

ТЕПЛООБМЕН И АЭРОДИНАМИКА КОМБИНИРОВАННЫХ ПАКЕТОВ ТРУБ С ПОПЕРЕЧНЫМИ НАКЛОННЫМИ РЕБРАМИ

Князюк В.И., Лагутин А.Е., Стоянов П.Ф.

*Учебно-научный институт холода, криотехнологий и экоэнергетики
Одесской национальной академии пищевых технологий*

Аннотация. В настоящей работе представлены результаты экспериментального определения коэффициентов теплоотдачи пакетов оребренных труб с поперечными наклонными ребрами. Рассмотрены различные компоновочные решения труб в пакетах. Выполнено сопоставление поверхностей теплообмена по тепловым и аэродинамическим показателям. Определены факторы, оказывающие влияние на теплообмен ребристых труб с наклонным оребрением. Оценена энергетическая эффективность сравниваемых пакетов труб.

Ключевые слова: теплоотдача, аэродинамика, оребренная труба, пакет труб, энергетическая эффективность.

SCHIMB DE CĂLDURĂ ȘI AERODINAMICA PACHETELOR COMBinate DE ȚEVI CU NERVURI TRANSVERSALE ȘI ÎNCLINATE

Kniazuk V. I., Lagutin A. E., Stoianov P. F.

Institutul de Învățământ și de Cercetări de Refrigerare, Criotehnologii și Ecoenergeticii al Academiei Naționale de Tehnologii Alimentare din Odesa

Rezumat. În lucrare sunt prezentate rezultatele ale analizelor experimentale a coeficientelor de schimb de căldură ai pachetelor țevilor cu nervuri transversale și înclinate. Sunt studiate diferite soluții de aranjare ale țevilor unite în pachete. Sunt determinate factorii, care influențează asupra schimbului de căldură ai țevilor cu nervuri și cu nervuri înclinate. Este determinată eficiența energetică a pachetelor de țevi comparate.

Cuvinte-cheie: schimb de căldură, aerodinamică, țevă cu nervuri, pachetul de țevi, eficiență energetică.

HEAT EXCHANGE AND AERODYNAMICS OF THE COMBINED TUBING BUNDLES WITH CROSS INCLINED FINS

Knyazyuk V. I., Lagutin A. E., Stoyanov P. F.

Educational and Scientific Institute of Refrigeration Cryotechnologies Ecology and Energetic Odessa National Academy of Food Technologies

Abstract. This paper presents results of experimental research and analyses air-side thermal performance of combined tube bundles with cross inclined fins. The empirical correlations for heat transfer and flow friction of tubes with inclined fins at different orientation finned tubes relatively of air flow are presented. The errors of thermal and aerodynamic tests are 3-5% and 9.2%, respectively. The proposed correlations describe an experimental data with a coefficient of determination about 0.979-0.998. The impact of tubes arrangement in a bundle on energy performance of heat exchanger were analyzed using complete and local heat modeling methods at a stationary heat flux. Experimental research indicates that efficiency of inclined fins can be calculated by using the equation for cross rectangular fins with average deviation of $\pm 5\%$.

Key words: Heat Transfer, Aerodynamics, Finned Tube, Tube Bundle, energy efficiency.

ВВЕДЕНИЕ

Поперечное обтекание оребренных поверхностей в условиях отрывных течений протока газов широко используется в теплообменных аппаратах. Энергетическая эффективность поперечного обтекания пакетов оребренных труб в значительной степени зависит от геометрических параметров и форм поверхности и наиболее рациональных схем размещения труб в пакетах [7- 12]. Учитывая тот факт, что ребристо-трубчатые поверхности теплообмена нашли широкое применение во многих отраслях промышленности, экономический потенциал усовершенствования конвективных поверхностей теплообмена весьма значителен. В открытой литературе [4, 5] рассмотрены многочисленные способы и подходы к решению вопроса об интенсификации теплообмена оребренных поверхностей. Оригинальным является

подход исследователей в работе [6], которые предложили путем использования переходных коридорно-шахматных пучков повысить энергетическую эффективность теплообменника.

Использование круглых труб с поперечными наклонными ребрами [1,12] связано с возможной перспективой повышения энергетической эффективности и компактности аппаратов воздушного охлаждения.

В работе предложен вариант решения задачи повышения энергетической эффективности в аппаратах воздушного охлаждения за счет создания соответствующих условий переноса импульса и энергии, обеспечивающих улучшения соотношений между интенсивностью теплообмена и гидравлическим сопротивлением путем поиска наилучших комбинации компоновок пакетов труб. Наряду с ранее изученными тепловыми и гидравлическими характеристиками пакетов труб с поперечными наклонными ребрами при различной ориентации наибольшей приведенной длины ребер относительно направления потока воздуха [2, 3], заслуживает практического внимания задача оценки энергетической эффективности комбинированных пакетов труб.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ПАКЕТОВ ТРУБ

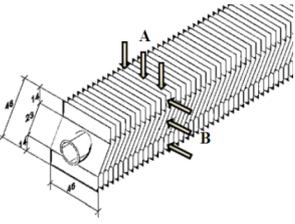
Для оценки перспективности различных схем комбинированного размещения труб с поперечными наклонными ребрами в пакетах шахматной компоновки были выполнены экспериментальные исследования их тепловых и аэродинамических характеристик.

Опытные пакеты труб с фиксированными значениями поперечного $S_1 = 0.05$ м. и продольного $S_2 = 0.06$ м шагов труб отличались различным порядком расположением наибольшей приведенной длины ребер относительно набегающего потока воздуха. Для вариантов обтекания труб А и В (см. табл.1) приведенные длины ребер, соответственно, составили 0,051 м. и 0,046 м.

Исследованные варианты рассмотренных комбинаций расположения труб в пакетах приведены в таблице 1.

Таблица 1

Варианты расположения труб в пакетах

 Обозначение и № пакетов труб	Варианты размещения труб относительно набегающего потока воздуха в поперечных рядах			
	1 ряд труб	2 ряд труб	3 ряд труб	4 ряд труб
▲-1	А	А	А	А
●-2	В	В	В	В
■-3	А	А	В	В
◆-4	В	В	А	А
ж-5	В	А	В	А

Экспериментальная установка и методика проведения опытов описаны в работах [2, 3].

Теплоотдача пакетов труб исследовалась методами полного и локального теплового моделирования при стационарном тепловом потоке, а аэродинамика в изотермических условиях. В опытах определялись приведенные (α_{np}) и конвективные (α_k) коэффициенты теплоотдачи.

Физические параметры воздуха определялись по средней температуре, а скорость воздуха $\omega_{ж.с.}$ в сжатом «живом» сечении пакета.

Результаты тепловых испытаний пакетов труб представлены на рисунках 1 и 2 рабочими зависимостями вида $\alpha_k = f(\omega_{ж.с.})$ и $\alpha_{np} = f(\omega_{ж.с.})$.

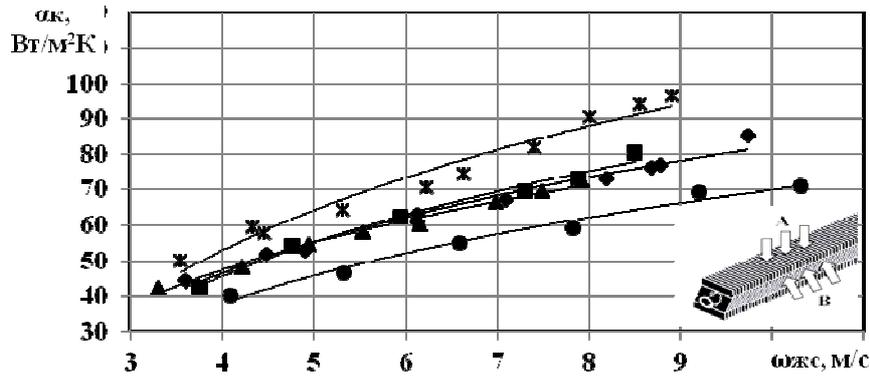


Рис. 1. Зависимость конвективных коэффициентов теплоотдачи от скорости воздуха в «живом» сечении при полном тепловом моделировании для различных компоновок пакетов труб: \blacktriangle - пакет №1, \bullet - пакет №2, \blacksquare - пакет №3, \blacklozenge - пакет №4, \ast - пакет №5

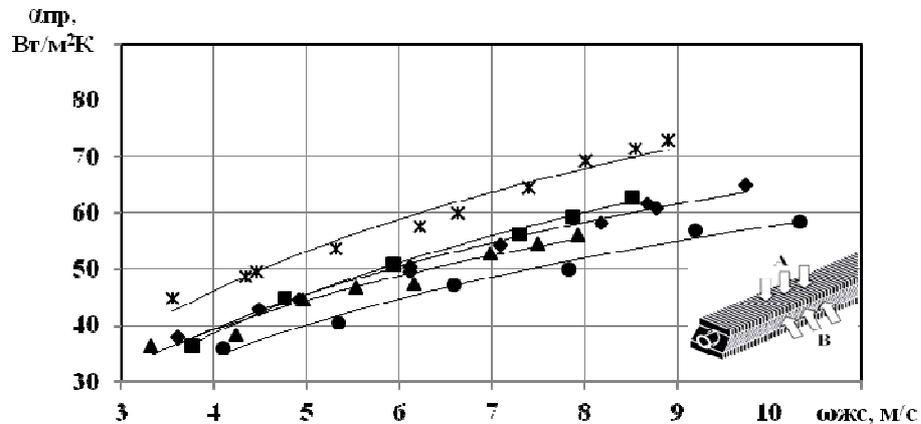


Рис. 2. Зависимость приведенных коэффициентов теплоотдачи от скорости воздуха в «живом» сечении при полном тепловом моделировании для различных компоновок пакетов труб (обозначение пакетов см. рис.1)

Результаты сопоставления исследованных пакетов труб показали, что лучшими теплотехническими показателями обладает пакет труб №5. Расхождение значений конвективных коэффициентов теплоотдачи худшего (пакет №2) и лучшего (пакет №5) пакетов, составило 35-40%. При этом аэродинамическое сопротивление пакета №2 (рис.3), меньше чем у пакета №5 на 17-34%.

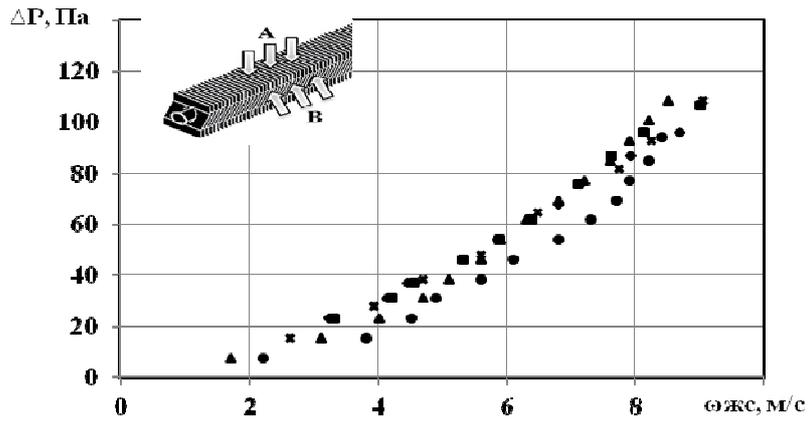


Рис. 3. Зависимости $\Delta P = f(\omega_{жс.})$ (обозначение пакетов, рис.1)

Здесь следует отметить, что значения аэродинамических сопротивлений пакетов труб №1,3 и 4, закономерно согласуются с результатами тепловых испытаний пакетов.

На основании полученных данных можно заключить, что вариант комбинации размещения труб по рядам пакета №5, с точки зрения теплообмена, более перспективен.

Сравнение значений приведенных и конвективных коэффициентов теплоотдачи при полном и локальном тепловом моделировании для худшего (пакет №2, рис.4) и лучшего (пакет №5, рис.5) пакетов труб указывают на расхождение значений опытных данных в зависимости от принятого метода моделирования. Во всех случаях при локальном моделировании значения α_k и α_{np} выше, чем при полном тепловом моделировании. Для пакета труб №2 эти расхождения достигали 30%.

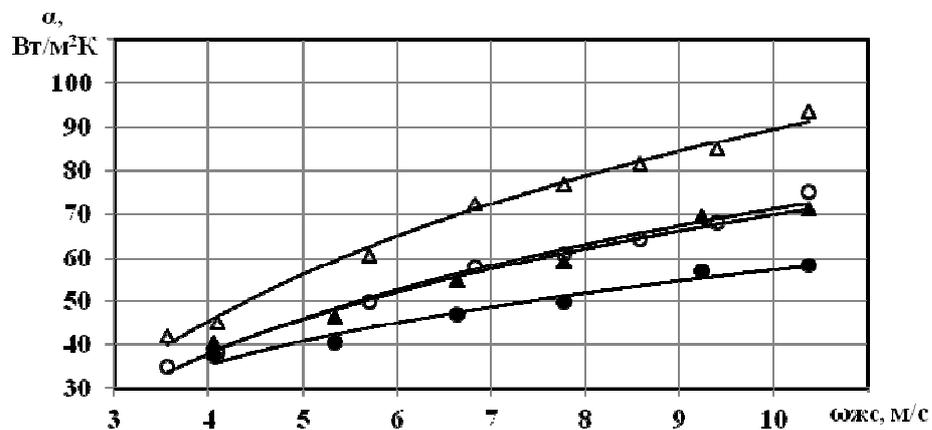


Рис. 4. Зависимость коэффициентов теплоотдачи от скорости воздуха в «живом» сечении пакета труб №2 при полном и локальном тепловом моделировании:

- ▲ - α_k , ● - α_{np} полное тепловое моделирование;
- △ - α_k , ○ - α_{np} локальное тепловое моделирование

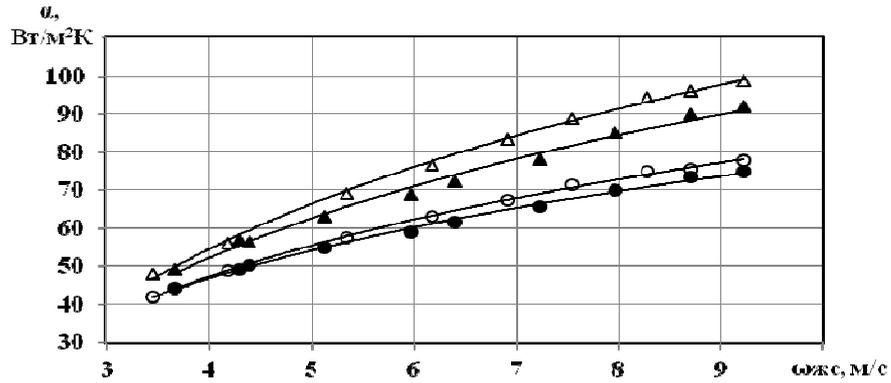


Рис. 5. Зависимость коэффициентов теплоотдачи от скорости воздуха в «живом» сечении пакета труб №5 при полном и локальном тепловом моделировании:
▲- α_k , ● - α_{np} полное тепловое моделирование;
△- α_k , ○ - α_{np} локальное тепловое моделирование

При этом для пакета №5 влияние метода моделирования менее выражено. Здесь расхождение значений α_k не превысили 10%, а для α_{np} фактически стремилось к нулю.

Наблюдаемое явление можно объяснить большей турбулентностью потока воздуха с увеличением скорости в пакете труб №5.

Погрешности теплотехнических и аэродинамических исследований, соответственно, составили 3-5% и 9,2%.

Результаты испытаний 4-х рядных шахматных пакетов оребренных труб обобщены частными рабочими зависимостями вида:

$$\alpha_k = C_1 \cdot \omega_{ж.с.}^n \quad (1)$$

$$\alpha_{np} = C_2 \cdot \omega_{ж.с.}^m \quad (2)$$

$$\Delta P = C_3 \cdot \omega_{ж.с.}^k \quad (3)$$

Коэффициенты и показатели степени уравнений (1-3) приведены в таблице 2.

Область использования полученных уравнений можно принять по графикам, представленным на рисунках 1-5.

Коэффициенты детерминации R^2 уравнений лежат в диапазоне значений 0,979 – 0,998, что позволяет судить о высокой степени надежности полученных рабочих зависимостей.

Таблица 2.

Коэффициенты и показатели степени в уравнениях (1-3)

Номер пакета труб	C_1	n	R^2	C_2	m	R^2	C_3	k	R^2
1	19,2	0,64	0,995	18,8	0,53	0,995	2,5	1,73	0,983
2	16,3	0,64	0,990	16,6	0,54	0,991	1,5	1,90	0,986
3	16,3	0,76	0,979	15,8	0,67	0,988	3,3	1,59	0,996
4	20,4	0,63	0,993	19,3	0,54	0,998	4,0	1,48	0,997
5	21,1	0,69	0,979	22,0	0,54	0,988	3,1	1,58	0,998

Сравнение исследованных пакетов труб № 1–5 по энергетическим показателям при единичном температурном напоре между средними значениями температур ребристой поверхности и воздуха проведено с помощью метода, предложенного Антуфьевым В.А. и Белецким Г.С. [4], и представлено зависимостью $E = f(N_0)$ на рис. 6.

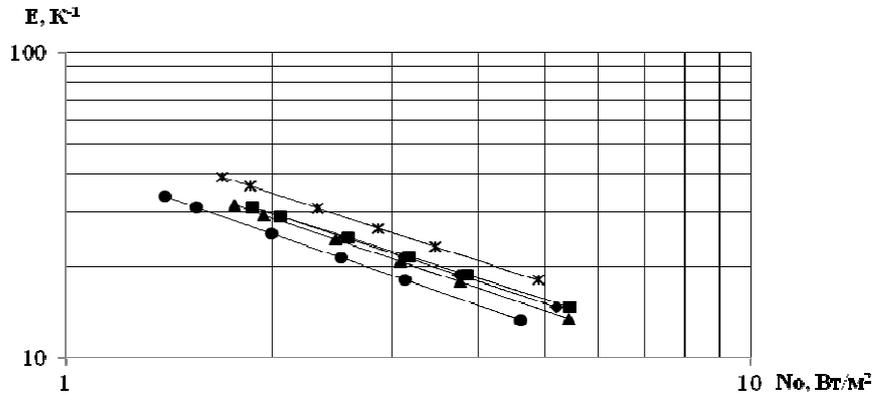


Рис. 6 Зависимость $E = f(N_0)$ (обозначение пакетов см. рис.1)

Приведенные данные свидетельствуют о наибольшей эффективности пакета №5. Его энергетический коэффициент, в пределах изменения удельной затраты мощности $N_0 = 1.7 - 5 \text{ Вт/м}^2$, выше чем у худшего пакета труб № 2 на 36%.

Для расчета эффективности наклонных ребер в работе использована формула [5] для поперечных прямоугольных ребер

$$E_p = \frac{th(m \cdot h')}{(m \cdot h')} \quad (4)$$

где: $m = \sqrt{\frac{2 \cdot \alpha_k}{\delta_p \cdot \lambda_p}}$; λ_p - теплопроводность материала ребра, Вт/(м.К); δ_p - толщина

ребра, м; h' - приведенная высота ребра, м.

Для прямоугольных ребер

$$h' = 0,5 \cdot d(\rho - 1) \cdot (1 + 0.805 \cdot \lg \rho) \quad (5)$$

$$\rho = 1.28 \cdot (B/d) \cdot \sqrt{[(A/B) - 0.2]} \quad (6)$$

где: A и B соответственно, больший и меньший размеры ребра, м; d - диаметр трубы, м.

На рисунке 7 представлены результаты сравнительной оценки теоретического решения по уравнениям (4-6) (сплошная линия), с полученными экспериментальными

значениями эффективности ребра $E_p = \frac{\alpha_{np}}{\alpha_k}$.

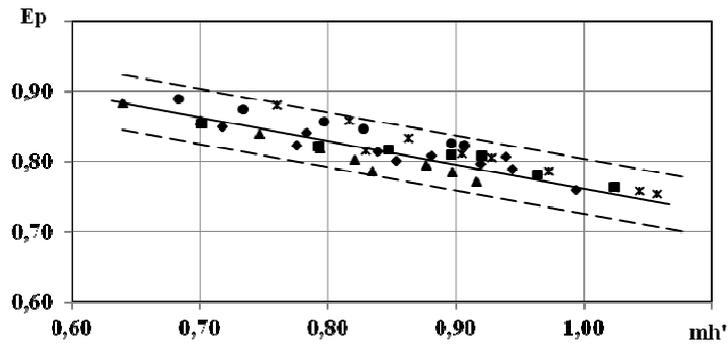


Рис. 7. Зависимость $E_p = f(m \cdot h')$ (обозначение пакетов см. рис.1)

Для всех исследованных пакетов труб отклонение опытных значений эффективности ребра не превысило $\pm 5\%$ от расчетного значения по уравнениям (5-7), что согласуется с результатами работы [9]. В расчетах значение теплопроводности медного ребра принималось равным $\lambda_p = 380$ Вт/(м·К).

Выводы

Впервые получены данные по тепловым и аэродинамическим характеристикам пакетов труб с поперечными наклонными ребрами при различной ориентации наибольшей приведенной длины ребер относительно направления охлаждающего потока воздуха. Отмечено, что теплоотдача в большей степени, чем аэродинамическое сопротивление зависит от вариантов расположения труб в пакетах. Существование этого фактора обусловлено различием условий обтекания труб по продольным рядам труб пакетов. Наиболее вероятно, что значение потерь напора на трение в межреберной полости является основным по сравнению с общими потерями, т.к. для всех рассмотренных вариантов размещения труб в рядах пакетов обеспечивалось обтекание круглой трубы по эллипсу, за счет угловой посадки ребер.

Из сравниваемых компоновок, использование конфигурации размещения труб пакета №5, в пределах изменения удельной затраты мощности $N_0 = 1.7 - 5$ Вт/м², приведет к повышению энергетической эффективности теплообменника на 20-36%.

С достаточной степенью точности для расчета эффективности наклонных ребер может быть использована формула для поперечных прямоугольных ребер.

Литература

- [1] Стоянов П. Ф., Лагутин А. Е., Гоголь Н. И. Патент на полезную модель №40389 «Теплообменный пучок» от 10.04.2009.
- [2] Лагутин А. Е., Князюк В. И., Стоянов П. Ф. Исследование аэродинамического сопротивления пакетов труб с поперечными наклонными ребрами // Холодильна техника і технологія, 2012, №1 (135), с. 28-32.
- [3] Князюк В. И., Лагутин А. Е., Стоянов П. Ф. Исследование тепловых характеристик пакетов труб с поперечными наклонными ребрами // Холодильна техника і технологія, 2013, №1 (141), С. 5-9.
- [4] Антуфьев В. М., Белецкий Г. С. Теплопередача и аэродинамическое сопротивление трубчатых поверхностей в поперечном потоке. //Москва, Машгиз 1948,- 119 с.

[5] Данилова Н. Г., Богданов С. Н., Иванов О. П. и др. Теплообменные аппараты холодильных установок / Под ред. д-ра. техн. наук Г. Н. Даниловой – 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Машиностроение, Ленинград. отд-ние, 1986, - 303 с.

[6] Кунтыш В.Б., Стенин Н.Н. Теплоотдача и аэродинамическое сопротивление поперечно-обтекаемых переходных коридорно-шахматных пучков из оребренных труб// Теплоэнергетика, 1993, №2, с.41-45.

[7] Chien-Nan Lin, Jiin-Yuh Jang A two-dimensional fin efficiency analysis of combined heat and mass transfer in elliptic fins// International Journal of Heat and Mass Transfer 45 (2002), p. 3839–3847.

[8] Chi-Chuan Wang, Young-Ming Hwang, Yur-Tsai Lih Empirical correlations for heat transfer and flow friction characteristics of herringbone wavy fin-and-tube heat exchangers // International Journal of Refrigeration 25 (2002), p. 673 – 680

[9] Man-Hoe Kim, Clark W. Bullard Air-side thermal hydraulic performance of multi-louvered fin aluminum heat exchangers // International Journal of Refrigeration 25 (2002), p. 390 – 400.

[10] Wen-Lih Chen A numerical study on the heat-transfer characteristics of an array of alternating horizontal or vertical oval cross-section pipes placed in a cross stream // International Journal of Refrigeration 30 (2007) , p. 454 – 463.

[11] T’Joen C., Steeman H.-J., Willockx A., De Paepe M. Determination of heat transfer and friction characteristics of an adapted inclined louvered fin // Experimental Thermal and Fluid Science 30, (2006), p. 319–327.

[12] Pavlo Stoianov, Anatolii Lagutin Improvement of finned heat-exchange compressor surfaces // Proc. of the Conference “Compressors-2009”. – 2009. – Papiernička (Slovak Republic) , p. 398- 403.

Сведения об авторах



Лагутин Анатолий Ефимович докт. техн. наук, профессор кафедры холодильных машин и установок, заместитель директора по научной работе Института холода, криотехнологий и экоэнергетики Одесской национальной академии пищевых технологий. Область научных интересов: теплообменные аппараты энергетических и технологических систем, аудит охлаждающих систем в агропромышленном комплексе и химической промышленности. E-mail: ae_lagutin@meta.ua



Князюк Владимир Иванович аспирант, инженер кафедры холодильных машин и установок Института холода, криотехнологий и экоэнергетики Одесской национальной академии пищевых технологий. Область научных интересов: холодильная техника, экспериментальное исследование и усовершенствование оребренных поверхностей, численное моделирование теплообмена и аэродинамики. E-mail: vova_777@mail.ru



Стоянов Павел Фомич к.т.н., ассистент кафедры холодильных машин и установок Института холода, криотехнологий и экоэнергетики Одесской национальной академии пищевых технологий. Область научных интересов: теплообменные аппараты энергетических и технологических систем, численное моделирование теплообмена и аэродинамики. E-mail: palfomich@rambler.ru