

УДК 536.24: 676.056

А. Б. Сухоцкий, В. Б. Кунтыш, Г. С. Сидорик

Белорусский государственный технологический университет

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОГО МАСЛЯНОГО
БИМЕТАЛЛИЧЕСКОГО КАЛОРИФЕРА
ДЛЯ СРЕДНЕТЕМПЕРАТУРНОГО НАГРЕВА ВОЗДУХА**

Выполнены вариантные теплогидравлические и аэродинамические расчеты масляного калорифера из биметаллических ребристых труб (БРТ) с винтовыми накатными алюминиевыми ребрами, отличающиеся конструкцией стальной несущей трубы. В базовом варианте калорифера применены несущие трубы с гладкой внутренней поверхностью, а также проработаны варианты из несущих труб с плавно очерченными поперечными кольцевыми или спиральными выступами либо с плотной установкой внутрь несущих труб ретардеров из скрученной ленты. Выбранные способы интенсификации теплоотдачи масла отличаются технологичностью в серийном производстве БРТ и наличием освоенного оборудования для их реализации. По совокупности энергомассовых показателей при индивидуальном проектировании калорифера в области турбулентного движения масла следует использовать БРТ с кольцевой накаткой поперечных выступов.

Ключевые слова: калорифер, биметаллическая ребристая труба, нагрев воздуха, коэффициент теплопередачи.

A. B. Sukhotskiy, V. B. Kuntysch, G. S. Sidorik

Belarusian State Technological University

**DESIGN OF A POWER EFFECTIVE OIL BIMETALLIC HEATER
FOR MEDIUM TEMPERATURE HEATING OF AIR**

There were performed variant thermo hydraulic and aero dynamical calculations of oil air heater made of bimetallic ribbed tubes (BRT) with screwed rolling aluminum ribs which differ with design of steel bearing tube. In the basic variant of air heater there were applied bearing tubes with a smooth inner surface. There were also worked out variants applying bearing tubes with smoothly delineated cross circular or spiral projections or dense installation of retarders made of twisted tape inside of bearing tubes. Chosen ways of intensification of heat emission of oil are notable for their technological effectiveness in serial production of BRT and availability of mastered equipment for their realization. On the basis of total energy and mass rates during the individual designing of air heater in the area of turbulent movement of oil one should use BRT with circular knurl of cross projections.

Keywords: calorifer, bimetallic ribbed tube, air heating, coefficient of heat transfer.

Введение. В бумагоделательных машинах для ускорения процесса сушки применяются конвективные сушилки [1], в которых температура сушильного воздуха составляет 160–300°C, при конвективной сушке обоев используется воздух с температурой 190–200°C. Такие же температуры агента сушки имеют место в установках сушки коры, древесины [2], а в процессах обжига керамических изделий значения температуры возрастают до 350–400°C [3]. Применение стандартных биметаллических калориферов [1], рассчитанных на давление пара 1,2 МПа, не позволяет обеспечить требуемые значения агента сушки. Для этого нужен водяной пар давлением 1,7–8,5 МПа, что сопряжено с существенным ростом металлоемкости калорифера вследствие увеличения толщины стенок конструктивных элементов по условию прочности. Подобное техническое решение представляется нецелесообразным по следующим причинам. На предприятиях имеются

бумажные и древесные отходы, которые возможно использовать как топливо для сжигания в соответствующих печах. В печи размещается змеевик, внутри которого осуществляется вынужденное движение теплоносителя, но при барометрическом давлении. Таковым может быть, например, соответствующее минеральное масло. Нагретое масло насосом по маслопроводу вводится в трубки калорифера, охлаждается, передавая тепло агенту сушки, и возвращается обратно в змеевик печи. Полезно вовлекать внутризаводские отходы с соответствующей экономией первичного топлива. Однако применение стандартных калориферов с масляным теплоносителем неэффективно из-за малого внутреннего диаметра трубок ($d_{\text{вн}} = 13,6$ мм) и вследствие ощутимого роста гидравлических сопротивлений. Требуется проектирование индивидуального калорифера, при этом поверхность теплообмена должна также удовлетворять коррозионной устойчивости в среде агента

сушки, иметь развитую за счет оребрения поверхность и обеспечить интенсифицированный теплообмен со стороны масла.

Основная часть. Целью работы является создание калорифера улучшенных энергомаховых показателей для нагрева воздуха повышенной температуры минеральным маслом.

Наиболее полно изложенным требованиям к поверхности теплообмена удовлетворяют биметаллические ребристые трубы (БРТ) со спиральными накатными ребрами, при этом несущая труба выполнена стальной. Трубы серийно изготавливаются по известной технологии ВНИИметмаш [4] целым рядом заводов, например ЗАО «Октябрьмаш» (Республика Башкортостан), ОАО «Калориферный завод» (г. Кострома, Российская Федерация) и др. Максимальное развитие площади поверхности оребрения БРТ по воздуху обеспечивается следующими параметрами: наружный диаметр ребра $d = 57$ мм, высота, шаг и средняя толщина ребра, соответственно, мм: $h = 15,2$, $s = 2,3$, $\Delta = 0,5$; диаметр ребра у основания $d_0 = d - 2h = 26,6$ мм. Коэффициент оребрения трубы $\phi = 20,4$. Несущая труба наружным диаметром $d_n = 25$ мм, внутренним диаметром $d_1 = 23$ мм выполнена из углеродистой стали. В базовом варианте калорифера внутренняя поверхность трубы гладкая. Трубы скомпонованы в четырехрядный ($z = 4$) равносторонний шахматный пучок с поперечным шагом $S_1 = S_2' = 58,8$ мм. Греющим теплоносителем является минеральное масло АМТ-300 [5], которое движется внутри труб по перекрестно-противоточной схеме по отношению к воздуху и двухходовым по маслу. Теплогидравлический расчет калорифера (с размерами трубного пучка: расстояние между трубными решетками $L = 1,65$ м, ширина пучка $B = 1$ м) осуществлялся для нагрева воздуха $G_2 = 4,75$ кг/с. Для указанных значений тепловой поток калорифера $Q = 719$ кВт, массовый расход масла $G_1' = 5,2$ кг/с, температура масла на выходе из калорифера $t_1'' = 308^\circ\text{C}$, скорость масла внутри труб $w_1 = 0,5$ м/с, которая обеспечивает турбулентный режим движения. В результате расчета базового варианта получены: $k = 15,45$ Вт/(м²/°С); расчетная площадь поверхности теплопередачи по оребрению $F_p = 137,5$ м²; установленная в указанных габаритах площадь $F_v = 200,3$ м²; потери давления масла $\Delta P_m = 1067$ Па; потребляемая вентилятором мощность $N_b = 0,77$ кВт; потребляемая масляным насосом мощность $N_n = 0,01$ кВт.

Эффективным направлением улучшения энергетических и массовых показателей является применение интенсификации теплоотдачи. Термическое сопротивление теплоотдаче масла несколько больше термосопротивления возду-

ха. В связи с этим необходима интенсификация теплоотдачи масла. Целесообразно применять апробированные и освоенные промышленностью способы интенсификации. Одним из таких способов является создание кольцевой накатки на поверхности несущей трубы с образованием плавно очерченных удобно обтекаемых кольцевых выступов на внутренней поверхности (рис. 1) [5]. Для однофазных теплоносителей оптимальные параметры выступов внутри трубы: $D / d_1 = 0,93-0,95$; относительный шаг $s / d_1 = 0,25-0,50$, где D – диаметр выступа в свету; s – шаг выступов. Если потери давления внутри трубы не лимитируются, то глубина накатки может быть увеличена до 0,9. Использование интенсификации при сохранении теплового потока $Q = 719$ кВт позволило применить трехрядный пучок БРТ с одним ходом масла. Скорость масла уменьшилась до $w_1 = 0,33$ м/с.

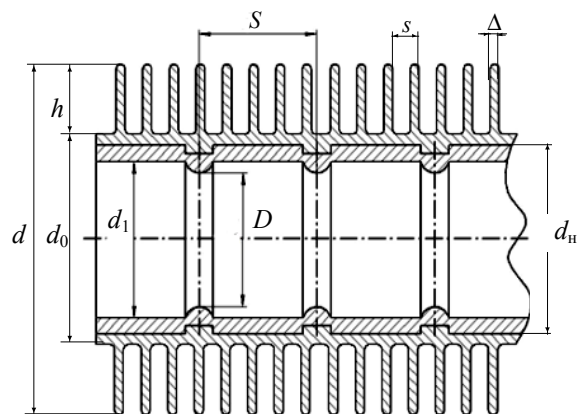


Рис. 1. Биметаллическая ребристая труба с поперечной кольцевой накаткой на поверхности несущей трубы

Винтовая накатка (рис. 2) на несущей трубе относится к такому же типу интенсификаторов, как и кольцевая. Используется эффект закрутки потока по всему сечению трубы и его срыв. При расчете применены критериальные уравнения работы [6]. Пучок труб остается неизменным в сравнении с предыдущим вариантом, скорость масла также сохраняется прежней.

Эффективным средством интенсификации теплоотдачи является ленточный завихритель (ретардер), представляющий скрученную ленту небольшой толщины, устанавливаемую внутрь гладкой трубы на всю длину (рис. 3). При расчетах приняли $S / d_1 = 2,5$; толщина стальной ленты $\delta = 1$ мм, высота – 23 мм.

Компоновочные параметры пучка и режимные параметры остаются как в калорифере с кольцевой накаткой БРТ. Теплоотдача в трубах с ретардерами выше по сравнению с гладкими БРТ вследствие возникновения вторичных течений.

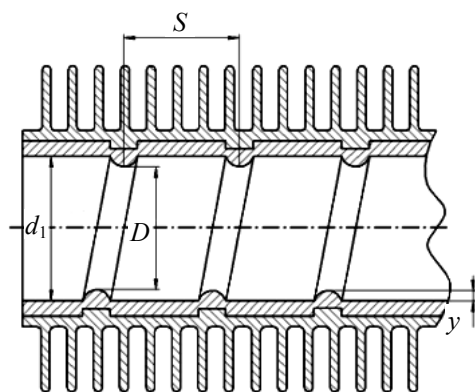


Рис. 2. Биметаллическая ребристая труба с винтовой накаткой

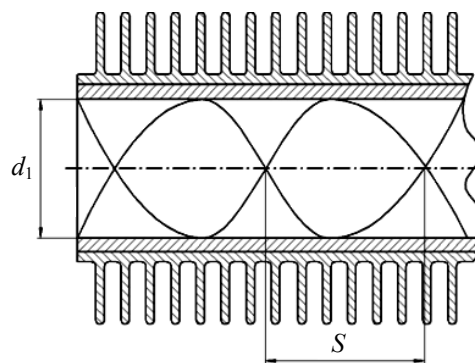


Рис. 3. Биметаллическая ребристая труба с ленточным завихрителем

Данные различных типов калориферов

Тип калорифера	k , Вт/(м ² ·К)	F_p , м ²	$F_{уст}$, м ²	N_b , кВт	$\Delta p_{\text{масла}}$, Па	$N_n \cdot 10^{-3}$ кВт	E , кВт / (кВт·К)
БРТ с гладкой поверхностью	15,5	198	200	0,77	1067	9,8	3,95
БРТ с кольцевой накаткой $S/d_1 = 0,5$ при							
а) $D/d_1 = 0,94$;	21,2	145	152	0,61	361	3,3	5,03
б) $D/d_1 = 0,90$	23,3	132	152	0,61	567	5,0	5,01
БРТ с винтовой накаткой	20,3	152	152	0,61	937	8,5	4,98
БРТ с ретардерами	21,0	147	152	0,61	376	3,4	5,02

В качестве показателя эффективности калорифера принят энергетический коэффициент $E = [Q / (N_n + N_b) \Delta t_{cp}]$, кВт / (кВт·К), где Q – тепловой поток; $(N_n + N_b)$ – затраты мощности на привод побудительных устройств теплоносителей; Δt_{cp} – температурный напор. Результаты расчетов сведены в таблицу.

В таблице видно, что значения E для калориферов с интенсифицированным теплообменом различаются не более чем на 1%. Также одинаковы и установленная площадь, и объем пучка $V = BLA = 1 \cdot 1,165 \cdot 0,1018 = 0,168 \text{ м}^3$, где $A = S_2(z - 1)$ – глубина пучка, м; S_2 – продоль-

ный шаг труб в пучке. В базовом варианте $V = 1 \cdot 1,165 \cdot 0,0509 \cdot (4 - 1) = 0,252 \text{ м}^3$. Интенсификация теплоотдачи масла независимо от технического решения реализации уменьшает объемную характеристику (габарит) в $0,252 / 0,168 = 1,5$ раза, при этом металлоемкость снизится в $200 / 152 = 1,32$ раза.

Вывод. По совокупности тепловых, аэродинамических, гидравлических и энергетических показателей наиболее эффективным является калорифер из БРТ с интенсификацией теплоотдачи масла в турбулентном режиме кольцевой накаткой.

Литература

1. Бельский А. П., Лотвинов М. Д. Вентиляция бумагоделательных машин. М.: Лесная пром-сть, 1990. 216 с.
2. Санников В. А. Вторичные энергетические ресурсы целлюлозно-бумажной промышленности. М.: Лесная пром-сть, 1983. 216 с.
3. Антуфьев В. М., Гусев Е. К., Ивахненко В. В. Теплообменные аппараты из профильных листов. Л.: Энергия, 1972. 128 с.
4. Основы расчета и проектирования теплообменников воздушного охлаждения / под общ. ред. В. Б. Кунтыша, А. Н. Бессонного. СПб.: Недра, 1996. 512 с.
5. Бажан П. И., Каневец Г. Е., Селиверстов В. М. Справочник по теплообменным аппаратам. М.: Машиностроение, 1989. 368 с.
6. Назмеев Ю. Г., Лавыгин В. М. Теплообменные аппараты ТЭС. М.: Энергоатомиздат, 1998. 288 с.

References

1. Bel'skiy A. P., Lotvinov M. D. *Ventilyatsiya bumagodelatel'nykh mashin* [Ventilation paper machines]. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1990. 216 p.

2. Sannikov V. A. *Vtorichnye energeticheskie resursy tselyulozno-bumagnoy promyshlennosti* [Secondary energy resources pulp and paper industry]. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1983. 216 p.
3. Antuf'yev V. M., Gusev Ye. K., Ivakhnenko V. V. *Teploobmennye apparaty iz profil'nykh listov* [Heat exchangers of the profiled sheets]. Leningrad, Energiya Publ., 1972. 128 p.
4. Kuntyshev V. B., Bessonnyy A. N. *Osnovy rascheta i proektirovaniya teploobmennikov vozdušnogo okhlazhdeniya* [Basic of calculation and design of air cooled heat exchangers]. St. Petersburg, Nedra Publ., 1996. 512 p.
5. Bazhan P. I., Kanevets G. Ye., Seliverstov V. M. *Spravochnik po teploobmennym apparatam* [Directory of heat exchangers]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1989. 368 p.
6. Nazmeev Yu. G., Lavygin V. M. *Teploobmennye apparaty* [Heat-exchange apparatus of TPP]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1998. 288 p.

Информация об авторах

Сухоцкий Альберт Борисович – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры энергосбережения, гидравлики и теплотехники. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: alk2905@mail.ru

Кунтыш Владимир Борисович – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры энергосбережения, гидравлики и теплотехники. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: egit@belstu.by

Сидорик Галина Сергеевна – магистрант кафедры энергосбережения, гидравлики и теплотехники. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: galiana.sidorik@gmail.com

Information about the authors

Sukhotskiy Al'bert Borisovich – PhD (Engineering), Assistant Professor, Assistant Professor, the Department of Energy-saving, Hydraulics and Heat Engineering. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: alk2905@mail.ru

Kuntyshev Vladimir Borisovich – DSc (Engineering), Professor, Professor, the Department of Energy-saving, Hydraulics and Heat Engineering. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: egit@belstu.by

Sidorik Galina Sergeevna – Master's degree student, the Department of Energy-saving, Hydraulics and Heat Engineering. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: galiana.sidorik@gmail.com

Поступила 11.02.2016