

Н. А. БОРИСОВ, О. Г. ГОЛУБКОВ, Р. Н. СЕРЕДА, М. Н. УДОД

**РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ КОЖУХОТРУБНОГО
ГАЗОМАСЛЯНОГО ТЕПЛООБМЕННОГО АППАРАТА НА СТЕНДЕ НАУЧНО-
ИСПЫТАТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА ПАО «СУМСКОЕ НПО»**

АННОТАЦИЯ Представлена конструкция газомасляного теплообменного аппарата на базе биметаллических ребристых труб с безопасным каналом и конструкция стенда для проведения теплотехнических испытаний, а также описана методика обработки результатов испытаний. Теплотехнические испытания проведены на стенде ПАО «Сумское НПО». Приведены зависимости влияния среднего логарифмического температурного напора на величину теплового потока в кожухотрубном газомасляном теплообменном аппарате, передаваемого от горячего теплоносителя к холодному, зависимости потерь давления в трубном и межтрубном пространстве аппарата в диапазоне расходов теплоносителей; приведены значения контактного термического сопротивления и термического сопротивления воздуха безопасного канала для конструкции биметаллических ребристых труб, использованных в газомасляном теплообменном аппарате.

Ключевые слова: теплотехнические испытания, газомасляный теплообменный аппарат, биметаллическая ребристая труба, безопасный канал, термическое сопротивление.

N. BORISOV, O. GOLUBKOV, R. SEREDA, M. UDOD

**HEAT ENGINEERING TEST DATA OBTAINED FOR THE SHELL-&-TUBE GAS-OIL HEAT
EXCHANGER USING THE SCIENTIFIC TEST SYSTEM OF THE PJSC "SUMY SCIENTIFIC
AND INDUSTRIAL ASSOCIATION"**

ABSTRACT Application of gas-oil heat exchangers (GOH) to heat up the fuel gas and cool down oil in the lubrication system of gas turbine engine of the gas blower requires safe operation of this equipment to eliminate the leakage and the mixing of actuating media and provide quick response in case of emergency. The latter is provided by the use of bimetal tubes for GOH with the safe channel (SC) connected to the automatic gas blower emergency stop system. The PJSC "Sumy Scientific and Industrial Association" has designed a prototype of the shell-&-tube GOH on the basis of bimetal ribbed tubes (BRT) with the safe channel. Therefore, the heat engineering tests of the shell-&-tube GOH based on BRT with SC are of great practical and theoretical interest and enable the generation of specific and reliable information on the prototype system. The purpose of this research was to carry out heat-engineering tests of the prototype system of shell-&-tube GOH equipped with BRT and safe channel. The obtained test data were used to plot the relationships of the influence of average logarithmic temperature pressure on the value of thermal flow transferred from the hot heat carrier to the cold heat carrier. The values of pressure loss in the tubular and intertubular zones of the heat exchanger were defined in the range of change of the flow rates of heat carriers. The values of heat resistance of the contact and those of air in the SC were obtained for the given structure of bimetal ribbed tubes used for the GOH. Heat-engineering tests allowed us to specify the mathematical model and the appropriate program used for the computation of the process of heat transfer to the GOH based on BRT with the SC.

Key words: heat-engineering tests, gas-oil heat exchanger, bimetal ribbed tube, safe channel, and the heat resistance.

Введение

Газомасляные теплообменные аппараты (ГМТ) получили распространение на отечественном и зарубежном рынках теплообменного оборудования для газоперекачивающих агрегатов (ГПА) магистральных газопроводов. Применение ГМТ позволяет обеспечить одновременно охлаждение масла системы смазки газотурбинного двигателя (ГТД) и подогрев топливного газа перед камерой сгорания ГТД [1, 2]. Участие в процессе теплообмена таких сред как топливный газ и смазочное масло в системе ГТД предъявляет повышенные требования к безопасной работе ГМТ: исключение утечек и смешивания рабочих сред, быстрое реагирование системы управления и защиты агрегата в случае наступления аварийной ситуации. Это обеспечивается применением биметаллических труб с безопасным каналом (БК), который соединен с автоматической системой аварийного оста-

нова ГПА.

В ПАО «Сумское НПО» разработана конструкция опытного образца кожухотрубного ГМТ на базе биметаллических ребристых труб (БРТ) с БК [3], применение которых требует уточнения методики теплового расчета аппарата. Последнее относится к определению термического сопротивления контакта биметаллических ребристых труб БРТ с БК. Теоретическое изучение вопроса по определению контактного термического сопротивления БРТ с БК является сложной задачей, в связи со множеством факторов, зависящих как от технологии изготовления БРТ с БК, так и от условий эксплуатации такой конструкции теплообменника.

Таким образом, теплотехнические испытания кожухотрубного ГМТ на базе БРТ с БК представляют практический и теоретический интерес, которые позволяют получить конкретную и надежную информацию об исследуемом объекте.

В работе применены следующие единицы
© Н. А. Борисов, О. Г. Голубков, Р. Н. Серeda, М. Н. Удод, 2017

измерения: температура – °С, давление – Па, расход – кг/с, тепловая мощность – Вт, длина – мм.

Цель работы

Проведение, обработка и анализ результатов теплотехнических испытаний опытного образца кожухотрубного ГМТ на базе БРТ с БК с использованием специально созданного стенда в составе научно-испытательного комплекса ПАО «Сумское НПО».

Объект исследования

Объектом исследования является опытный образец ГМТ на базе БРТ с БК, который разработан в отделе теплообменного оборудования специального конструкторского бюро на ПАО «Сумское НПО» (рис. 1). Основные конструктивные характеристики ГМТ и биметаллической трубы с БК представлены соответственно на рис. 1 и рис. 2. БК представляет собой спиральную канавку, заполненную воздухом, на наружной поверхности внутренней трубы.

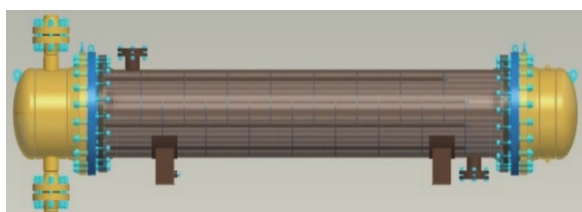


Рис. 1 – Общий вид ГМТ на базе биметаллических ребристых труб с БК

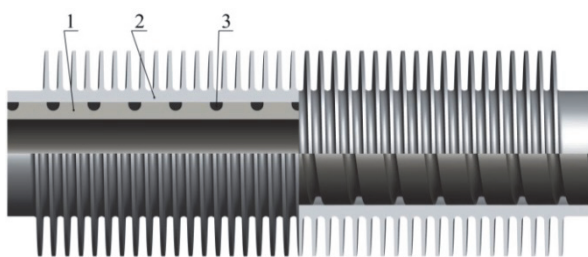


Рис. 2 – Биметаллическая ребристая труба с БК: 1 – внутренняя труба; 2 – наружная ребристая труба; 3 – спиральный БК

Таблица 1 – Характеристики опытного образца ГМТ на базе биметаллических ребристых труб с БК

Наименование параметра	Величина
<i>Тепловые характеристики</i>	
Холодный теплоноситель	природный газ
Расход газа, кг/с	0,857
Температура газа на входе, °С	15
Температура газа на выходе, °С	80
Давление газа, МПа	3,1
Горячий теплоноситель	смазочное масло ТП-22С
Расход смазочного масла, кг/с	3,06
Температура смазочного масла на входе, °С	107
Температура смазочного масла на выходе, °С	87
Давление масла, МПа	0,6
Тепловая мощность, кВт	136
<i>Геометрические характеристики</i>	
Габаритные размеры ГМТ (диаметр × длина), мм	420×3520
Тип труб	биметаллические ребристые
Материал внутренней трубы	сталь 12Х18Н10Т
Материал наружной ребристой трубы	алюминиевый сплав АД1
Коэффициент оребрения	9
Параметры внутренней трубы (диаметр × толщина), мм	18×3
Наружный диаметр ребристой трубы, мм	36
Ширина безопасного канала, мм	2,2
Высота безопасного канала, мм	1,5
Шаг безопасного канала, мм	7
Компоновка труб	шахматная
Шаг труб (поперечный × продольный), мм	86,6×25
Эффективная длина труб, мм	2500
Количество труб	44
Число ходов по трубам	2

Испытательный стенд

Теплотехнические испытания опытного образца кожухотрубного ГМТ на базе БРТ с БК проводились на заводском испытательном стенде. Принципиальная схема стенда и состав оборудования представлены на рис. 3.

Стенд состоит из ГМТ 6, системы горячего теплоносителя (СГТ), системы холодного теплоносителя (СХТ) и комплекта измерительных средств. В качестве горячего теплоносителя выступает трансформаторное масло подаваемое в межтрубное пространство ГМТ, а холодным теп-

лоносителем является атмосферный воздух, который поступает от специальной компрессорной установки 8 и подается в трубное пространство ГМТ.

СГТ для испытания ГМТ представляет собой замкнутый контур, в состав которого входит теплоизолированный бак 1 объемом 5 м³, заполненный трансформаторным маслом 2 Т-1500 (ГОСТ 982-80). Количество вносимого тепла в ГМТ регулируется числом включенных трубчатых электронагревателей ТЭН-10Z220 3 суммарной мощностью 320 кВт. Циркуляция масла в системе, обеспечивается при помощи электронасосного агрегата Х100-65-160 4 производительностью 0,028 м³/с и напором 32 м, который соединен с баком трубопроводной обвязкой. Для регулирования потока горячего теплоносителя в циркуляционном контуре предусмотрена установка регулирующего вентиля 5. Расход масла контролируется измерительной диафрагмой 7.

Система холодного теплоносителя включает в себя поршневой компрессор 4ВМ2,5-25/8 производительностью 0,42 м³/с и давлением нагнетания 0,8 МПа для подачи воздуха в ГМТ. Воздух, нагретый в процессе сжатия в компрессоре, поступает в кожухотрубный теплообменник 9, где его температура понижается при теплообмене с охлаждающей водой, поступающей от градирни. Расход воздуха контролируется измерительной диафрагмой 10. ГМТ посредством фланцевого соединения крепится к трубопроводам СГТ и СХТ. На-

гретый воздух в ГМТ выбрасывается в атмосферу.

Экспериментальный стенд для испытания ГМТ обеспечивает параметры масла на входе в ГМТ, выбранные с учетом тепловых режимов работы маслосистемы агрегата типа ГПА-Ц-16С, созданного на основе двигателя типа ДГ90 конструкции ГП НПКГ «Зоря»-«Машпроект» (г. Николаев):

- Горячий теплоноситель – трансформаторное масло Т-1500 (ГОСТ 982-80):
 - расход – 24,7 кг/с (при $t = 15\text{ }^{\circ}\text{C}$);
 - температура на входе в ГМТ – 40–80 $^{\circ}\text{C}$;
 - давление на входе в ГМТ – 0,25 МПа.
- Холодный теплоноситель – атмосферный воздух (после компрессора):
 - расход – 0,52 кг/с (при $t = 15\text{ }^{\circ}\text{C}$, $P = 0,101325\text{ МПа}$);
 - температура на входе в ГМТ – 5–30 $^{\circ}\text{C}$;
 - давление на входе в ГМТ – 0,8 МПа.

На стенде проводятся исследования теплопередачи, гидравлического и аэродинамического сопротивлений в ГМТ на базе БРТ с соблюдением критериев подобия в диапазоне:

- Рейнольдс – со стороны воздуха $Re_v = 4 \cdot 10^3 - 5 \cdot 10^6$, со стороны трансформаторного масла $Re_m = 10^2 - 2 \cdot 10^4$;
- Прандтль – со стороны воздуха $Pr_v = 0,1 - 2 \cdot 10^3$, со стороны трансформаторного масла $Pr_m = 0,7 - 4,4 \cdot 10^3$.

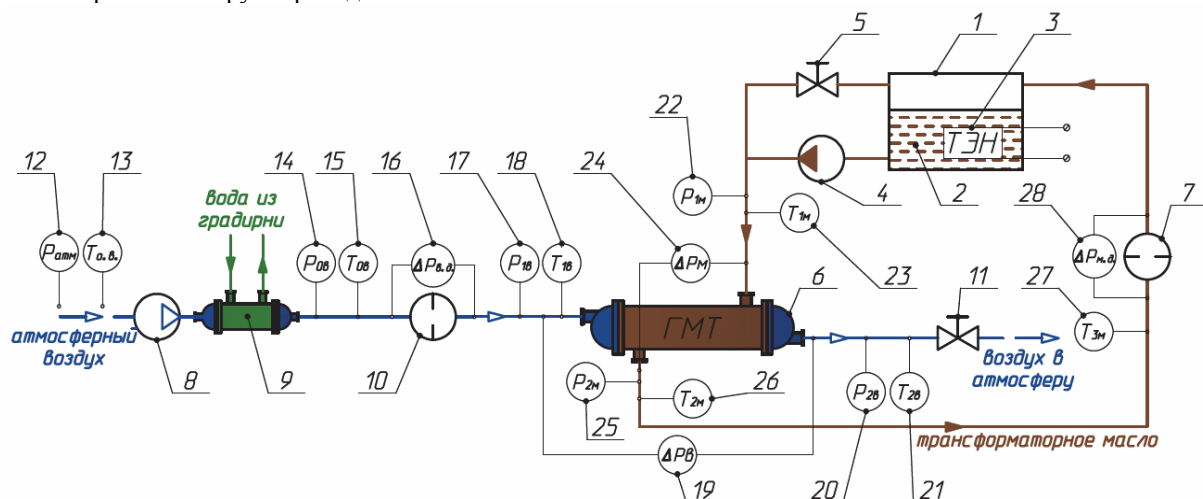


Рис. 3 – Принципиальная схема стенда по исследованию характеристик ГМТ:

- 1 – бак; 2 – теплоноситель (трансформаторное масло); 3 – трубчатые электронагреватели; 4 – насос; 5 – регулирующий вентиль; 6 – ГМТ; 7 – расходомерная диафрагма; 8 – компрессор; 9 – кожухотрубный теплообменник; 10 – расходомерная диафрагма; 11 – регулирующий вентиль; 12 – атмосферное давление воздуха; 13 – температура окружающего воздуха; 14, 15 – давление/температура воздуха перед расходомерной диафрагмой; 16 – перепад давления воздуха на расходомерной диафрагме; 17, 18 – давление/температура воздуха на входе в ГМТ; 19 – перепад давления воздуха на ГМТ; 20, 21 – давление/температура воздуха на выходе из ГМТ; 22, 23 – давление/температура масла на входе в ГМТ; 24 – перепад давления масла на ГМТ; 25, 26 – давление/температура масла на выходе из ГМТ; 27 – температура масла перед расходомерной диафрагмой; 28 – перепад давления масла на расходомерной диафрагме

**Методика обработки результатов
теплотехнических испытаний**

Тепловой поток в ГМТ определяется по формулам:

$$Q_M = G_M C_{PM} (T_{HM} - T_{KM}), \quad (1)$$

$$Q_B = G_B C_{PB} (T_{KB} - T_{NB}), \quad (2)$$

где Q_M, Q_B – тепловой поток со стороны масла и воздуха, Вт; G_M, G_B – массовый расход масла и воздуха, кг/с; C_{PM}, C_{PB} – средние удельные массовые теплоемкости масла и воздуха, Дж/(кг·К); $T_{HM}, T_{NB}, T_{KM}, T_{KB}$ – начальные и конечные температуры масла и воздуха, °С.

Согласно уравнению теплопередачи тепловой поток определяется по формуле:

$$Q = kF\Delta T_{лог}, \quad (3)$$

где k – коэффициент теплопередачи, Вт/(м²·К); F – площадь поверхности теплообмена, м²; $\Delta T_{лог}$ – средний логарифмический температурный напор, °С.

Коэффициент теплоотдачи ГМТ определяется из уравнения (3):

$$k = \frac{Q}{F\Delta T_{лог}}. \quad (4)$$

Средний логарифмический температурный напор в случае теплообмена без изменения фазового состояния сред, рассчитывают по уравнению [4]:

$$\Delta T_{лог} = \frac{\Delta T}{\ln \frac{\theta_6}{\theta_M}}, \quad (5)$$

где $\theta_6 = \theta_{ca} + 0,5\Delta T$ – наибольшая разность температур, °С; $\theta_M = \theta_{ca} - 0,5\Delta T$ – наименьшая разность температур, °С; $\theta_{ca} = T_{HM} - T_{NB} - \frac{\delta T_M + \delta T_B}{2}$ – среднеарифметическая разность температур, °С; $\Delta T = \sqrt{(\delta T_M + \delta T_B)^2 - 4X\delta T_M \delta T_B}$ – характеристическая разность температур, °С; X – индекс противоточности, учитывает схемы движения сред отличной от противотока (принимается по таблице в зависимости от схемы тока); $\delta T_M = T_{HM} - T_{KM}$ – разность температур между входом и выходом по маслу, °С; $\delta T_B = T_{KB} - T_{NB}$ – разность температур между входом и выходом по воздуху, °С.

Коэффициент теплопередачи БРТ, отнесенный к полной площади поверхности оребрения F равен [5]:

$$k = \left(\frac{1}{\alpha_{мпр}} + \frac{d_o \phi_p}{2\lambda_{st}} \ln \left(\frac{d_o}{d_n} \right) + R_k \frac{d_o \phi_p}{d_k} + \right.$$

$$\left. + \frac{d_o \phi_p}{2\lambda_{st}} \ln \left(\frac{d_n}{d_{вн}} \right) + \frac{1}{\alpha_B} \frac{d_o \phi_p}{d_{вн}} \right)^{-1}, \quad (6)$$

где α_B – коэффициент теплоотдачи воздуха протекающего внутри труб, Вт/(м²·К); $\alpha_{мпр}$ – приведенный коэффициент теплоотдачи от масла, Вт/(м²·К); ϕ_p – коэффициент оребрения; d_o – диаметр наружной ребристой трубы у основания ребра, м; $d_{вн}$ – внутренний диаметр внутренней трубы, м; d_n – наружный диаметр внутренней трубы, м; d_k – диаметр контакта поверхностей биметаллической трубы, м; R_k – термическое сопротивление контакта (м²·К)/Вт; $\lambda_{st}, \lambda_{al}$ – теплопроводность внутренней и наружной ребристой трубы Вт/(м·К).

Обычно в расчетах принимается допущение $d_n = d_k$.

Термическое сопротивление контакта для БРТ с БК определяется путем совместного решения уравнений (4) и (6) относительно искомой величины, и равно:

$$R_k = \frac{d_k}{d_o \phi_p} \left(\frac{F\Delta T_{лог}}{Q} - \frac{1}{\alpha_{мпр}} - \frac{d_o \phi_p}{2\lambda_{al}} \ln \left(\frac{d_o}{d_n} \right) - \frac{d_o \phi_p}{2\lambda_{st}} \ln \left(\frac{d_n}{d_{вн}} \right) - \frac{1}{\alpha_B} \frac{d_o \phi_p}{d_{вн}} \right). \quad (7)$$

Величины α_B и $\alpha_{мпр}$ определяются по зависимостям, изложенным в [6] и [7] соответственно.

Контактное термическое сопротивление БРТ, в свою очередь, определяется по формуле [8]:

$$R_{к1} = R_{фк} + R_{мс}, \quad (8)$$

где $R_{фк}$ – термическое сопротивление мест фактического контакта (метал↔метал), (м²·К)/Вт; $R_{мс}$ – термическое сопротивление межконтактной среды (воздух), (м²·К)/Вт.

Согласно [5] контактное термическое сопротивление БРТ, у которых несущая труба из стали и накатные ребра из алюминия определяется по зависимости:

$$R_{к1} = 0,22 \cdot 10^{-3} + 2,5 \cdot 10^{-6} \cdot (t_k - 95), \quad (9)$$

где t_k – температура в зоне мест фактического контакта [5], °С.

Область применимости формулы (9) находится в диапазоне $t_k = 50...230$ °С, при этом погрешность определения $R_{к1}$ составляет не более 10 %.

Применительно к конструкции БРТ с БК (рис. 2) контактное термическое сопротивление определяется сумой термического сопротивления мест фактического контакта, термического сопротивления межконтактной среды (воздуха) и тер-

мического сопротивления воздуха в БК:

$$R_k = R_{\text{фк}} + R_{\text{мс}} + R_{\text{бк}} = R_{\text{к1}} + R_{\text{бк}}, \quad (10)$$

где $R_{\text{бк}}$ – термическое сопротивление воздуха в БК, $(\text{м}^2 \cdot \text{К})/\text{Вт}$.

Тогда из уравнения (10) получим выражение для определения термического сопротивления воздуха в БК:

$$R_{\text{бк}} = R_k - R_{\text{к1}}. \quad (11)$$

Гидродинамическое сопротивление масла (межтрубная зона) определяется разностью измеренных давлений масла на входе и выходе из ГМТ.

Гидродинамическое сопротивление воздуха (трубная зона) определяется разностью измеренных давлений воздуха на входе и выходе из ГМТ.

Теплофизические свойства теплоносителей определяются в соответствии с [9, 10].

Погрешности эксперимента определяются в соответствии с рекомендациями, изложенными в [11–13].

Результаты испытаний

По данным результатов теплотехнических испытаний опытного образца ГМТ полученные зависимости влияния среднего логарифмического температурного напора на величину теплового потока, передаваемого от горячего теплоносителя (трансформаторного масла) к холодному (воздуху) (рис. 4). Получены величины термического сопротивления контакта и термического сопротивления воздуха БК для конструкции БРТ с БК (рис. 5). Определены потери давления в трубном (рис. 6) и межтрубном (рис. 7) пространстве опытного образца ГМТ в диапазоне расходов теплоносителей, воздуха и трансформаторного масла, соответственно. По каждой из указанных зависимостей получено девять экспериментальных точек, при этом на рис. 4–7 точками нанесены экспериментальные характеристики ГМТ, а сплошной линией обозначена линия тренда, показывающая тенденцию изменения характеристик ГМТ.

При проведении теплотехнических испытаний диапазон тепловых потоков в опытном образце ГМТ составил: для трансформаторного масла – $Q_{\text{м}} = 6,54–22,22$ кВт; для воздуха – $Q_{\text{в}} = 5,56–19,97$ кВт. При этом величина среднего логарифмического температурного напора находилась в пределах $\Delta T_{\text{лог}} = 12,1–37,5$ °С. Отклонение теплового потока горячего теплоносителя от теплового потока холодного теплоносителя не превышало 15%. Температуры горячего и холодного теплоносителей на входе в ГМТ составляли: трансформаторное масло – $T_{\text{нм}} = 37,5–81,0$ °С, воздух – $T_{\text{нв}} = 10,3–15,7$ °С. Температуры горячего и холодного теплоносителей на выходе из ГМТ составляли: трансформаторное масло – $T_{\text{км}} = 35,59–79,5$ °С; воздух – $T_{\text{кв}} = 31,3–62,9$ °С.

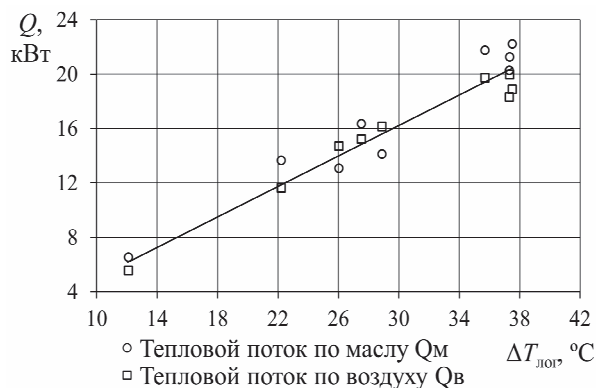


Рис. 4 – Зависимость теплового потока от среднего логарифмического температурного напора

Величина термического сопротивления воздуха БК для данной конструкции БРТ с БК и при данных режимах эксплуатации находится в пределах $R_{\text{бк}} = 0,00572–0,00671$ $(\text{м}^2 \cdot \text{К})/\text{Вт}$. Контактное термическое сопротивление БРТ с БК составило $R_{\text{к}} = 0,00594–0,00693$ $(\text{м}^2 \cdot \text{К})/\text{Вт}$. Таким образом величина термического сопротивления воздуха БК составляет более 95% от общего термического сопротивления контакта БРТ с БК (рис. 5).

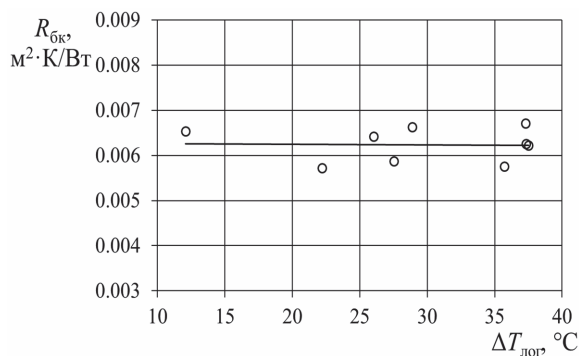


Рис. 5 – График зависимости термического сопротивления воздуха БК от среднего логарифмического температурного напора

Потери давления воздуха в трубном пространстве ГМТ находились в пределах $\Delta P_{\text{в}} = 13,8–35,1$ кПа, при изменении расхода воздуха $G_{\text{в}} = 0,33–0,396$ кг/с (рис. 6).

Потери давления масла в межтрубном пространстве ГМТ составили $\Delta P_{\text{м}} = 0,502–2,724$ кПа, при изменении расхода масла $G_{\text{м}} = 2,451–7,389$ кг/с (рис. 7).

Относительные погрешности косвенных величин полученных по результатам теплотехнических испытаний опытного образца ГМТ на базе БРТ с БК составили: тепловой поток по воздуху – $\delta Q_{\text{в}} = 2–3$ %; тепловой поток по маслу – $\delta Q_{\text{м}} = 7–16$ %; расход воздуха – $\delta G_{\text{в}} = 1–2$ %; расход трансформаторного масла – $\delta G_{\text{м}} = 1–2$ %; потери давления воздуха – $\delta(\Delta P_{\text{в}}) = 1–2$ %; потери давления трансформаторного масла – $\delta(\Delta P_{\text{м}}) = 1–3$ %; термическое сопротивление контакта – $\delta R_{\text{к}} = 10–20$ %.

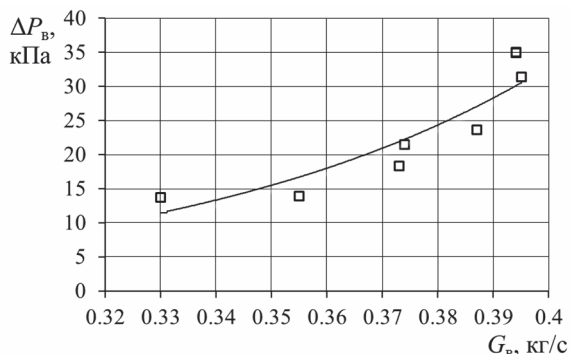


Рис. 6 – Графік залежності втрат тиску повітря від витрати повітря

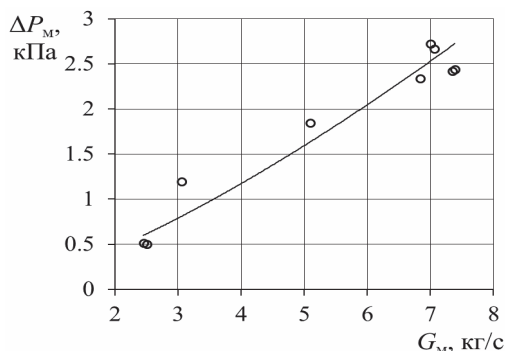


Рис. 7 – Графік залежності втрат тиску масла від витрати масла

Выводы

По результатам теплотехнических испытаний опытного образца ГМТ на базе БРТ с БК можно сделать следующие выводы:

1 Специально созданный стенд в составе научно-испытательного комплекса ПАО «Сумское НПО» позволяет проводить и обеспечивает необходимые режимы испытания кожухотрубного ГМТ.

2 Кожухотрубный ГМТ на базе БРТ с БК справляется со своей основной задачей – подогревом холодного теплоносителя, протекающего по трубному пространству аппарата. Это подтверждает величина подогрева воздуха в ГМТ от его начальной температуры (температуры входа в ГМТ), которая при испытаниях составила от 16 °C до 52 °C.

3 Теплотехнические испытания позволили уточнить математическую модель и соответствующую ей программу расчета процесса теплопередачи в ГМТ на базе БРТ с БК путем введения постоянного значения термического сопротивления воздуха БК в форм. (10) $R_{\text{БК}} = 0,00624 \text{ (м}^2 \cdot \text{К)}/\text{Вт}$. Указанное значение является среднearифметическим значением $R_{\text{БК}}$ по проведенным косвенным вычислениям из форм. (11) и не выходит за диапазон погрешности данной величины для каждого вычисления.

Список литературы

- 1 **Triesch, F.** Rekuperative Brennstoffvorwärmung – Erhöhte Wirtschaftlichkeit von Gasturbinen // *BWK. Das Energie-Fachmagazin*. – 2001. – vol. 53. – no. 10. – P. 60–62.
- 2 **Бодунов, Д. П.** Безопасное решение теплообмена для систем предварительного подогрева топлива на тепловых и электрических станциях / **Д. П. Бодунов** ; ООО «ГЕА Машимпэкс» // *Газотурбинные технологии*. – 2013. – № 6. – С. 18–19. – ISSN 2311-2646.
- 3 **Борисов, Н. А.** Газомазляный утилизационный теплообменник в системе смазки газотурбинного двигателя / **Н. А. Борисов, В. В. Мирошниченко, В. М. Арсеньев, О. Г. Голубков** // *Холодильна техніка та технологія*. – 2016. – Т. 52, Вип. 2. – С. 40–45. – ISSN 0453-8307.
- 4 **Рабинович, Г. Г.** Расчеты основных процессов и аппаратов нефтепереработки : справ. / **Г. Г. Рабинович, П. М. Рябых, П. А. Хохрянков** и др. ; Под. ред. Е. Н. Судакова. – 3-е изд., перераб. и доп. – Москва : Химия, 1979. – 568 с.
- 5 **Бессонный, А. Н.** Основы расчета и проектирования теплообменников воздушного охлаждения : справ. / **А. Н. Бессонный, Г. А. Дрейцер, В. Б. Кунтыш**, и др. ; Под. общ. ред. В. Б. Кунтыша, А. Н. Бессонного. – Санкт-Петербург : Недра, 1996. – 512 с.
- 6 **Исаченко, В. П.** Теплопередача : учеб. для вузов / **В. П. Исаченко, В. А. Осипова, А. С. Сукомел**. – 4-е изд., прераб. и доп. – Москва : Энергоиздат, 1981. – 416 с.
- 7 **Зинявичус, Ф. В.** Теплоотдача и сопротивление оребренных труб в потоке вязкой жидкости : дис. ... канд. техн. наук : 05.14.05. / **Зинявичус Феликсас Вацлович**. – Каунас, 1984 – 210 с.
- 8 **Шлыков, Ю. П.** Контактное термическое сопротивление / **Ю. П. Шлыков, Ю. Э. Ганин, С. Н. Царевский**. – Москва : Энергия, 1977. – 328 с.
- 9 **Варгафтик, Н. Б.** Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. – Москва : Наука, 1972. – 720 с.
- 10 **Андреев, В. А.** Теплообменные аппараты для вязких жидкостей. – Ленинград : Энергия, 1971. – 152 с.
- 11 **Кассандрова, О. Н.** Обработка результатов измерений / **О. Н. Кассандрова, В. В. Лебедев** – Москва : Наука, 1970. – 104 с.
- 12 **Новицкий, П. В.** Оценка погрешностей результатов измерений / **П. В. Новицкий, И. А. Зограф** – 2-е изд., перераб. и доп. – Ленинград : Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1991. – 304 с.
- 13 **Правила измерения расхода газов и жидкостей стандартными сужающими устройствами: РД 50-213-80.** – Москва : Издательство стандартов, 1982. – 320 с.

Bibliography (transliterated)

- 1 **Triesch, F.** (2001), "Rekuperative Brennstoffvorwärmung – Erhöhte Wirtschaftlichkeit von Gasturbinen", *BWK. Das Energie-Fachmagazin*, Vol. 53, No. 10, pp. 60–62.
- 2 **Bodynov, D.** (2013), "Bezopasnoe reshenie teplotobmena dlya sistem predvaritelnogo podogreva topliva na teplovih i elektricheskikh stanciyah", ООО «ГЕА Машимпэкс». *Gazotyrbinnye tehnologii*, No. 6, pp. 18–19, ISSN 2311-2646.
- 3 **Borisov, N., Miroshnichenko V., Arsenev V. and**

- Golybkov, O.** (2016), "Gazomaslyanii ytilizacionnii teploobmennik v sisteme smazki gazotyrbinnogo dvigate-lya", *Holodilna tehnika ta tehnologiya*, Vol. 52, No. 2, pp. 40–45, ISSN 0453-8307.
- 4 **Rabinovich, G., Ryabih, P., Hohryankov, P.** et al. (1979), *Rascheti osnovnykh processov i apparatov neftepererabotki*, Spravochnik, in Sydakova, E. N. (Ed.), Himiya, 3-d ed., rev. and enl., Moscow, Russian.
 - 5 **Bessonni, A., Dreicer, G., Kyntish, V.** et al. (1996), *Osnovi rascheta i proektirovaniya teploobmennikov vozdushnogo ohlajdeniya*, Spravochnik, in Kyntish, V. B. and Bessonni, A. N. (Ed.), Nedra, St. Petersburg, Russian.
 - 6 **Isachenko, V., Osipova, A. and Sykomel, A.** (1981), *Teploperedacha*, Energoizdat, 4-th ed., rev. and enl., Moscow, Russian.
 - 7 **Zinyavichus, F.** (1984), *Teplootdacha i soprotivlenie orebrennih tryb v potoke vyazkoi jidkosti*, Ph. D. thesis, Kaunas, Lithuania.
 - 8 **Shlikov, U., Ganin, U. and Carevskii, S.** (1977), *Kontaktное termicheskoe soprotivlenie*, Energiya, Moscow, Russian.
 - 9 **Vargaftik, N.** (1972), *Spravochnik po teplofizicheskim svoistvam gazov i jidkosti*, Nayka, Moscow, Russian.
 - 10 **Andreev, V.** (1971), *Teploobmennye apparaty dlya vyazkih jidkosti*, Energiya, Leningrad, Russian.
 - 11 **Kassandrova, O. and Lebedev, V.** (1970), *Obrabotka rezul'tatov izmerenii*, Nayka, Moscow, Russian.
 - 12 **Novickii, P. and Zograf, I.** (1991), *Ocenka pogreshnosti rezul'tatov izmerenii*, Energoatomizdat, 2-d ed., rev. and enl., Leningrad, Russian.
 - 13 (1982), *Pravila izmereniya rashoda gazov i jidkosti standartnimi syjaushimi ystroistvami, RD 50-213-80*, Izdatelstvo standartov, Moscow, Russian.

Сведения об авторах (About authors)

Борисов Николай Анатольевич – младший научный сотрудник, ПАО «Сумское НПО»; г. Сумы, Украина; e-mail: borisov.nikolai.85@yandex.ua.

Borisov Nikolai – Junior Researcher, PJSC "Sumy NPO", Sumy, Ukraine.

Голубков Олег Григорьевич – старший научный сотрудник, ПАО «Сумское НПО»; г. Сумы, Украина; e-mail: golubkov_o@frunze.com.ua.

Golubkov Oleg – Senior Researcher, PJSC "Sumy NPO", Sumy, Ukraine.

Середа Роман Николаевич – начальник отдела теплообменного оборудования, ПАО «Сумское НПО», г. Сумы, Украина; e-mail: sereda_r@frunze.com.ua.

Sereda Roman – Head of department of heat-exchange equipment, PJSC «Sumy NPO», Sumy, Ukraine.

Удод Михаил Николаевич – ведущий инженер, ПАО «Сумское НПО»; г. Сумы, Украина.

Udod Michael – Senior Engineer, PJSC "Sumy NPO", Sumy, Ukraine.

Пожалуйста ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Борисов, Н. А. Результаты теплотехнических испытаний кожухотрубного газомасляного теплообменного аппарата на стенде научно-испытательного комплекса ПАО «Сумское НПО» / **Н. А. Борисов, О. Г. Голубков, Р. Н. Середа, М. М. Удод** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – № 9(1231). – С. 57–63. – Бібліогр.: 13 назв. – ISSN 2078-774X. – doi: 10.20998/2078-774X.2017.09.09.

Please cite this article as:

Borisov, N., Golubkov, O., Sereda, R. and Udod, M. (2017), "Heat Engineering Test Data Obtained for the Shell-&-Tube Gas-Oil Heat Exchanger Using the Scientific Test System of the PJSC "Sumy Scientific and Industrial Association", *Bulletin of NTU "KhPI". Series: Power and heat engineering processes and equipment*, No. 9(1231), pp. 57–63, ISSN 2078-774X, doi: 10.20998/2078-774X.2017.09.09.

Будь ласка посилайтеся на цю статтю наступним чином:

Борисов, М. А. Результаты теплотехнических испытаний кожухотрубного газомасляного теплообменного аппарата на стенде научно-испытательного комплекса ПАТ «Сумське НВО» / **М. А. Борисов, О. Г. Голубков, Р. М. Середа, М. М. Удод** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – № 9(1231). – С. 57–63. – Бібліогр.: 13 назв. – ISSN 2078-774X. – doi: 10.20998/2078-774X.2017.09.09.

АНОТАЦІЯ Представлена конструкція газомасляного теплообмінного апарату на базі біметалевих оребрених труб з безпечним каналом і конструкція стенду для проведення теплотехнічних випробувань, а також описана методика обробки результатів випробувань. Теплотехнічні випробування проведені на стенді ПАТ «Сумське НВО». Наведено залежності впливу середнього логарифмічного температурного напору на величину теплового потоку в кожухотрубному газомасляному теплообмінному апараті, що передається від гарячого теплоносія до холодного, залежності втрат тиску в трубному та міжтрубному просторі апарату в діапазоні витрат теплоносіїв; наведені значення контактної термічної опору і термічної опору повітря безпечного каналу для конструкції біметалевих оребрених труб, використаних в газомасляному теплообмінному апараті.

Ключові слова: теплотехнічні випробування, газомасляний теплообмінний апарат, біметалева оребрена труба, безпечний канал, термічний опір.

Поступила (received) 28.02.2017