

дование сопряженности сезонного роста корневых систем и побегов у древесных растений и ее индификационное значение для практики лесного хозяйства // Роль науки в создании лесов будущего: Тез. докл. Всес. конф., Пушкино, 1980.— Л., 1981.— 87 с. [8]. Рахтеенко И. Н. Рост и взаимодействие корневых систем древесных растений.— Минск: АН БССР, 1963.— 254 с. [9]. Шинкаренко И. Б. Динамика роста и развития горизонтальных корней сосны обыкновенной // Зап. Харьков. с.-х. ин-та.— 1955.— Т. 10 (47).— С. 229—239. [10]. Ярославцев Г. Д. Сопряженность роста и регенерации корней с ростом побегов у некоторых средиземноморских пихт на Южном берегу Крыма // Бюл. Никитского ботан. сада.— 1982.— № 49.— С. 35—40. [11]. Ярославцев Г. Д., Кузнецов С. И. Сезонная изменчивость активности роста корней кедров // Бюл. Никитского ботан. сада.— 1982.— № 48.— С. 39—42.

УДК 536.244

ТЕПЛООБМЕН МАЛОРЯДНЫХ ПУЧКОВ ИЗ ТРУБ С ПОПЕРЕЧНЫМИ РЕБРАМИ

В. Б. КУНТЫШ, В. И. МЕЛЕХОВ, И. Г. РЯБКОБЫЛЕНКО

Архангельский лесотехнический институт

Пучки из ребристых труб с числом рядов $z = 1; 2$ по направлению движения воздуха применяют в калориферах лесосушильных камер, в радиаторах тракторов, автомобилей и ряде других транспортных машин. Однако вопросы теплообмена и аэродинамического сопротивления в таких пучках, особенно однорядных [1, 4, 5, 7], исследованы недостаточно полно.

С учетом вышесказанного, нами экспериментально исследованы приведенная теплоотдача, аэродинамическое сопротивление и термическое контактное сопротивление (ТКС) однорядных и двухрядного пучков, а также одиночной ребристой трубы в перпендикулярном потоке воздуха. Опыты проводили на биметаллических трубах с накатными однозаходными алюминиевыми ребрами, применяемых фирмой Хильдебранд (ФРГ) для нагрева агента сушки в лесосушильных камерах. Геометрические размеры ребер и трубы следующие: наружный диаметр ребра $d = 64$ мм; диаметр ребра у его основания $d_0 = 42$ мм; высота и шаг ребра соответственно $h = 11$ мм; $S = 4$ мм; толщина ребра у вершины $\Delta_1 = 0,55$ мм, у основания $\Delta_2 = 1,5$ мм; коэффициент оребрения трубы $\varphi = 8,04$. Несущая труба с наружным диаметром $d_n = d_k = 39$ мм и толщиной стенки 2,5 мм выполнена из углеродистой стали.

Исследованы: однорядные пучки I, II, III с поперечным шагом S_1 , соответственно равным 74; 80 и 100 мм (относительный поперечный шаг $\sigma_1 = S_1/d = 1,156; 1,25; 1,562$), двухрядный пучок IV с шагом $S_1 = 133$ мм и продольным шагом $S_2 = 74$ мм ($\sigma_1 = 2,078$, относительный продольный шаг $\sigma_2 = S_2/d = 1,156$), а также одиночная труба V, установленная вертикально в центре рабочего участка сечением 400×400 мм разомкнутой аэродинамической трубы [2].

Теплоотдачу пучков I—IV изучали методом локального теплового моделирования, при котором обогреваемую ребристую трубу-калориметр устанавливали в центре соответствующего ряда. Для измерения приведенных коэффициентов теплоотдачи и значений ТКС применен парозлектрический калориметр. Методика измерений требуемых тепловых и гидродинамических параметров, аппаратное и конструктивное оформление калориметрической трубы подробно описаны в работе [2]. Опытная программа состояла из двух частей: первая включала измерение приведенных коэффициентов теплоотдачи, вторая — определение ТКС биметаллической трубы. Величину термического контактного сопротивления R_k , ($m^2 \cdot K$)/Вт, находили по формуле

$$R_k = \Delta T_k / q_k, \quad (1)$$

где ΔT_k — температурный перепад на механическом контакте наружной поверхности несущей трубы с внутренней поверхностью ребристой оболочки;

q_k — плотность теплового потока через контактную зону, Вт/м².

Экспериментальные данные по теплоотдаче и аэродинамическому сопротивлению обрабатывали и представляли в числах подобия

$$Nu_i = \frac{\alpha_i d_0}{\lambda}; \quad Nu'_i = \frac{\alpha'_i d_0}{\lambda}; \quad Re = \frac{w d_0}{\nu}; \quad Eu = \frac{\Delta p}{\rho w^2}; \quad Nu = \frac{\alpha d_0}{\lambda}; \quad Nu' = \frac{\alpha' d_0}{\lambda}.$$

Здесь Nu_i, Nu'_i, Nu, Nu' — числа Нуссельта, вычисленные по приведенному коэффициенту теплоотдачи i -го ряда без учета (α_i) и с учетом ТКС (α'), а также рассчитанные по средним приведенным коэффициентам теплоотдачи пучка без учета и с учетом ТКС;

Re — число Рейнольдса;
 Eu — число Эйлера;
 w — скорость воздуха в узком сечении пучка, м/с;
 Δp — перепад статического давления воздуха на пучке, Па;
 α, α' — соответственно средние приведенные коэффициенты теплоотдачи пучка без учета и с учетом влияния ТКС;
 ρ — плотность воздуха, кг/м³;
 λ — коэффициент теплопроводности воздуха, Вт/(м · К);
 ν — коэффициент кинематической вязкости воздуха, м²/с.

За определяющую скорость потока принимали ее значение в узком сечении пучка, что вызвано стремлением к получению минимального расслоения опытных данных [1, 7], относящихся к различным пучкам с параметрическим изменением σ_1 . Физические константы воздуха принимали по его средней температуре в пучке. Для однорядных пучков I—III, а также одиночной трубы значения $\alpha_i = \alpha$, $\alpha'_i = \alpha'$ и соответственно $Nu_i = Nu$; $Nu'_i = Nu'$.

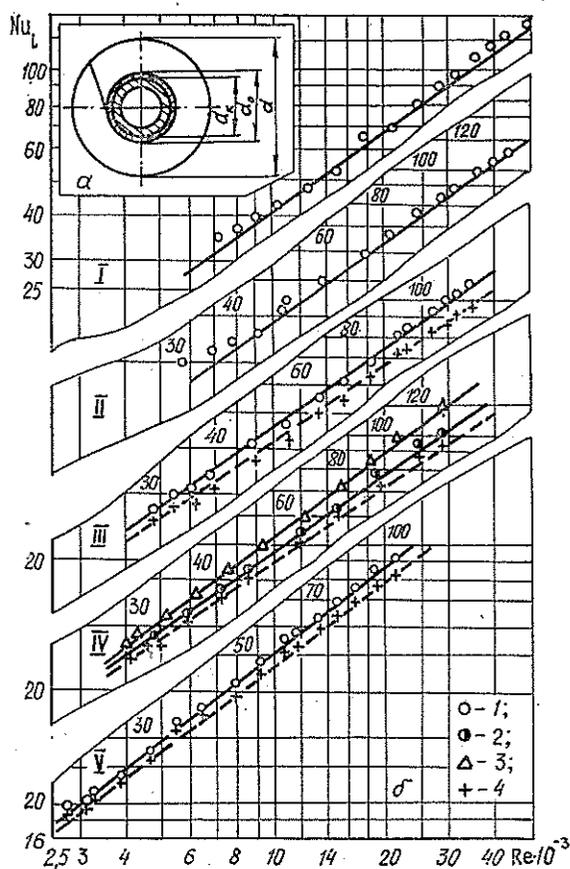


Рис. 1. Сечение оребренной трубы (а) и теплоотдача пучков (б); I, II, III, IV — номера пучков; V — одиночная труба: 1 — опытные точки; 2, 3 — опытные точки соответственно для 1- и 2-го рядов пучка IV; 4 — опытные точки с учетом R_k

На рис. 1 в логарифмических координатах опытными точками представлены результаты исследования теплоотдачи, которые аппроксимированы уравнениями подобия степенного вида:

$$Nu_i = C_i Re^{n_i}; \quad Nu'_i = C'_i Re^{m_i}. \quad (2)$$

Для однорядных пучков и одиночной трубы $C_i = C$; $C'_i = C'$, $n_i = n$; $m_i = m$. Средняя теплоотдача компоновок I—V описана уравнениями

$$Nu = C Re^n; \quad Nu' = C' Re^m. \quad (3)$$

Коэффициенты C_i , C'_i , C , C' , n_i , m_i , n и m в уравнениях (2), (3) определяли способом выбранных точек и методом наименьших квадратов (МНК), реализованном на ЭВМ «Искра-226» [3]. Численные значения этих коэффициентов даны в табл. 1. При

Таблица 1

Коэффициент	Численное значение коэффициента уравнений подобия для номера пучка, трубы					
	I	II	III	IV*		V
				1-й ряд	2-й ряд	
$C_i \cdot 10^2$	6,47/6	6,27/7,3	7,15/6,2	7,53/6,7	5,3/4,9	4,54/3,8
$n_i \cdot 10$	7/7,12	7/6,86	7/7,16	7/7,15	7,5/7,59	7,6/7,82
$C'_i \cdot 10^2$	—	—	7,93/7,6	8,52/7,2	5,94/5,9	5,05/4,5
$n'_i \cdot 10$	—	—	6,8/6,84	6,8/7	7,3/7,31	7,4/7,53
$C \cdot 10^2$	—	—	—	6,04/5,72		—
$\varepsilon \cdot 10, \%$	9,37/7,1	7,56/14,6	7,65/15,7	8,22/4,26	9,25/0,017	7,28/—
$\sigma_0, \%$	5,65/2,01	2,73/1,88	3,23/0,756	1,82/0,022	2,3/0,00	3,41/—
$r \cdot 10$	1,8/1,37	2,7/2,39	5,3/3,69	4,2/3,1		—
A	2,35/1,56	4,4/3,27	29,57/6,05	20,35/7,1		—

* Пучок IV: $n = 0,73/0,737$; $m = 0,71/0,715$; $C' \cdot 10^2 = 6,8/6,57$.

расчете коэффициентов методом МНК доверительная вероятность p принята равной 0,99, для которой вычислены доверительный интервал ε полученных уравнений и доверительный интервал для дисперсии σ_0 (предельные большие значения).

В табл. 1 в числителе представлены значения параметров, полученные при обработке опытных данных способом выбранных точек, а в знаменателе — статистической обработкой МНК. Исключение составляют параметры ε и σ_0 , в которых числитель характерен для Nu_2 по уравнению (2), а знаменатель действителен для уравнения подобия аэродинамического сопротивления пучков I—IV. Численные значения ε и σ_0 для Nu_2 в уравнении (2), описывающего теплоотдачу труб III, IV, V с учетом ТКС, не превышают соответствующих величин в табл. 1 для этих пучков и поэтому отдельно не приведены. Сплошные линии на рис. 1 соответствуют уравнениям подобия с вычисленными коэффициентами способом выбранных точек.

Анализ результатов обработки опытов примененными способами показал, что числа Nu , вычисленные по предлагаемым различным уравнениям для одного и того же пучка, отличаются не более чем на 3 % в принятом диапазоне изменения Re . Несколько большее расхождение обнаружено при описании опытных данных по сопротивлению. Здесь разброс опытных точек относительно приближающей кривой более значителен, что связано с меньшей точностью измерения малых перепадов давления воздуха на пучках в области изменения $Re = (4 \div 9) \cdot 10^3$. Применение же ЭВМ для вычисления МНК коэффициентов пропорциональности сведено к формальным вычислениям без учета данного экспериментального факта и понимания физического явления для заданной средней относительной ошибки опытов по Eu , равной $\pm 3,5$ %.

Теплоотдача пучков I—IV и трубы V монотонно увеличивается с ростом Re , причем возрастание логарифмически линейно. Но для плотного пучка I, характеризующегося малым σ_1 , наблюдается тенденция к криволинейному отклонению экспериментальных точек от аппроксимирующей прямой. Для шага $\sigma_1 \leq 1,25$ (пучки I, II) наблюдается хорошая связь между Nu и Re независимо от σ_1 . Теплоотдача в этих пучках не зависит от шага компоновки труб и (с отклонением $\pm 1,6$ %) обобщается уравнением

$$Nu = 0,0637 Re^{0,7} \quad (4)$$

действительным в интервале числа $Re = (6-50) \cdot 10^3$.

Последующее увеличение σ_1 до 1,562 (пучок III) сопровождается интенсификацией средней теплоотдачи в 1,12 раза. Повышение интенсивности теплоотдачи в пучках с ростом $\sigma_1 > 1,25$ косвенно подтверждается и данными по теплоотдаче 1-го ряда пучка IV ($\sigma_1 = 2,078$), которые можно рассматривать в качестве адекватных теплоотдаче однорядного пучка [7] этой компоновки. Коэффициенты теплоотдачи увеличились по сравнению с пучком III на 6 %.

Теплоотдача 2-го ряда по отношению к 1-му в двухрядном пучке IV возросла на 4...18 % вследствие повышения турбулентности потока. Применение двухрядной компоновки вместо однорядной с $\sigma_1 = 2,078$ способствует увеличению средней теплоотдачи пучка на 1,5...9 %.

Для одиночной трубы характерны повышенные коэффициенты теплоотдачи, которые при $Re = 5 \cdot 10^3$ превосходят в 1,053—1,21 раза, а при $Re = 23 \cdot 10^3$ — в 1,15—1,32 раза теплоотдачу однорядных пучков I—III и приближаются к значению теплоотдачи 2-го ряда пучка IV.

Кривые теплоотдачи $Nu' = f(Re)$, проведенные на рис. 1 штриховыми линиями, располагаются более полого по сравнению с зависимостями $Nu = f(Re)$. Тангенс угла

наклона их, равный m или m_i , соответственно меньше n или n_i (табл. 1). При $Re = idem$ снижение Nu' по отношению к Nu — количественное отражение влияния только ТКС (R_k). Интенсивность теплоотдачи уменьшается на 5...12%. Различия в значениях m и n наглядно и однозначно объясняется проведенными сравнительными опытами. Изменение термического сопротивления теплоотдачи в биметаллических трубах сопровождается различными наклоном кривых теплоотдачи.

Для труб I—V значения КПД ребра η , рассчитанные с учетом α и неравномерности распределения теплоотдачи по поверхности [6], находились в диапазоне 0,963—0,995.

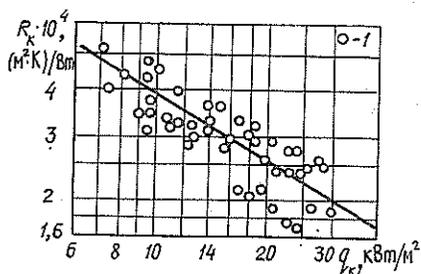


Рис. 2. Зависимость ТКС от плотности теплового потока: I — опытные точки по формуле (1)

составляет 1,5 мм, а максимальная высота — 0,0425 мм. Плотный контакт оболочки с несущей трубой имеет место по основаниям межреберных полостей. Наружная поверхность несущей трубы, шлифованная с шероховатостью, $R_z = 1,1$ мк.

Параметрическое увеличение σ_1 приводит к снижению аэродинамического сопротивления пучков I—IV (рис. 3), которое обобщается уравнением подобия:

$$Eu = A Re^{-\tau} \quad (6)$$

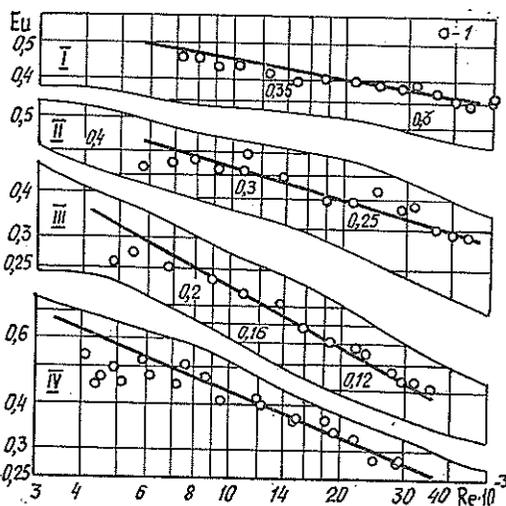


Рис. 3. Аэродинамическое сопротивление пучков: I, II, III, IV — номера пучков; I — опытные точки

Результаты сравнения тепловой эффективности пучков из различных типов труб приведены в табл. 2.

Тепловое совершенство пучка (трубы) оценивается коэффициентом тепловой эффективности $\psi = (\alpha\varphi)_i / (\alpha\varphi)_{эт}$ при $N_0 = idem$ или $\psi' = (\alpha\varphi)_i / (\alpha\varphi)_{эт}$ при $N_0 \varphi = idem$; здесь $(\alpha\varphi)_{эт}$ — теплоотдача эталонной поверхности, вычисленная по площади поверхности трубы с диаметром d_0 . В качестве эталонной поверхности принимали пучки 1, 2 (табл. 2) соответственно для компоновок I, IV. Из данных табл. 2 видно,

Величину ТКС (R_k , $(m^2 \cdot K)/Вт$) труб I—V определяют в зависимости от плотности теплового потока q_k , $кВт/м^2$, по формуле

$$R_k \cdot 10^4 = 14,89 q_k^{-0,59}, \quad (5)$$

которой на рис. 2 соответствует сплошная линия. Средняя температура контакта $t_k = 92,5 \dots 76,1$ °C.

Величина R_k при прочих постоянных условиях зависит прежде всего от совокупного механического состояния контактной зоны.

Выполненные микроскопические исследования обнаружили наличие вогнутостей в стенке алюминиевой ребристой оболочки под основанием ребер, заполненных воздухом. Ширина основания вогнутостей

Значения A и τ даны в табл. 1. Уравнения (2)—(4), (6) действительны в интервале $Re = (2,5 \div 50) \cdot 10^3$.

Значения тепловой эффективности и массовых характеристик исследованных пучков I, IV из труб Хильдебранд с трубами близкого диаметра, рекомендованными к применению [5] в калориферах сушильных камер, сопоставлены по методу В. М. Ангуфьева. Параметры рекомендованных труб следующие: $d = 69,5$ мм; $d_0 = 39,9$ мм; $h = 14,8$ мм; $S = 3$ мм; $\Delta = 0,6$; $\varphi = 14,67$. Несущая труба стальная $d_n = 38$ мм с толщиной стенки 2,5 мм. Расход алюминия на ребрение 1 м трубы Хильдебранд составляет 1,91 кг/м, а масса стальной трубы — 2,24 кг/м, что больше, по сравнению с отечественными трубами, соответственно на 13 и 4%. Удельная металлоемкость трубы Хильдебранд — 3,9 кг/м², отечественных — 2,1 кг/м².

Таблица 2

Но- мер пучка	S_1 , мм	S_2 , мм	$\frac{\alpha \varphi}{\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})}$	ψ	$\frac{\alpha \varphi'}{\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})}$	ψ'
			$N_0 = 6 \text{ Вт}/\text{м}^2$		$N_{0\varphi} = 60 \text{ Вт}/\text{м}^2$	
I	74	—	350	0,55	365	0,63
IV	133	74	400	0,6	430	0,71
1*	74	—	635	1	580	1
2*	133	74	665	1	604	1

* 1, 2 — номера пучков из труб [5].

что интенсивность теплоотдачи пучков из труб Хильдебранд в 1,4—1,59 раза ниже по сравнению с перспективными трубами отечественного производства.

ЛИТЕРАТУРА

[1]. Жукаускас А. А., Улинскас Р. В., Зинявичюс Ф. В. Теплоотдача шахматных пучков оребренных труб, поперечно обтекаемых вязкой жидкостью // Тр. АН ЛитССР. Сер. Б.— 1986.— Т. 3 (154).— С. 85—93. [2]. Кунтыш В. Б., Пирир А. Э., Федотова Л. М. Исследование контактного термического сопротивления биметаллических оребренных труб АВО // Лесн. журн.— 1980.— № 5.— С. 121—126. (Изв. высш. учеб. заведений). [3]. Применение ЭВМ «Искра-226» для статистической обработки эмпирических критериальных уравнений оребренных пучков / В. Б. Кунтыш, В. И. Мелехов, И. Г. Рябокобыленко и др. // Информ. листок Арханг. ЦНТИ.— 1987.— № 180—87.— 4 с. [4]. Средняя теплоотдача и гидравлическое сопротивление компактных пучков из круглых оребренных труб / Илгарубис В. С., Ермаков С. И., Улинскас Р. В. и др., АН ЛитССР. Ин-т физ.-техн. проблем энергетики.— Каунас, 1984.— 22 с.— Деп. в ЛитНИИЦТИ 16.10.84, № 1311—84. [5]. Теплообмен и аэродинамическое сопротивление однорядных биметаллических калориферов для лесосушильных камер / В. Б. Кунтыш, В. И. Мелехов, Е. С. Богданов и др. // Деревообработ. пром-сть.— 1985.— № 9.— С. 7—9. [6]. Юдин В. Ф. Теплообмен поперечно-ребренных труб.— Л.: Машиностроение, 1982.— 189 с. [7]. Spraggow E. M., Samie F. Heat transfer and pressure drop results for one-and two-row arrays of finned tubes // Int J. Heat Mass. Transfer.— 1985.— No 12, vol. 28.— P. 2247—2259.

УДК 630*812

КРАТКОВРЕМЕННАЯ ПРОЧНОСТЬ ДРЕВЕСИНЫ ПРИ КОНЦЕНТРАЦИИ НАПРЯЖЕНИЙ

Ю. М. ИВАНОВ, Ю. Ю. СЛАВИК

ЦНИИ строительных конструкций

Задержка релаксации максимальных напряжений в области вынужденных высокоэластических (ввэл) деформаций, выражающаяся при изгибе в явлении парадокса [4, 7], должна наблюдаться, как мы предполагали [3], в виде задержанного притупления пиков и при концентрации напряжений. Явление парадокса [3, 7] состоит в отсутствии роста временного сопротивления $\sigma_{вр}$ изгибу при превышении некоторой скорости нагружения в машинном испытании древесины. Наглядно это обнаруживается на графике $\lg t - \sigma$, показывающем отклонение опытных точек I вниз от прямой I длительной прочности (рис. 1, показано стрелками), которая соответствует медленному нагружению и длительной нагрузке (на рис. 1 t — время до разрушения, определяемое по продолжительности испытания t_1 с постоянной скоростью нагружения до момента разрушения [7]; σ — разрушающее напряжение при испытаниях моделино возрастающей нагрузкой (точки 2) или постоянное напряжение при длительных испытаниях (точки 3); σ , % к σ_{max}).

Известно, что превышение крайним напряжением предела вынужденной высокоэластичности $\sigma_{вэ}$ древесины [5] сопровождается интенсивным развитием перед разрушением изгибаемого элемента нелинейных ввэл деформаций, скорость которых растет экспоненциально с напряжением. В крайних сжатых волокнах изгибаемого элемента скорость краевой деформации определяется упругим ядром на остальной части поперечного сечения, сдерживающим развитие ввэл деформаций, что вызывает релаксацию напряжений в этих волокнах (появление зачаточной складки разрушения в них определяет потерю несущей способности изгибаемого элемента). При испытаниях с повышенными скоростями нагружения создаются условия задержки развития