

А.Ю. ЛАГУТІН , П.Ф. СТОЯНОВ

**ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІ ПОВЕРХНІ
ТЕПЛООБМІНУ АПАРАТІВ
ПОВІТРЯНОГО ОХОЛОДЖЕННЯ**



Лагутін Анатолій Юхимович
(1946 - 2017), доктор технічних наук, професор. В 1973 році Анатолій Юхимович закінчив Одеський технологічний інститут холодильної промисловості (ОТХП). Після закінчення інституту працював в Проблемній науково-дослідній лабораторії ОТХП. У 1991 році він прочитав базовий курс лекцій з холодильної техніки і технології викладачам і аспірантам Гаванського Політехнічного інституту, Республіки Куба, а у 2002 році - цикл лекцій з проблем використання сонячної енергії для холодопостачання об'єктів зберігання рослинної сировини в Алжирі. В 1998 році Лагутін А.Ю. захистив докторську дисертацію 3 січня 1999 по 2003 рік професор Лагутін працював директором інституту низькотемпературної техніки і технології, а з 2003 по 2012 роки -

проректором з наукової роботи Одеської державної академії холоду. За його участю були розроблені нові навчальні плани підготовки бакалаврів, фахівців і магістрів за чотирма спеціальностями низькотемпературної техніки.

Професор Лагутін підготував 5 кандидатів наук, він був автором 160 наукових і науково-методичних робіт і співавтором кількох видань підручнику «Холодильні установки. Проектування».

Анатолій Юхимович Лагутін був визнаним фахівцем в області проектування теплообмінних апаратів систем холодильної, криогенної техніки і систем кондиціонування повітря, які знайшли застосування в різних галузях промисловості.



Стоянов Павло Фомич

Кандидат технічних наук, доцент кафедри холодильних установок і кондиціонування повітря Одеської національної академії харчових технологій. В 2007 році закінчив Одеську державну академію холоду по спеціальності «Холодильні машини і установки». В 2011 році захистив дисертацію на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук. Автор 40 публікацій, 20 науково-методичних робіт, 6 патентів.

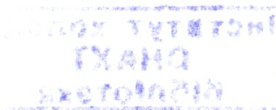
Область наукових інтересів включає підвищення енергетичної ефективності теплообмінного обладнання систем холодильної техніки і кондиціонування повітря, комп'ютерне моделювання енергетичного обладнання, теплові насоси та робочі тіла холодильних установок

А.Ю. ЛАГУТІН , П.Ф. СТОЯНОВ

**ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІ ПОВЕРХНІ
ТЕПЛООБМІНУ АПАРАТІВ ПОВІТРЯНОГО
ОХОЛОДЖЕННЯ**

Монографія

**Одеса
2018**



УДК 621.565

Л14

Рекомендовано до друку Вченою радою
Одеської національної академії харчових технологій.
Протокол № 13 від 11.05.2018р.

Рецензенти: **Письменний Є.М.**, д-р техн. наук, професор, декан теплоенергетичного факультету Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Хмельнюк М.Г., д-р техн. наук., професор, завідувач кафедри холодильних установок і кондиціонування повітря Одеської національної академії харчових технологій
Радченко М.І., д-р техн. наук., професор, завідувач кафедри кондиціонування та рефрижерації Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

Автори:

Лагутін А.Ю., д-р техн. наук., професор
Стоянов П.Ф., к.т.н., доцент кафедри холодильних установок і кондиціонування повітря Одеської національної академії харчових технологій

Лагутін А.Ю., Стоянов П.Ф.

Л14 Енергоефективні поверхні теплообміну апаратів повітряного охолодження : монографія / А.Ю. Лагутін, П.Ф. Стоянов – Одеса: Прес-кур'єр, 2018. – 216 с.

ISBN 978-966-2512-95-3

В монографії проаналізовані тенденції вдосконалення поверхонь теплообміну з повітряним охолодженням, представлені результати експериментальних та теоретичних досліджень поперечноореберних пучків труб. Експериментальний матеріал охоплює результати досліджень поверхонь теплообміну з бісегментною формою ребер та на базі використання похилого оребріння, результати експериментальних досліджень узагальнені рівняннями для розрахунку аеродинамічного опору та теплообміну. В книзі представлено результати дослідження температурних полів поверхні ребер різноманітного конструктивного виконання, аналітичне дослідження ефективності ребер, досліджено структуру потоку повітря в міжреберному каналі методом комп'ютерного моделювання, особливу увагу приділено методології проведення теплотехнічних випробувань поверхонь теплообміну.

Для спеціалістів по холодильній техніці та системам кондиціонування повітря, викладачів, студентів та аспірантів.

УДК 621.565

ББК 31.39

Копіювання, сканування, запис на електронні носії і тому подібне, книжки в цілому, або будь-якої її частини заборонено

ISBN 978-966-2512-95-3

© Лагутін А. Ю., Стоянов П. Ф., 2018

х 540188
ІНСТИТУТ ХОЛОДА
ОНАХТ
БІБЛІОТЕКА

ЗМІСТ

РОЗДІЛ 1. ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛООБМІНУ ТА АЕРОДИНАМІКИ ОРЕБРЕНИХ ПОВЕРХОНЬ ПРИ ПОПЕРЕЧНОМУ ОМИВАННІ ЇХ ПОТОКОМ ПОВІТРЯ	12
1.1. Аналіз чинників, що визначають тепловіддачу та аеродинамічний опір поверхонь теплообміну апаратів повітряного охолодження	12
1.2. Методи підвищення енергетичної ефективності поверхонь теплообміну	18
1.3. Методи експериментальних досліджень теплообміну	27
1.4. Дослідження поверхонь теплообміну методами чисельного моделювання ..	28
РОЗДІЛ 2. ЕФЕКТИВНІ ТРУБЧАСТО-РЕБЕРНІ ПОВЕРХНІ АПАРАТІВ ПОВІТРЯНОГО ОХОЛОДЖЕННЯ	31
2.1. Передумови створення теплообмінних поверхонь методом лиття під тиском (особливості процесу)	31
2.2. Обґрунтування вибору геометричних розмірів теплообмінних поверхонь апаратів повітряного охолодження	32
2.3. Аналіз впливу складових термічних опорів для реберних поверхонь муфтового типу	39
2.4. Дослідження контактного термічного опору біметалічних реберних труб ...	48
РОЗДІЛ 3. ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕРМОГІДРАВЛІЧНИХ ПРОЦЕСІВ У ПУЧКАХ ТРУБ З ПОПЕРЕЧНИМИ ДИСКОВИМИ РЕБРАМИ	50
3.1. Методика досліджень	50
3.2. Експериментальний стенд, вимірювальні і регулюючі пристрої	51
3.3. Експериментальні дослідження пучків ребристих труб	53
3.4. Порівняльна оцінка теплової ефективності досліджених пучків	67
РОЗДІЛ 4. ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛОВИХ ХАРАКТЕРИСТИК МОДЕЛЕЙ ОДИНОЧНИХ РЕБЕР І ТРУБ	69

4.1 Експериментальні стенди по дослідженню моделей одиночних ребер і труб	69
4.2. Методика дослідження і обробки дослідних даних	73
4.2.1 Термографічний метод визначення температур поверхні ребер.....	75
4.2.2 Оцінка похибок обробки результатів методу рідинно-кристалічного моделювання	76
4.2.3 Термоелектричний метод вимірювання температури ребер	77
4.2.4 Вимірювання температури повітря у міжреберній порожнині	78
4.2.5 Визначення локальних та середніх коефіцієнтів тепловіддачі ребер.....	78
РОЗДІЛ 5. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПУЧКІВ ТРУБ З ЕЛІПТИЧНИМИ ТА БІСЕГМЕНТНИМИ РЕБРАМИ.....	94
5.1 Експериментальні дослідження пучків ребристих труб з еліптичною формою ребер.....	96
5.2 Експериментальні дослідження пучків ребристих труб з бісегментною формою ребер	99
РОЗДІЛ 6 . АНАЛІТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РЕБЕР.....	106
6.1 Розрахунок теплової ефективності еліптичного ребра	106
6.2 Розрахунок теплової ефективності радіального ребра змінного профілю.....	108
6.3 Розрахунок теплової ефективності ребра довільної форми.....	116
6.3.1 Загальна формула для оцінки ефективності ребра.	119
6.3.2 Наближений метод визначення коефіцієнту B_0 для розрахунку ефективності ребра.....	120
6.3.3. Розрахунок окремих видів вісесиметричних ребер	121
6.3.3.1 Еліптичне ребро.....	121
6.3.3.2 Бісегментне ребро.	122
6.3.3.3 Демонстраційні розрахунки повної поверхні і довжини торця ребра.....	122

6.3.3.4 Демонстраційні розрахунки ефективності ребра.....	123
6.4. Зіставлення теплової ефективності по результатах обчислювання з експериментальними даними.....	123
РОЗДІЛ 7. ДОСЛІДЖЕННЯ ПУЧКІВ ТРЬОХТРУБНИХ ЕЛЕМЕНТІВ З НАХИЛЕНИМИ РЕБРАМИ.....	126
7.1 Експериментальний стенд, вимірювальні і регулюючі прилади для дослідження одиночних ребер	126
7.2 Експериментальний стенд для дослідження теплових і аеродинамічних характеристик одиночних ребристих труб.....	128
7.3. Методика проведення досліджень і обробки дослідних даних.....	129
7.3.1. Визначення теплового потоку.....	130
7.3.2. Вимірювання температури повітряного потоку.....	130
7.3.3. Визначення швидкості потоку повітря у «живому» перетині робочої ділянки	130
7.3.4. Вимірювання температури поверхні теплообміну.....	131
7.3.5 Визначення умовного коефіцієнту теплопередачі.....	132
7.3.6 Визначення приведених коефіцієнтів тепловіддачі.....	132
7.3.7 Визначення аеродинамічного опору	132
7.4 Результати експериментального дослідження одиночних ребер.....	132
7.5 Дослідження одиночних ребристих елементів тепловізором.....	134
7.6 Результати теплових і аеродинамічних випробувань одиночних ребристих труб	136
7.7 Чисельне дослідження поверхонь теплообміну	139
7.7.1. Методика проведення чисельного дослідження	139
7.7.2 Математичний апарат чисельного моделювання.....	141
7.7.3 Апробація результатів комп'ютерного моделювання.....	143

7.7.4	Аналіз результатів чисельного моделювання	145
7.7.5	Дослідження швидкісного поля по довжині міжреберного каналу	150
7.7.6	Висновки за результатами чисельного дослідження	154
7.8	Експериментальні дослідження пучків труб із нахиленими ребрами	155
7.8.1	Постановка частних завдань експериментального дослідження пучків оребраних труб	155
7.8.2	Експериментальний стенд для дослідження пучків оребраних труб, вимірювальні і регулюючі прилади	155
7.8.3	Методика досліджень і обробки експериментальних даних	159
7.8.4	Вимірювання температури поверхні ребер	159
7.8.5	Вимірювання температур поверхні труб	160
7.8.6	Вимірювання витрати повітря	160
7.8.7	Визначення коефіцієнтів тепловіддачі	161
7.9	Дослідження пучків труб при різних компоновальних рішеннях пучка	161
7.10	Висновки за результатами досліджень	168

РОЗДІЛ 8. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛОБМІНУ І АЕРОДИНАМІЧНОГО ОПОРУ ПУЧКІВ ТРУБ З ОДИНОЧНИМИ НАХИЛЕНИМИ ПОПЕРЕЧНИМИ РЕБРАМИ

8.1.	Експериментальний стенд, засоби вимірювання і регулювання	169
8.2.	Методика проведення дослідження і обробки експериментальних даних ..	174
8.2.1	Визначення теплового потоку	175
8.2.2	Визначення статичного перепаду тиску потоку повітря	175
8.2.3	Розрахунок витрати повітря	175
8.2.4	Визначення площі «живого» перерізу	175
8.2.5	Визначення швидкості повітря	176

8.2.6	Розрахунок температури повітря на вході та виході з робочої ділянки	176
8.2.7	Визначення температури на поверхні калориметричних труб	177
8.2.8	Обчислення температури поверхні ребер	177
8.2.9	Конвективний та приведений коефіцієнти тепловіддачі	177
8.2.10	Критерії чисел подібності	178
8.3	Експериментальні дослідження теплових і аеродинамічних характеристик пучків труб із нахиленими поперечними ребрами	179
8.3.1	Експериментальні дослідження аеродинамічного опору пакетів труб із нахиленими поперечними ребрами	179
8.3.2	Експериментальні дослідження теплових характеристик пакетів труб із нахиленими поперечними ребрами	184
8.3.3	Порівняння методів повного та локального теплового моделювання	187
8.4.	Оцінка ефективності пучків труб із нахиленими ребрами	191
8.5	Узагальнення дослідних даних для малорядних пучків труб	195
8.6	Узагальнення експериментальних даних для комбінованих пучків труб	201
8.7	Висновки за результатами досліджень пакетів труб із нахиленими поперечними ребрами	206
	ЛІТЕРАТУРА	208

ВСТУП

В умовах безперервного зростання енергосилових потужностей проблема інтенсифікації теплообміну в теплообмінних апаратах є однією з найбільш важливих. Висока ефективність, технологічність виготовлення, компактність - це критерії вибору сучасного теплообмінного обладнання. Тенденції до виснаження паливно-енергетичних ресурсів, зростання цін на виробництво енергії та глобальні екологічні проблеми є стимулюючими факторами впровадження високоефективних теплообмінних апаратів.

Зростання населення і рівня потреб у водних ресурсах - одна з актуальних проблем сучасності, тому перевага віддається повітряному охолодженню. В Україні з кожним роком зона застосування повітряних теплообмінників розширюється, і відмова від охолоджуючої води як традиційного засобу відведення тепла технологічних потоків призведе до зростання рентабельності підприємств, особливо таких галузей промисловості як харчова, хімічна, нафтопереробна та ін.

Зростаюча потреба в апаратах з повітряним охолодженням у масштабах країни призводить до значного збільшення витрат металу. Тому проблема пошуку оптимальних варіантів теплообмінних поверхонь апаратів, які б забезпечували зменшення обсягу, маси і вартості, є досить гострою, а удосконалення конвективних поверхонь теплообміну є пріоритетним напрямком. Тепло-аеродинамічні характеристики теплообмінних поверхонь залежать від великого числа факторів, таких як їх геометричні параметри, умов набігання потоку повітря, властивостей теплоносіїв і т.д. Перспективним напрямком в апаратобудуванні є використання труб, профіль яких прагне до легкообтічного. Обтікання труб такого профілю супроводжується зниженими витратами енергії на прокачування теплоносія при відповідному незначному погіршенні теплообміну, що в кінцевому підсумку призводить до підвищення енергетичної ефективності апарата в цілому.

Економічна доцільність заміни водяного охолодження технологічних та енергетичних установок на повітряне заслуговує постійної уваги. Технічні рішення використання водяних теплообмінників зазвичай продиктовані їх більшою низькою вартістю та не враховують загрози фізичного зносу, екологічних аспектів та високих експлуатаційних витрат.

Основні напрямки, викладені в монографії, присвячені дослідженню та розробці теплообмінних апаратів з повітряним охолодженням для холодильних установок харчової та хімічної промисловості, для установок синтезу аміаку для газотурбінних установок хімічних виробництв. Область застосування запропонованих розробок може бути суттєво розширена у зв'язку з існуючими

потужностями (газотурбінні установки металургічних комбінатів, системи охолодження компримювання газу магістральних газопроводів, конденсатори теплових електростанцій та інш.) є потенційними споживачами запропонованих розробок.

На сучасному етапі розвитку обчислювальної техніки актуальним, при моделюванні фізичних явищ, є використання чисельних методів. Розвиток комп'ютерної техніки та поширення інформаційно-обчислювальних технологій призвело до їх широкого використання в галузі фундаментальних наукових досліджень і науково-технічних розробок. Потреба в «готовому» комп'ютерному інструментарії викликала оперативну розробку і появу на ринку пакетів прикладних комп'ютерних програм для чисельного рішення задач для широкого спектра наукових досліджень. Авторами книги для проведення чисельного експерименту була обрана програма Comsol Femlab 3.3a, яка забезпечує гнучкість роботи, настройки і представлення результатів рішення фізичних задач. Розвиток чисельних методів аналізу представляє собою безперервний процес, основною рисою якого є взаємозв'язок існуючих аналітичних методів вирішення завдань з відомими емпіричними даними..

В книзі авторами представлено результати експериментальних досліджень поверхонь теплообміну з використанням бісегментного та похилого оребрення, вивчено вплив на тепло-аеродинамічні характеристики конвективних поверхонь теплообміну варіювання конструктивних та режимних параметрів експлуатації теплообмінників, виконано порівняльний аналіз запропонованих поверхонь теплообміну з існуючими. В роботі розглянуті нові конструктивні типи поперечно-оребраних поверхонь теплообміну та компоновочних рішень труб у пучку, які перспективні для теплообмінників з повітряним охолодженням.

Авторами монографії виконано аналіз факторів, які впливають на теплоенергетичні характеристики конвективних поверхонь теплообміну, сформульовані рекомендації щодо проектування нових теплообмінників та енергоефективної експлуатації існуючих. Теплообмінні апарати багато в чому визначають ефективність експлуатації всієї холодильної установки, тому створенню та дослідженню характеристик теплообмінників приділяється незмінно велика увага дослідників.