 621.56(57),621.48

ББК 31.3

Н 61

Рецензенти:

Фіалко Н. М. доктор технічних наук, професор, завідувач відділу Інституту технічної теплофізики НАН України, член-кореспондент НАН України;

Малкін Е. С. доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри Теплотехніки Київського національного університету будівництва та архітектури;

Радченко М. І. доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри Кондиціонування і рефрижерації Національного університету кораблебудування ім. адмірала Макарова

Низькопотенційна енергетика: навчальний посібник / А. О. Редько та ін.; Під ред. академіка НАНУ А. А. Долинського. – Харків: ТОВ «Друкарня Мадрид», 2016. – 412 с.

Значне розширення інженерного застосування процесів та техніки використання нетрадиційних та відновлювальних джерел енергії, утилізаційних енергетичних систем визначили необхідність поглибленої підготовки фахівців у цьому напрямі в рамках спеціального курсу «Низькопотенційна енергетика». Теоретичною основою є технічна термодинаміка та методи термодинамічного аналізу. Для кращого засвоєння фізичного змісту матеріалу та результатів аналізу та висновків, що стосуються основних положень, в посібнику наведені приклади їх практичного застосування.

Зміст навчального посібника формувався з урахуванням нових напрямків інженерного використання технічної термодинаміки та енергетики. До них відноситься більш поглиблене вивчення спеціальних питань використання нетрадиційних та відновлювальних джерел енергії, вторинних енергоресурсів.

Для глибокого вивчення наводяться методи термодинаміки та термодинамічного аналізу, що є важливою складовою в діяльності сучасного спеціаліста.

Зміст рукопису відповідає навчальним програмам вищевказаних дисциплін і стандартам вищої освіти сучасним досягненням науки і техніки, вимогам до підручників та навчальних посібників, тобто рівню професійної підготовки фахівця-енергетика. Підбір навчального матеріалу розділів, глав і підрозділів повністю відповідає професійному рівню та умінню фахівця-енергетика, викладеним в освітньо-кваліфікаційній характеристиці.

Навчальний посібник «Низькопотенційна енергетика» буде корисний студентам вищих технічних навчальних закладів для більш глибокого вивчення дисциплін «Нетрадиційні та відновлювальні джерела енергії», «Теплонасосні установки» та «Використання вторинних енергетичних ресурсів у теплопостачанні».

ISBN 978-617-7050-57-4

© А. О. Редько, М. К. Безродний, М. В. Загорученко,
О. Ф. Редько, Г. С. Ратушняк, М. Г. Хмельнюк, 2016
© ТОВ «Друкарня Мадрид», 2016

ЛІТЕРАТУРА

- 8.1. Использование вторичных энергоресурсов на металлургических предприятиях Украины / В. А. Ботштейн, А. Л. Каневский, В. Г. Литвиненко, А. Л. Скоромный // Экология и промышленность. – 2011. – № 1. – С. 85–90.
- 8.2. Нейман В. К., Судаков С. Д. и др. Утилизация низкопотенциальных тепловых вторичных энергоресурсов на химических предприятиях. – М: Химия, 1987. – 240 с.
- 8.3. Гичев Ю. А. Вторичные энергоресурсы промышленных предприятий: Днепропетровск, НМетАУ, 2012. – 5 с.
- 8.4. Основные методические положения по планированию использования вторичных энергетических ресурсов. НИИ планирования и нормативов. – М.: Энергоатомиздат, 1987.
- 8.5. Суровцев И. Г., Арбеков А. Н. Применение сверхкритических углекислотных циклов в установках по утилизации промышленной теплоты. – Наука и образование. – 2013. № 2. – М.: МВГУ им. Н. Е. Баумана. С. 335–344.
- 8.6. Редько А. А. Термодинамическая эффективность процессов преобразования низкопотенциальной теплоты в энергетических установках с органическим теплоносителем. – Доповіді НАНУ. – 2013. № 3. – С. 71–75.
- 8.7. Бухаркин Е. Н. Совместная выработка электрической и тепловой энергии в водогрейных и паровых котлах. // Промышленная энергетика, 2004. – № 12. С. 44–47.
- 8.8. Басок Б. И., Базеев Е. Г., Диденко В. М., Коломейко Д. А. Анализ когенерационных установок. 1. Классификация и основные показатели. // Промышленная теплотехника. – 2006. Т. 28. – №3. С. 83–89.
- 8.9. Басок Б. И., Коломейко Д. А. Анализ когенерационных установок. 2. Анализ энергетической эффективности // Промышленная теплотехника. – 2006. Т. 28. – №4. С. 79–83.
- 8.10. Степаненко В. Реконструкция промышленной энергетики Украины в 21 веке – ЭСКО, 2005. – № 7
- 8.11. Долинський А. А., Басок Б. И., Коломейко Д. А. Эффективность когенерационных тепловых схем. К.: ИТТР. – Т. 61. вып. 4в. – 2008. – С. 30–38.
- 8.12. Барков В. М. Когенераторные технологии: возможности и перспективы. «ЭСКО» электронный журнал энергосервисной компании // Экологические системы. – № 7. – 2004.
- 8.13. Лейтес Н. Л., Сосна М. Х. Семенов В. П. Теория и практика химической энерготехнологии. – М.: Химия, 1998. – 280 с.
- 8.14. Лисицын Н. В. Оптимизация нефтеперерабатывающего производства. – СПб: Химиздат, 2003. – 184 с.

- 8.15. Конь М. Я., Зелькинд Е. М., Шершун В. Г. «Нефтеперерабатывающая и нефтехимическая промышленность за рубежом». – М.: Химия, 1996. – 184 с.
- 8.16. Нормы технологического проектирования газоперерабатывающих заводов. – РД 51-1-95.
- 8.17. Долотовський І. В., Є. А. Ларин, Долотовський І. В., Н. В. Долотовська. Энергетический комплекс газоперерабатывающих предприятий. Системный анализ, моделирование, нормирование. – М.: Энергоатомиздат, 2008. – 440.
- 8.18. Коломиец О. П. Целесообразность использования низкопотенциальной теплоты шахтных вод и вентиляционного воздуха для обеспечения теплоэнергетических потребностей предприятий подземного Кривбасса. // Разработка рудных месторождений вып. № 93. – 2010. – С. 1–5
- 8.19. Андреев А. А., Самохвалов В. С., Смагин Д. Н., Цвиклис В. С. Современное состояние систем глубокой утилизации вторичных энергоресурсов судовых дизельных установок // Збірник наукових праць УДМТУ. – Миколаїв: УДМТУ, 2002. – №5 – (283). – С. 66–76
- 8.20. Андреев А. А., Калиниченко І. В. Экологическая и энергетическая целесообразность утилизации низкопотенциальной теплоты на судах с помощью теплового насоса. Збірник наукових праць УДМТУ. – Миколаїв: УДМТУ, 2007. Вип. № 72, Т. 85. – С. 23–27.
- 8.21. Пирашвили Ш. А., Шувалов В. В., Жорник М. Н. Термотрансформаторы. – Рыбинск, 2002. – 127 с.
- 8.22. Ткаченко С. Й., Остапенко О. П. Парокомпресійні теплонасосні установки в системах теплопостачання. – Вінниця, ВНТУ. – 2009. – 175 с.
- 8.23. Когенерационные технологии в энергетике на основе применения паровых турбин малой мощности / А. Л. Шубенко, В. А. Маляренко, А. В. Сенецкий, Н. Ю. Бабак. – Х.: Ин-т пробл. машиностроения НАНУ, 2014. – 320 с.
- 8.24. Чепурний М. М. Застосування бінарних циклів на ТЕЦ / Чепурний М. М., Антропова О. В. // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2008. – № 3. – С. 37–41.
- 8.25. Кологривов М. И., Сагало Т. А., Бузовський В. П. – Котли-утилизатори / Одеська національна академія харчових технологій. 2015, – 83 с.
- 8.26. Билека Б. Д. Особенности выбора начальных параметров безводного цикла Ренкина для энергетических установок, утилизирующих теплоту приводных газотурбинных установок компрессорных станций / Б. Д. Билека, В. Я. Кабков, Р. В. Сергиенко // Весник двигателестроения. – № 2 – 2011. – С. 138–140.
- 8.27. Притула В. В. Об использовании на газокompрессорных станциях МГ вторичных тепловых ресурсов для производства механической работы / В. В. Притула, М. М. Кологривов, Б. Е. Патон, А. С. Письменный // Холодильная техника и технология, 2007. – № 4. – С. 32–39.

ЗМІСТ

| | |
|------------------------|---|
| ПЕРЕДМОВА | 5 |
|------------------------|---|

РОЗДІЛ 1. ПРОБЛЕМИ ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ І ШТУЧНИЙ ХОЛОД.. 7

| | |
|--|----|
| 1.1. Стратегія енергозбереження в галузі використання штучного холоду ... | 7 |
| 1.2. Основні принципи законодавства України про енергозбереження..... | 9 |
| 1.3. Основи енергоменеджменту і енергоаудиту об'єктів з виробництва штучного холоду..... | 12 |
| 1.4. Методологія енергоаудиту холодильних об'єктів..... | 14 |
| 1.5. Енергозберігаючі холодильні системи..... | 21 |
| 1.5.1. Перетворення енергії у теплових насосах..... | 21 |
| 1.5.2. Режими роботи теплових насосів..... | 27 |
| 1.5.3. Режими експлуатації теплових насосів..... | 31 |
| 1.5.4. Холодоносії (антифризи)..... | 33 |
| 1.5.5. Джерела низькопотенційної теплоти..... | 44 |
| 1.6. Техніко-економічні передумови розвитку теплових насосів..... | 47 |
| Контрольні питання..... | 51 |
| Література..... | 52 |

РОЗДІЛ 2. ОСОБЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ НИЗЬКОТЕМПЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ В ТЕПЛОНАСОСНИХ СИСТЕМАХ ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ 53

| | |
|---|----|
| 2.1. Термодинамічні основи роботи теплонасосних установок..... | 53 |
| 2.2. Атмосферне повітря..... | 60 |
| 2.3. Вентиляційне повітря будівель і споруд..... | 63 |
| 2.3.1. Котеджі та колективні багатоповерхові будівлі..... | 63 |
| 2.3.2. Підземні споруди..... | 65 |
| 2.4. Природна вода..... | 67 |
| 2.4.1. Вода артезіанського походження..... | 67 |
| 2.4.2. Вода відкритих водойм..... | 72 |
| 2.4.3. Використання теплоти поверхневих шарів океанських вод..... | 74 |
| 2.5. Техногенна вода як джерело енергії для ТН..... | 76 |

| | |
|---|-----|
| 2.5.1. Скидна вода ТЕС | 76 |
| 2.5.2. Зворотна мережна вода ТЕЦ | 77 |
| 2.5.3. Каналізаційні стоки | 79 |
| 2.5.4. Вода теплових скидів промислових підприємств | 82 |
| 2.6. Використання теплоти ґрунту | 84 |
| 2.6.1. Горизонтальні ґрунтові теплообмінники | 84 |
| 2.6.2. Вертикальні ґрунтові теплообмінники | 88 |
| 2.7. Використання сонячної енергії для теплових насосів | 89 |
| 2.7.1. Використання сонячної енергії як нижнього джерела теплоти для ТН в системах опалення | 89 |
| 2.7.2. Використання сонячної енергії у верхньому контурі ТН | 92 |
| 2.7.3. Безпосереднє використання сонячної енергії як нижнього джерела теплоти для теплового насоса | 94 |
| 2.8. Використання штучного холоду в геліотехнічних енергозберігаючих системах | 98 |
| 2.9. Використання теплоти кристалізації води для підігрівання повітря перед тепловим насосом | 105 |
| 2.10. Оптимальна глибина використання нижніх джерел теплоти | 105 |
| 2.10.1. Питомі витрати зовнішньої енергії на теплонасосні системи теплопостачання з використанням різних джерел енергії | 106 |
| 2.10.2. Оптимальний ступінь охолодження теплоносія у випарнику ТН при використанні різних джерел теплоти | 108 |
| 2.11. Системи акумулювання і транспортування теплоти | 117 |
| 2.12. Системи з акумулювання холоду | 121 |
| 2.13. Водольодяні акумулятори холоду | 131 |
| Контрольні питання | 133 |
| Література | 134 |

РОЗДІЛ 3. ЕФЕКТИВНІСТЬ ЗАСТОСУВАННЯ ТЕПЛОВИХ НАСОСІВ В СИСТЕМАХ ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ РІЗНИХ ОБ'ЄКТІВ..... 136

| | |
|--|-----|
| 3.1. Схемні рішення ТНУ | 136 |
| 3.2. Застосування теплових насосів в індивідуальних і багатоквартирних житлових будинках | 147 |
| 3.3. Застосування теплових насосів в критих та відкритих басейнах | 150 |
| 3.3.1. Криті басейни | 150 |
| 3.3.2. Відкриті басейни | 153 |
| 3.4. Застосування теплових насосів в системах теплопостачання | |

| | |
|--|-----|
| громадських приміщень та будівель | 154 |
| 3.4.1. Системи вентиляції | 155 |
| 3.4.2. Системи повітряного опалення | 159 |
| 3.4.3. Системи водяного опалення, гарячого водопостачання та кондиціювання приміщень | 164 |
| 3.5. Застосування теплових насосів в теплонасосних станціях централізованого теплопостачання | 166 |
| 3.5.1. Теплові насоси з електроприводом компресора | 166 |
| 3.5.2. Теплові насоси з дизельним приводом | 169 |
| 3.5.3. Теплові насоси з приводом компресора від газотурбінної установки та утилізацією теплоти відхідних газів в топках водогрійних котлів | 171 |
| 3.5.4. Вплив схеми включення конденсаторів та випарників теплонасосних установок на ефективність роботи ТНУ у системі ТНС | 174 |
| Контрольні питання | 176 |
| Література | 177 |

РОЗДІЛ 4. ТЕПЛОВІ НАСОСИ В ПРОМИСЛОВИХ ТЕХНОЛОГІЯХ.. 179

| | |
|--|-----|
| 4.1. Використання теплових насосів в процесах сушіння | 179 |
| 4.1.1. Сушильні установки як об'єкт застосування теплонасосних систем енергопостачання | 179 |
| 4.1.2. Досвід використання теплових насосів в установках сушіння різних матеріалів і продуктів | 183 |
| 4.1.3. Використання теплових насосів в установках для сушіння зерна | 197 |
| 4.1.4. Теплонасосні установки для низькотемпературного сушіння деревини | 207 |
| 4.2. Використання теплових насосів для охолодження трансформаторів та опалення приміщень електромереж | 216 |
| 4.2.1. Включення первинного контуру теплового насоса послідовно з маслоохолоджувачем системи охолодження автотрансформатора або трансформатора | 216 |
| 4.2.2. Розміщення контуру хладагента теплового насоса безпосередньо в баці автотрансформатора чи трансформатора | 217 |
| 4.2.3. Відбирання теплоти від нагрітого масла з використанням системи масляно-випарного охолодження | 218 |

| | |
|--|-----|
| 4.2.4. Відбирання теплоти від нагрітого повітря | 218 |
| 4.2.5. Відбирання теплоти за допомогою контактних теплообмінників типу «лист-труба», розташованих на корпусі бака автотрансформатора | 219 |
| 4.3. Теплові насоси в системах випаровування та дистиляції рідини | 220 |
| Контрольні питання | 222 |
| Література | 223 |

РОЗДІЛ 5. КОМБІНОВАНІ СИСТЕМИ ГЕОТЕРМАЛЬНОГО ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ

231

| | |
|---|-----|
| 5.1. Комбіновані геотермальні циркуляційні системи теплопостачання .. | 231 |
| 5.2. використання геотермальної енергії: закордонний досвід та перспективи в Україні | 232 |
| 5.3. Сучасні технології розробки, облаштування геотермальних родовищ і створення систем геотермального теплопостачання | 234 |
| 5.4. Енергоефективність комбінованих систем геотермального теплопостачання | 238 |
| 5.4.1. Геотермальні системи теплопостачання з піковою котельнею та теплонасосною установкою | 238 |
| 5.4.2. Геотермальні системи з когенераційною та теплонасосною установками | 242 |
| 5.5. Теплові схеми теплопостачання з одно- і двоступеневими теплонасосними установками | 247 |
| 5.5.1. Одноступеневі теплонасосні установки | 247 |
| 5.5.2. Двоступенева і багатоступеневі теплонасосні установки | 253 |
| 5.5.3. Методика аналізу теплових схем ТНУ | 270 |
| 5.6. Високотемпературні теплонасосні установки в системах теплопостачання | 280 |
| 5.6.1. Теплова схема каскадної ТНУ | 280 |
| 5.6.2. Оптимізація термодинамічних параметрів | 282 |
| Контрольні питання | 285 |
| Література | 285 |

РОЗДІЛ 6. АВТОНОМНЕ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНЕ ВИКОРИСТАННЯ ГЕОТЕРМАЛЬНОЇ ЕНЕРГІЇ В СИСТЕМАХ ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ

286

| | |
|---|-----|
| 6.1. Термодинамічний аналіз ефективності енергетичних станцій | 286 |
|---|-----|

| | |
|--|-----|
| 6.2. Теплофізичні, термодинамічні та екологічні критерії вибору робочої речовини бінарних станцій | 288 |
| 6.3. Термодинамічні параметри бінарної геотермальної енергетичної станції. | 292 |
| 6.3.1. Докритичні цикли на хладонах та їх сумішах | 292 |
| 6.3.2. Надкритичні цикли. | 300 |
| 6.4. Каскадна геотермальна енергетична станція | 302 |
| 6.4.1. Раціональні термодинамічні параметри ГеоЕС | 306 |
| 6.4.2. Ексергетичний аналіз ефективності циклів ГеоЕС. | 307 |
| 6.5. Схеми гібридних паливно-геотермальних енергетичних станцій . . . | 311 |
| 6.6. Техніко-економічна оптимізація конструктивних і технологічних параметрів гібридної паливно-геотермальної теплової станції (ГПГТС) . . . | 317 |
| 6.7. Оптимальні режими роботи ГПГТС | 321 |
| Контрольні питання. | 330 |
| Література. | 330 |

РОЗДІЛ 7. ВИКОРИСТАННЯ ЕНЕРГІЇ БІОГАЗУ ТА ЕНЕРГООЩАДНІ ТЕХНОЛОГІЧНІ ПРОЦЕСИ БІОКОНВЕРСІЇ . . . 331

| | |
|---|-----|
| 7.1. Напрямки інтенсифікації та термостабілізації технологічного процесу біоконверсії. | 331 |
| 7.2. Енергоощадні конструктивно-технологічні схеми біогазових установок | 341 |
| 7.3. Методика розрахунку біореактора | 350 |
| 7.4. Ефективність використання біопалива в системах енергозабезпечення. | 352 |
| 7.5. Устаткування для термохімічної утилізації органічних відходів в системах теплопостачання | 356 |
| Контрольні питання. | 366 |
| Література. | 367 |

РОЗДІЛ 8. ВИКОРИСТАННЯ НИЗЬКОПОТЕНЦІЙНИХ ТЕПЛОВИХ ВТОРИННИХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ РЕСУРСІВ ПРОМИСЛОВИХ ПІДПРИЄМСТВ 369

| | |
|--|-----|
| 8.1. Основні напрямки використання низькопотенційних ВЕР | 369 |
| 8.2. Когенераційні та теплоутилізаційні енергетичні установки з виробленням електроенергії | 381 |
| 8.2.1. Когенераційні енергетичні установки | 381 |

| | |
|---|-----|
| 8.2.2. Теплоутилізаційні енергетичні установки в тепловій схемі котельного агрегату..... | 383 |
| 8.2.3. Утилізація теплоти відхідних газів газотурбінних установок ГПА магістральних газопроводів..... | 390 |
| 8.2.4. Когенераційна схема використання ВЕР газопереробного заводу..... | 394 |
| 8.3. Каскадні енергетичні установки утилізації теплових ВЕР підприємств..... | 396 |
| Контрольні питання..... | 403 |
| Література..... | 404 |