

*В.Б. Кунтыш, д-р техн. наук, А.Б. Сухоцкий, канд. техн. наук  
(Белорусский государственный технологический университет, г. Минск, Беларусь);  
А.Э. Пиир, д-р техн. наук (Северный арктический федеральный университет, г. Архангельск, Россия)*

### Исследование теплоотдачи и сопротивления шахматных пучков воздухоохлаждаемых теплообменников из труб с накатными алюминиевыми ребрами различной высоты

Типичные представители воздухоохлаждаемых теплообменников — теплообменные секции аппаратов воздушного охлаждения (АВО) [1] технологических установок, калориферы для нагрева воздуха, конденсаторы холодильных установок, конденсационные утилизаторы тепла продуктов сгорания природного газа в производственных и отопительных котельных. Пучки теплообменников собираются из круглых биметаллических ребристых труб (БРТ) со спиральными алюминиевыми ребрами, наружный диаметр которых преимущественно составляет  $d = 56\text{--}57$  мм. Потребность в БРТ только для секций АВО, изготавливаемых в России, превышает 1,5 млн. метров в год. Трубы располагают в решетках пучков шахматно в вершинах равностороннего треугольника с шагом  $S_1 = S_2 = 63\text{--}64$  мм, значения которого являются оптимальными [2] по энергомассовым характеристикам.

Увеличение теплового потока  $Q$  (Вт) теплообменника в неизменных габаритах является эффективным направлением энерго- и ресурсосбережения. Тепловой поток

$$Q = kF\Delta t_{\text{cp}}, \quad (1)$$

где  $k$  — коэффициент теплопередачи, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $\Delta t_{\text{cp}}$  — средний температурный напор, К;  $F$  — площадь поверхности теплообмена, м<sup>2</sup>.

Согласно (1) при  $k = \text{idem}$  и  $\Delta t_{\text{cp}} = \text{idem}$  управлять величиной  $Q$  возможно изменением значения теплоотдающей площади  $F$ , которая для круглых БРТ

$$F = \pi d_0 \phi L, \quad (2)$$

где  $d_0$  — диаметр ребра у его основания, м;  $L$  — теплоотдающая длина труб теплообменника, м;

$\phi = 1 + \frac{2h}{sd_0}(d_0 + h + \Delta)$  — коэффициент оребрения для

круглоребристых труб ( $h$ ,  $s$  — высота и шаг ребра,  $\Delta$  — средняя толщина ребра).

Для серийных теплообменников, например секций АВО,  $L = \text{const}$ , а  $d_0 \approx 26$  мм. Таким образом, управ-

ление значением  $F$  возможно лишь посредством изменения  $\phi$ . Толщина ребер  $\Delta \approx 0,35\text{--}0,6$  мм труб АВО близка к оптимальной [1], а значения шага достигли  $s \approx 2,3\text{--}2,5$  мм и дальнейшее его уменьшение ограничено технико-экономической целесообразностью современных промышленных технологий [1, 2] оребрения труб алюминием. Следовательно, реальным геометрическим параметром, которым возможно управлять величиной  $\phi$  (или  $F$ ), является высота ребра. Для оптимизации высоты ребра БРТ АВО необходимы достоверные данные по теплоотдаче и аэродинамическому сопротивлению шахматных пучков с применяемыми поперечным  $S_1$  и продольным  $S_2$  шагами. Для исследования был выбран БРТ с накатными по технологии ВНИИМетмаш спиральными алюминиевыми ребрами, которые, по нашим оценкам, установлены в 65–70 % изготавливаемых в России АВО.

Цель работы — экспериментальное исследование влияния в расширенном интервале изменения высоты ребра биметаллической трубы с накатными алюминиевыми ребрами на теплоаэродинамические характеристики шахматного пучка и его энергетическую эффективность.

Для исследования пучков с различной высотой ребра выполнен анализ работ [3–9], который показал, что главным образом они посвящены поверхностям нагрева, применяемым в паровых котлах или транспортные энергетических установках [6]. Эти поверхности по геометрическим параметрам ребер, конструкции, материалу исполнению, технологии их оребрения, а также по компоновочным характеристикам пучков значительно отличаются от таковых в БРТ с алюминиевыми ребрами. Публикации [10–12] связаны с исследованием пучков воздухоохлаждаемых теплообменников из труб с накатными алюминиевыми ребрами, но в них отсутствует системный подход по установлению влияния высоты ребра, что затрудняет использование результатов в оптимизационных расчетах. Опытные данные [13] являются наиболее представительными, но они относятся к БРТ АВО, имеющим

значение  $\phi$  меньше, чем у применяемых серийных промышленных труб [12] АВО последнего (третьего) поколения. Следовательно, необходимы дополнительные исследования по влиянию  $h$  на теплоаэродинамические характеристики пучка, восполняющие пробелы проанализированных опытов.

В настоящей работе экспериментально изучено влияние изменения высоты накатанного однозаходного спирального ребра из алюминиевого сплава АД1М на приведенную теплоотдачу и потери давления поперечно обтекаемых воздухом пяти (I–V) шестирядных шахматных пучков с одинаковыми относительными шагами разбивки биметаллических труб — поперечным  $s_1 = S_1/d = 1,136$  и продольным  $s_2 = S_2/d = 0,905$ . Пучок I является базовым, абсолютные значения шагов труб в котором были  $S_1 = 64$  мм,  $S_2 = 51$  мм и соответствовали таковым в теплообменных секциях серийных АВО общепромышленного значения. Трубы во всех пучках располагали в вершинах равнобедренного треугольника. Геометрические параметры ребер труб пучка I были стандартными [2] для АВО последнего поколения. Ребра накатаны на несущей трубе с наружным диаметром 25 мм и толщиной стенки 2 мм. Труба выполнена из углеродистой стали 20.

Высоту ребер труб в пучках II–V уменьшали обточкой на токарном станке, при этом возрастала толщина ребра  $\Delta_2$  у вершины вследствие его трапецеидальной формы, а толщина ребра  $\Delta_1 = 0,9$  мм у основания оставалась неизменной. Средняя толщина ребра  $\Delta = 0,5(\Delta_1 + \Delta_2)$ . Диаметр ребра у его основания  $d_0 = d - 2h = 25,87$  мм и шаг  $s = 2,58$  мм были одинаковы у всех труб пучков. Коэффициент компактности пучка  $\Pi_i$  вычисляли по отношению  $\pi d_0 \phi / (S_1 \cdot S_2)$ . Масса 1 м несущей трубы равна  $b_n = 1,135$  кг при плотности стали  $\rho_{ст} = 7850$  кг/м<sup>3</sup>. Числовые значения геометрических параметров опытных пучков и ребер труб, а также масса алюминия  $b_{ал}$ , затрачиваемая на оребрение 1 м трубы, масса алюминия  $b'_{ал}$ , приходящаяся на 1 м<sup>2</sup> поверхности оребрения трубы, и общая масса  $b_i$  трубы, приходящаяся на 1 м<sup>2</sup> поверхности оребрения приведены в табл. 1.

Плотность алюминия  $\rho_{ал} = 2750$  кг/м<sup>3</sup>. С уменьшением высоты ребра общая масса металла на 1 м<sup>2</sup> поверхности оребрения возросла в 2,5 раза.

Опытные трубные пучки устанавливали в рабочем участке с поперечным сечением 400×400 мм разомкнутой аэродинамической трубы [1]. Трубы в пучках располагали вертикально. В каждом поперечном ряду

находилось число труб, равное для пучков: I — 6 шт; II, III — по 7 шт; IV — 9 шт; V — 10 шт. В соответствующих поперечных рядах устанавливали полутрубки, обеспечивающие постоянное сжатое фронтальное сечение пучка для прохода воздуха. Пучки собирали из труб натуральных размеров с отрезкой длиной  $l = 430$  мм при высоте (длине) оребренной части  $H = 400$  мм. Методика проведения опытов и оснащение контрольно-измерительными приборами аэродинамической трубы описаны в работе [1].

Приведенную теплоотдачу изучали методом локального теплового подобия с обогревом одной измерительной трубы-калориметра. Обогрев калориметра пароэлектрический с температурой кипения воды, соответствующей барометрическому давлению. Калориметр последовательно устанавливали в середине первого, третьего и пятого поперечных рядов. Исследуемые пучки относятся к тесным [1, 7], стабилизация теплоотдачи в которых наступает со второго поперечного ряда. В связи с этим нет необходимости в измерении теплоотдачи каждого ряда. Средний коэффициент теплоотдачи  $\alpha_i$  (Вт/(м<sup>2</sup>·К))  $i$ -го ряда пучка определяли по формуле  $\alpha_i = Q_i / (F(t_{стi} - t_1))$ , (3) где  $Q_i$  — тепловой поток, переданный трубой-калориметром воздуху, Вт;  $F = \pi d_0 \phi H$  — площадь наружной теплоотдающей поверхности трубы-калориметра, м<sup>2</sup>;  $t_{стi}$  — средняя температура поверхности стенки трубы-калориметра у основания ребер, °С;  $t_1$  — средняя температура воздуха перед калориметром, принимаемая равной средней температуре воздуха перед пучком, °С.

Средний приведенный коэффициент теплоотдачи  $\alpha$  трубного пучка вычисляли как среднее арифметическое коэффициентов теплоотдачи  $\alpha_i$  всех шести рядов. При усреднении  $\alpha$  считали, что  $\alpha_2 = \alpha_3 = \alpha_4 = \alpha_5$ , а коэффициент теплоотдачи шестого (последнего) ряда пучка  $\alpha_6 = 0,95\alpha_5$  [4]. Опытные данные обрабатывали и представляли в числах подобия Нуссельта  $Nu_i = \alpha d_0 / \lambda$ ,  $Nu = \alpha d_0 / \lambda$ ; Рейнольдса  $Re = \omega d_0 / \nu$ ; Эйлера  $Eu = \Delta P / (\rho \omega^2)$ , где  $\lambda$ ,  $\nu$ ,  $\rho$  — коэффициенты теплопроводности, кинематической вязкости воздуха и его плотность при средней температуре;  $\Delta P$  — перепад статического давления воздуха в пучке;  $\omega$  — скорость воздуха в сжатом поперечном сечении пучка. Относительная максимальная квадратичная погрешность значений  $Nu_i$ ,  $Re$ ,  $Eu$  не превышала соответственно значений 3,1; 2,8 и 3,3%.

Таблица 1

| Номер пучка | Параметры ребер и пучка, мм |       |      |       |            |          | $\phi$ , | $\Pi_i$ , м <sup>2</sup> /м <sup>3</sup> | $b_{ал}$ , кг/м | $b'_{ал}$ , кг/м <sup>2</sup> | $b_i$ , кг/м <sup>2</sup> |
|-------------|-----------------------------|-------|------|-------|------------|----------|----------|------------------------------------------|-----------------|-------------------------------|---------------------------|
|             | $S_1$                       | $S_2$ | $d$  | $h$   | $\Delta_2$ | $\Delta$ |          |                                          |                 |                               |                           |
| I           | 64,0                        | 51,0  | 56,3 | 15,23 | 0,4        | 0,65     | 20,00    | 499                                      | 1,784           | 1,095                         | 1,79                      |
| II          | 55,7                        | 44,4  | 49,0 | 11,57 | 0,6        | 0,75     | 14,23    | 468                                      | 1,246           | 1,077                         | 2,05                      |
| III         | 50,0                        | 39,9  | 44,0 | 9,07  | 0,6        | 0,75     | 10,69    | 436                                      | 0,891           | 1,026                         | 2,33                      |
| IV          | 42,0                        | 33,5  | 37,0 | 5,56  | 0,7        | 0,80     | 6,38     | 369                                      | 0,564           | 1,088                         | 3,29                      |
| V           | 37,5                        | 29,9  | 33,0 | 3,57  | 0,8        | 0,85     | 4,24     | 307                                      | 0,395           | 1,148                         | 4,45                      |

Результаты исследований безразмерных коэффициентов теплоотдачи ( $Nu_i$ ) первого, третьего, пятого рядов и безразмерных потерь давления ( $Eu$ ) воздуха для шести рядов пучков I–V в зависимости от безразмерной скорости ( $Re$ ) воздуха представлены на **рис. 1, 2**. Эти результаты аппроксимированы уравнениями подобия степенного вида

$$Nu_i = C_i Re^{n_i}; \quad (4)$$

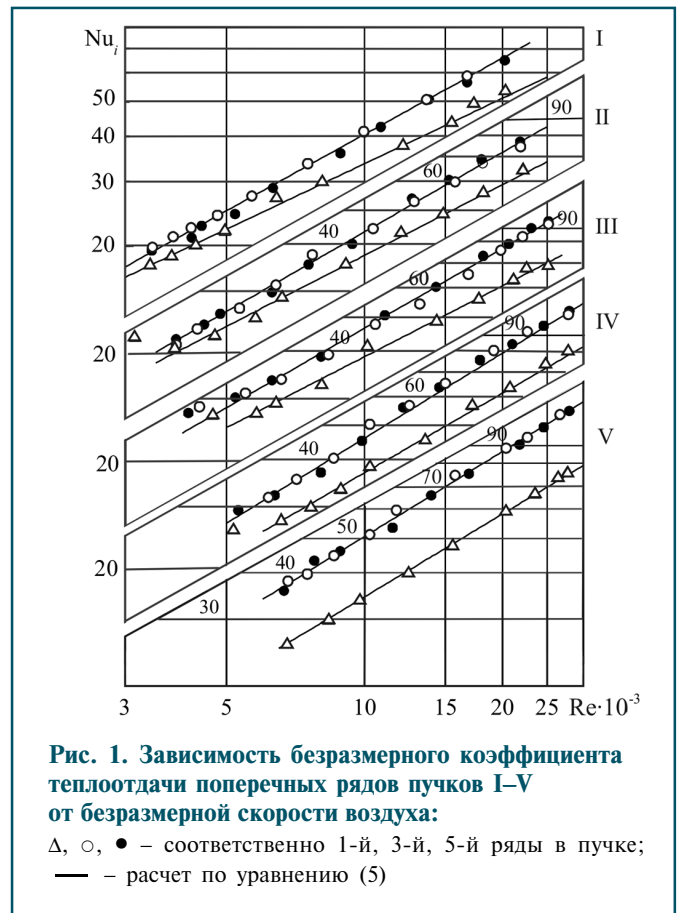
$$Eu_i = B Re^{-m}, \quad (5)$$

а средняя теплоотдача пучков подчиняется уравнению  $Nu = C Re^n$ . (6)

Коэффициенты теплоотдачи  $Nu_i$ ,  $Nu$  вычислены по полной площади поверхности оребрения. Значение коэффициентов пропорциональности  $C_i$ ,  $C$ ,  $B$  и показателей степени  $n_i$ ,  $n$ ,  $m$  в диапазоне  $Re = (3 - 30) \cdot 10^3$  даны в **табл. 2**.

Для наглядности влияния изменения высоты ребра на теплоотдачу и сопротивление пучка в табл. 2 также указаны значения  $Nu$ ,  $Nu \cdot \phi$  и  $Eu$  пучков I–V для чисел  $Re = 3\ 000$  и  $25\ 000$ , по которым построен **рис. 3**. Численное значение  $Nu \cdot \phi$  является безразмерным коэффициентом средней теплоотдачи пучка, отнесенным к площади трубы, вычисленной по диаметру  $d_0$  основания ребра, и характеризует удельный теплосъем трубы к воздуху.

Анализ рис. 1–3 и данных табл. 2 показывает, что общим правилом для пучков I–V при  $Re = idem$

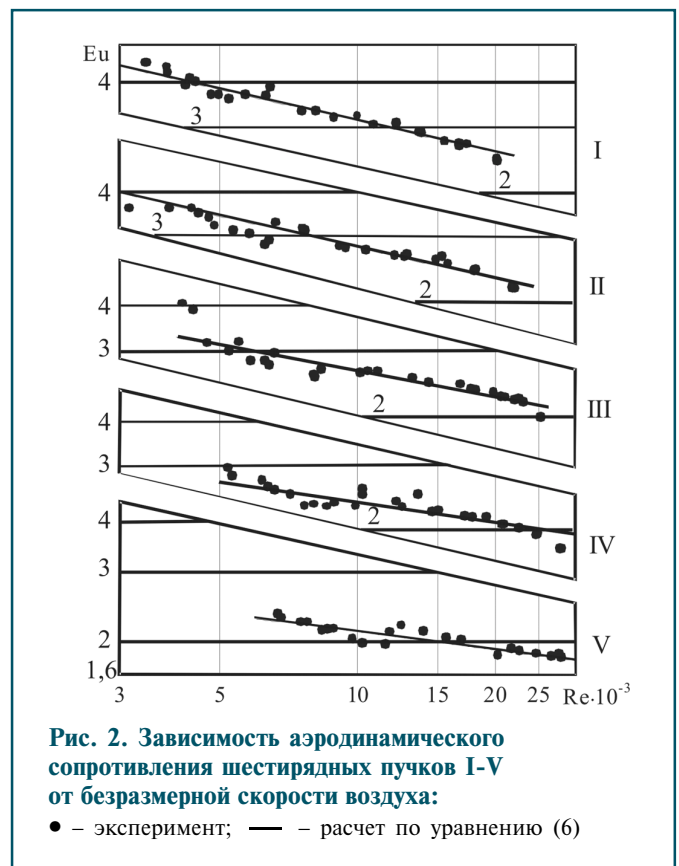


**Рис. 1. Зависимость безразмерного коэффициента теплоотдачи поперечных рядов пучков I–V от безразмерной скорости воздуха:**

Δ, ○, ● – соответственно 1-й, 3-й, 5-й ряды в пучке; — – расчет по уравнению (5)

**Таблица 2**

| Параметры          | Номера рядов в пучке | Номер пучка |      |      |      |      |
|--------------------|----------------------|-------------|------|------|------|------|
|                    |                      | I           | II   | III  | IV   | V    |
| $C_i \cdot 10$     | 1                    | 1,34        | 0,94 | 0,94 | 0,45 | 0,31 |
|                    | 2–5                  | 0,64        | 0,53 | 0,57 | 0,36 | 0,38 |
| $n_i \cdot 10$     | 1                    | 6,0         | 6,5  | 6,5  | 7,3  | 7,6  |
|                    | 2–6                  | 7,0         | 7,3  | 7,3  | 7,8  | 7,8  |
| $C \cdot 10$       | –                    | 0,72        | 0,58 | 0,62 | 0,38 | 0,36 |
| $n \cdot 10$       | –                    | 6,83        | 7,17 | 7,17 | 7,70 | 7,80 |
| $B$                | –                    | 41,1        | 37,5 | 22,0 | 12,3 | 9,2  |
| $m \cdot 10$       | –                    | 2,8         | 2,8  | 2,3  | 1,8  | 1,6  |
| $h/d_0$            | –                    | 0,59        | 0,45 | 0,35 | 0,22 | 0,14 |
| $h/(s - \Delta)$   | –                    | 7,89        | 6,32 | 4,96 | 3,12 | 2,06 |
| <b>Re = 3 000</b>  |                      |             |      |      |      |      |
| $Nu$               | –                    | 17,2        | 18,1 | 19,4 | 18,0 | 18,6 |
| $Nu \cdot \phi$    | –                    | 344         | 258  | 207  | 115  | 79   |
| $Eu$               | –                    | 4,37        | 3,99 | 3,48 | 2,90 | 2,54 |
| <b>Re = 25 000</b> |                      |             |      |      |      |      |
| $Nu$               | –                    | 73,0        | 82,0 | 88,8 | 92,0 | 97,3 |
| $Nu \cdot \phi$    | –                    | 1460        | 1167 | 949  | 587  | 413  |
| $Eu$               | –                    | 2,41        | 2,20 | 2,14 | 1,98 | 1,81 |



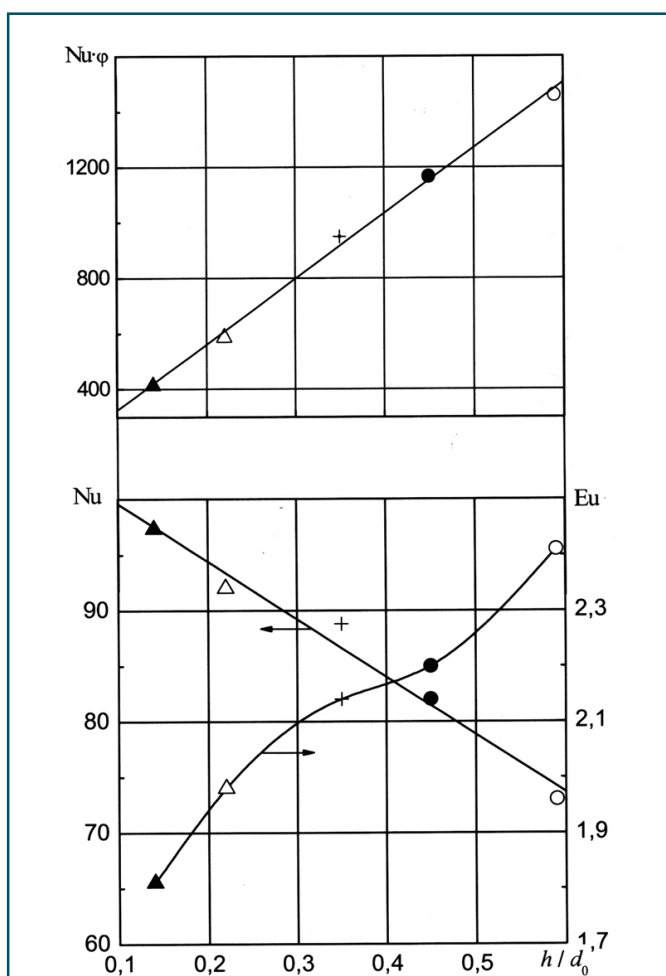
**Рис. 2. Зависимость аэродинамического сопротивления шестирядных пучков I–V от безразмерной скорости воздуха:**

● – эксперимент; — – расчет по уравнению (6)

является увеличение коэффициента теплоотдачи пучка, уменьшение удельного сьема тепла и аэродинамического сопротивления пучка с уменьшением высоты ребра. Однако эти процессы как качественно, так и количественно протекают по-разному.

Изменение средней теплоотдачи ( $Nu$ ) и удельного сьема тепла ( $Nu \cdot \phi$ ) пучка (см. рис. 3) от высоты ребра подчиняется линейной зависимости. Уменьшение  $h$  в 4,27 раза (от 15,23 мм (базовый пучок I) до 3,57 мм (пучок V)) сопровождается повышением интенсивности теплоотдачи на 8 % при  $Re = 3\ 000$ , на 33 % при  $Re = 25\ 000$ , но при этом удельный сьем тепла пучка уменьшился соответственно в 4,35 и 3,53 раза, а теплоотдающая площадь трубы снизилась в  $20/4,24 = 4,71$  раза.

Относительная величина сьема тепла снижается при уменьшении высоты ребра и росте  $Re$ . Это не противоречит опытным данным работ [4, 13] и объясняется



**Рис. 3. Влияние относительной высоты алюминиевого спирального ребра при  $Re = 25\ 000$  на безразмерный средний коэффициент теплоотдачи, удельный сьем тепла и аэродинамическое сопротивление пучков I-V:**

○, ●, +, Δ, ▲ – расчетные значения по уравнениям (6) и (7) соответственно для пучков I, II, III, IV, V

влиянием следующих двух факторов. Во-первых, уменьшение высоты ребра трубы улучшает гидродинамику потока воздуха в межреберных полостях шириной  $u = s - \Delta$ , выражающуюся в следующем. Относительная глубина полости  $h/(s - \Delta) = h/u$  для анализируемых пучков I, V снижается от 7,89 до 2,06 (см. табл. 2). Скорость воздуха по высоте полости от вершины до основания ребра более выровнена, а градиент скорости значительно меньше [1] по сравнению с высокими узкими межреберными полостями [4]. На боковых поверхностях низких (коротких) ребер с  $h/u \leq 2$  (пучок V) формируется пограничный слой воздуха меньшей толщины [14], что благоприятно влияет на интенсивность теплоотдачи. Увеличение скорости воздуха (числа  $Re$ ) способствует лучшей вентиляции межреберных полостей трубы и возрастанию турбулизации потока.

Положительное влияние второго фактора на рост интенсивности средней приведенной теплоотдачи ребер уменьшенной высоты (пучки II-V) по сравнению с базовой (пучок I) обусловлено различием в форме торца ребер. Ребра труб пучка I вследствие их изготовления по технологии ВНИИМетмаш имели плавно очерченные удобообтекаемой формы торцы. Но после уменьшения высоты ребер обточкой на токарном станке торцы приобрели острые кромки. С острых кромок происходит срыв потока и образование узкой отрывной области шириной  $(3-4)\Delta_2$  на периферии боковой поверхности ребра, распространяющейся до миделева сечения трубы. Наблюдается повышение местной теплоотдачи на этой поверхности. На острых кромках утолщающихся ребер при их уменьшающейся высоте в пучках II-V образуются мелкие вихри, которые непрерывно сносятся потоком вниз по течению, турбулизируя его. В пучках I-V относительные шаги  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$  были постоянными, а значит, изменение межтрубной турбулентности потока определялось исключительно высотой ребра.

Косвенным индикатором роста степени турбулентности потока от воздействия  $h$  является увеличение угла наклона кривых теплоотдачи  $Nu_i = f(Re)$  и  $Nu = f(Re)$  к оси абсцисс (см. рис. 1). Тангенс угла наклона  $n_i$ ,  $n$  этих кривых с уменьшением высоты ребра возрастает как для первого, так и для стабилизированных рядов пучков I-V. Например, для стабилизированных рядов труб пучков I, V рост составил  $0,7/0,78 = 1,11$  раза, а для приведенной средней теплоотдачи этих пучков он равен  $0,78/0,683 = 1,14$  раза.

Также с уменьшением высоты ребра увеличивается коэффициент эффективности (КПД)  $E$  ребра, что способствует росту интенсивности теплоотдачи в коротких ребрах. Для исследованного интервала  $Re$  коэффициент  $E$  ребер пучка I был  $0,94-0,9$ , а у ребер пучка V возрос до значений  $0,98-0,93$  в среднем на 4 %.

Из рис. 2, на котором приведены зависимости  $Eu = f(Re)$ , следует, что с уменьшением высоты ребра сопротивление также снижается, например для  $Re = 25\ 000$  (см. табл. 2) снижение достигает  $2,41/1,81 =$

= 1,33 раза для пучка **V**. Кривые сопротивления в логарифмических коэффициентах по мере уменьшения высоты  $h$  располагаются более полого. Тангенс угла наклона их изменяется от  $-0,28$  до  $-0,16$ .

Результаты исследования пучков **I–V** обобщены уравнениями подобия для средней теплоотдачи

$$Nu = (0,0245 + 0,0824x)Re^{0,81-0,22x}, \quad (7)$$

для аэродинамического сопротивления

$$Eu = (-2,85 + 78,3x)Re^{-0,122-0,3x}, \quad (8)$$

где  $x = h/d_0$  — относительная высота ребра.

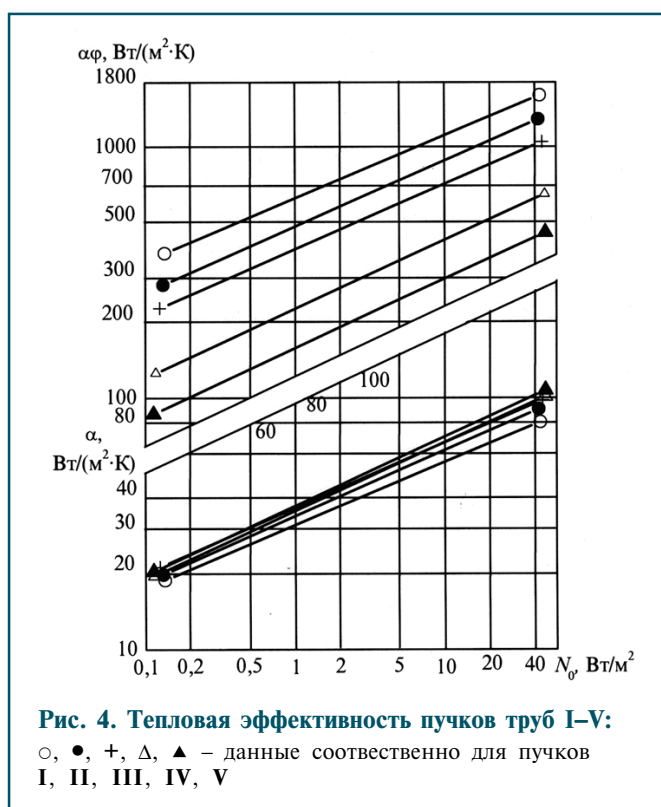
Уравнения (7, 8) действительны в интервале  $x = 0,14 - 0,6$  и  $Re = (3 - 30) \cdot 10^3$ .

Анализ кривых в нижней части **рис. 4** показывает эффективность участия в теплообмене единицы площади оребренной поверхности труб пучков **I–V** при одинаковой затрате мощности  $N_0 = idem$  (Вт/м<sup>2</sup>) на прокачку воздуха через межтрубное пространство пучка. С наибольшей интенсивностью в теплообмене участвуют трубы пучка **V** с наименьшей высотой ребра, а наименьшая интенсивность характерна для труб базового пучка **I**. Различие в значениях  $\alpha$  при  $N_0 = idem$  составляет 1,2–1,27 раза в исследованном интервале. Интенсивность ощутимо снижается при достижении высоты ребра  $h = 11,6$  мм (пучок **II**). Однако этот анализ отражает лишь теплофизическую сторону процесса теплообмена и актуален для выбора способа интенсификации.

Эффективность пучков **I–V** следует оценивать коэффициентом тепловой эффективности  $\psi_i = (\alpha\phi)_i / (\alpha\phi)_{эт}$  при  $N_0 = idem$ , где  $(\alpha\phi)_i$  и  $(\alpha\phi)_{эт}$  — удельные теплосъемы  $i$ -го (**I–V**) и эталонного пучков. Для расчета использованы кривые (см. **рис. 4**, верхняя часть), которые построены по опытным данным этой работы. За эталонный пучок принят пучок **V** с наименьшей высотой ребер труб. Для него  $\psi_{эт} = \psi_V = 1$ . Для  $N_0 = 10$  Вт/м<sup>2</sup> получены следующие значения коэффициента тепловой эффективности исследованных пучков:  $\psi_I = 3,6$ ;  $\psi_{II} = 2,93$ ;  $\psi_{III} = 2,33$ ;  $\psi_{IV} = 1,36$ . Коэффициент тепловой эффективности динамично возрастает с увеличением высоты ребра и ее значение  $h = 15,2$  мм при  $s = 2,58$  мм не является предельным для труб секций АВО. Это актуальный практический вывод для изготовителей БРТ с алюминиевыми ребрами для АВО. Шаги БРТ  $S_1$  и  $S_2$  в решетках секций позволяют увеличить высоту ребра до  $h \approx 16$  мм при указанном сопряженном значении шага ребер.

#### Список литературы

1. Кунтыш В.Б., Кузнецов Н.М. Тепловой и аэродинамический расчеты оребренных теплообменников воздушного охлаждения. / СПб.: Энергоатомиздат, 1992. 280 с.
2. Основы расчета и проектирования теплообменников воздушного охлаждения. Справочник / под общ. ред. В.Б. Кунтыша, А.Н. Бессонного. СПб.: Недра. 1996. 512 с.
3. Стасюлявичюс Ю., Скринска А. Теплоотдача попереч-



- но обтекаемых пучков ребристых труб. / Вильнюс, Минтис, 1974. 243 с. 4. Юдин В.Ф. Теплообмен поперечно-ребренных труб. / СПб.: Машиностроение, 1982. 189 с. 5. Жукаускас А., Улинскас Р. Теплоотдача поперечнообтекаемых пучков ребристых труб. / Вильнюс, Мокслас, 1986, 204 с. 6. Теплогидравлические характеристики компактных пучков ребристых труб / В. Илгарубис, А. Буткус, Р. Улинскас и др. // Труды Литовской академии наук. Энергетика, 1990. № 2. С. 116–133. 7. Письменный Е.Н. Теплообмен и аэродинамика пакетов поперечно-ребренных труб. Киев. Альтерпресс, 2004. 244 с. 8. Brauer H. Wärme- und stromungstechnische. Untersuchungen an quer angestromten Rippenrohrbündeln // Chemie – Ing. Technik. 1961. Bd. 33. H. 5. S. 327–335, H. 6. S. 431–438. 9. Brauer H. Spiralrippenrohre für Querstrom – Wärmeaustauscher // Kalttechnik. 1961. Bd. 13. H. 8. S. 274–279. 10. Brigs E.D., Young E.H. Convection heat transfer and pressure drop of air flowing across triangular pitch banks of finned tubes // Chem. Eng. Prog. Symp. Ser. 1963. Vol. 89. Nr. 41. P. 1–10. 11. Пиир А.Э., Кунтыш В.Б. Исследование влияния коэффициента оребрения на теплоотдачу и аэродинамическое сопротивление шахматных пучков аппаратов воздушного охлаждения. АЛТИ, Архангельск. 1990. 22 с. Депонирована в ВИНТИ 21.11.90. № 5890. В. 90. 12. Кунтыш В.Б. Теплоотдача и аэродинамическое сопротивление пучков с ленточным оребрением для аппаратов воздушного охлаждения / Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2000. № 7. С. 11–15. 13. Кунтыш В.Б., Стенин Н.Н. Влияние высоты круглого спирального ребра на теплоотдачу и аэродинамическое сопротивление шахматных пучков труб // Вестник Международной академии холода. 1998. № 2. С. 22–25. 14. Brauer H. Wärmeübertragung und Stromungswiderstand bei fluchtend und versetzt angeordneten Rippenrohren // Dechema Monographie. 1962. Vol. 40. S. 41–76.