

В. М. Арсеньев, канд. техн. наук, профессор, (Сумский государственный университет, г. Сумы),
Р. Н. СерEDA, начальник отдела теплообменного оборудования, (ПАО «Сумское НПО», г. Сумы),
Н. А. Борисов, аспирант, (Сумский государственный университет, г. Сумы)

Экспериментальный стенд для испытания и исследования газомасляного теплообменного аппарата на базе биметаллических ребристых труб

Газомасляные теплообменные аппараты являются одними из перспективных в системах газотурбинных двигателей, так как обеспечивают одновременно охлаждение масла системы смазки и подогрев топливного газа газотурбинного двигателя. Вследствие этого экспериментальные исследования по определению характеристик газомасляных теплообменных аппаратов являются актуальными, представляя практический и теоретический интерес. В работе представлена принципиальная схема стенда для проведения исследований теплопередачи, аэродинамического и гидродинамического сопротивления, а также приведена методика проведения испытания и методика обработки данных исследования газомасляного теплообменного аппарата.

Ключевые слова: стенд, испытания, газомасляный кожухотрубный теплообменник, биметаллическая ребристая труба, безопасный канал.

Газомасляні теплообмінні апарати є одними з перспективних в системах газотурбінних двигунів, так як забезпечують одночасно охолодження масла системи змащення і підігрів паливного газу газотурбінного двигуна. Внаслідок цього експериментальні дослідження по визначенню характеристик газомасляних теплообмінних апаратів є актуальними, становлять практичний і теоретичний інтерес. У роботі представлена принципова схема стенду для проведення досліджень теплопередачі, аеродинамічного і гідродинамічного опору, а також наведено методику проведення випробування і методику обробки даних дослідження газомасляного теплообмінного апарату.

Ключові слова: стенд, випробування, газомасляний кожухотрубний теплообмінник, біметалева ребриста труба, безпечний канал.

Gas-oil heat exchangers are one of the most promising in the gas turbine engine systems, as they provide simultaneously cooling oil of the lubrication system and heating fuel gas of a gas turbine engine. As a consequence, experimental research to determine the characteristics of gas-oil heat exchangers are actual, present practical and theoretical interest. The paper presents a schematic diagram of the stand for research of heat transfer, aerodynamic and hydrodynamic drag, as well as the technique of testing and method of data processing of the research of gas-oil heat exchanger.

Keywords: stand, test, gas-oil shell-and-tube heat exchanger, bimetallic finned tube, secure channel.

Введение

Теплообменное оборудование широко применяется в нефтеперерабатывающей, химической, энергетической, газовой и других отраслях промышленности, которое обеспечивает провидение основных технологических процессов. При проектировании теплообменных аппаратов большое внимание уделяется экономической эффективности, что, в свою очередь, требует создания компактных и надежных теплообменных аппаратов. Такой подход позволяет создавать конкурентоспособную продукцию на рынке.

ПАО «Сумское НПО» занимается расширением номенклатуры выпускаемого теплообменного оборудования, в которую входят следующие аппараты: кожухотрубные аппараты с гладкими прямыми трубами в различных конструктивных

исполнениях; аппараты с витыми трубами; спиральные аппараты, аппараты воздушного охлаждения (АВО) с трубчато-ребристыми поверхностями; огневые подогреватели различных модификаций и назначения; пластинчато-ребристые маслоохладители; утилизаторы тепла выхлопных газов с гладкими и оребренными теплообменными поверхностями [1].

Одним из перспективных направлений в области теплообменного оборудования является разработка газомасляных кожухотрубных теплообменников (ГМТ) для газотурбинных двигателей (ГТД) газоперекачивающих агрегатов (ГПА) [2,3]. ГМТ предназначены для подогрева топливного газа путем отбора тепла от масла системы смазки ГТД. Участие в процессе теплообмена таких сред как топливный газ и масло предъявляет повышенные требования к безопасной

работе ГМТ, в частности – исключение утечек, смешивание рабочих сред и быстрое реагирование в случае наступления аварийной ситуации. Быстрое реагирование обеспечивается применением биметаллических труб с безопасным каналом (БК), который соединен с автоматической системой аварийного останова.

На предприятии ПАО «Сумское НПО» разработана конструкция кожухотрубного ГМТ на базе биметаллических ребристых труб с безопасным каналом (БК) [4]. Как известно, результаты теоретического исследования подвергаются экспериментальной проверке. В свою очередь, корректно поставленный эксперимент позволит получить конкретную и надежную информацию об исследуемом объекте. Поэтому экспериментальные исследования, направленные на подтверждения теоретических реше-

ний заложенных в конструкции GMT представляют практический и теоретический интерес.

Цель работы

Разработка экспериментального стенда по исследованию характеристик газомасляного теплообменного аппарата на базе биметаллических ребристых труб.

Опытный образец GMT

В отделе теплообменного оборудования на предприятии ПАО «Сумское НПО» разработан опытный образец GMT на базе биметаллических ребристых труб с БК. Основные конструктивные характеристики опытного образца GMT представлены в табл. 1, общий вид которого показан на рис. 1.

Назначение, состав оборудования и принципиальная схема стенда по исследованию характеристик GMT

Для определения основных теплотехнических характеристик GMT и проведения экспериментальных исследований был разработан экспериментальный стенд, принципиальная схема которого представлена на рис. 2.

Экспериментальный стенд предназначен для:

- определения соответствия аппарата технической документации;
- отработки проведения теплофизического эксперимента, накопления экспериментальных данных для верификации математической модели расчета GMT;
- сопоставления расчетных тепловых характеристик с реальными для оценки эффективности существующих теплообменных поверхностей, а также получения информации для проведения конструкторских работ с последующим внедрением новых вариантов теплопередающих поверхностей.

Стенд для испытания газомасляного теплообменного аппарата состоит из GMT, системы горячего теплоносителя (СГТ), системы холодного теплоносителя (СХТ) и комплекта измерительных средств. В качестве горячего теплоносителя выступает трансформаторное масло, а холодным теплоносителем является атмосферный воздух.

СГТ для испытания GMT представляет собой замкнутый контур, в состав которого входит теплоизолированный бак объемом 5 м³, заполненный трансформаторным маслом Т-1500 (ГОСТ 982-80). Ко-

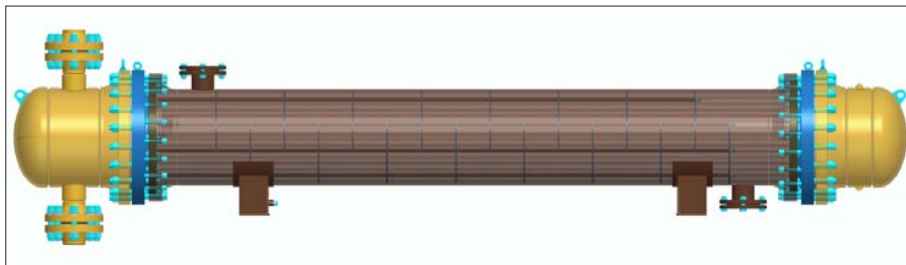


Рис. 1. Общий вид GMT на базе биметаллических ребристых труб с БК

личество вносимого тепла в GMT регулируется числом включенных электронагревательных элементов ТЭН-10Z220 суммарной мощностью 360 кВт. Циркуляция масла в системе, обеспечивается при помощи электронасосного агрегата Х100-65-160 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 регулирующей задвижки. Расход масла контролируется измерительной диафрагмой. Для предотвращения аварийной ситуации в случае перегрева горячего теплоносителя, предусмотрена установка в баке предохранительного клапана.

Система холодного теплоносителя включает в себя порш-

невой компрессор 4ВМ2,5-25/8 производительностью 0,42 м³/с и давлением нагнетания 0,8 МПа для подачи воздуха в GMT. Воздух, нагретый в процессе сжатия в компрессоре, поступает в кожухотрубный теплообменник, в котором его температура понижается при теплообмене с охлаждающей водой. Расход воздуха контролируется измерительной диафрагмой. Нагретый воздух в GMT выбрасывается в атмосферу.

GMT посредством фланцевого соединения крепится к трубопроводам СГТ и СХТ.

Измерение контролируемых параметров производится с помощью комплекта измерительных средств, состав которого представлен в табл. 2.

Экспериментальный стенд для испытания GMT должен обеспечи-

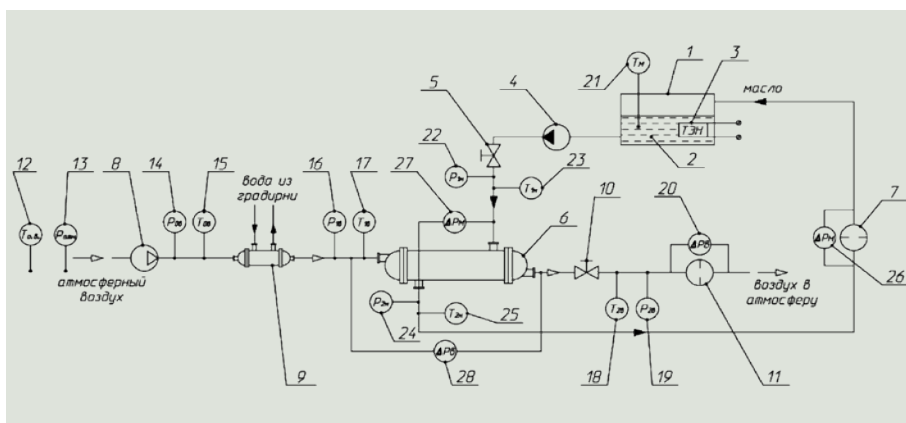


Рис. 2. Принципиальная схема стенда по исследованию характеристик GMT: 1 – бак; 2 – теплоноситель;

- 3 – теплогревательные элементы; 4 – насос; 5 – регулирующая задвижка; 6 – GMT; 7 – расходомерная диафрагма; 8 – компрессор; 9 – кожухотрубный теплообменник; 10 – регулирующая задвижка; 11 – расходомерная диафрагма; 12 – температура окружающего воздуха; 13 – атмосферное давление воздуха; 14 – давление воздуха на выходе из компрессора; 15 – температура воздуха на выходе из компрессора; 16 – давление воздуха на входе в GMT; 17 – температура воздуха на входе в GMT; 18 – температура воздуха на выходе из GMT; 19 – давление воздуха на выходе из GMT; 20 – перепад давления воздуха на расходомерной диафрагме; 21 – температура масла в баке; 22 – давление масла на входе в GMT; 23 – температура масла на входе в GMT; 24 – давление масла на выходе из GMT; 25 – температура масла на выходе из GMT; 26 – перепад давления масла на расходомерной диафрагме; 27 – перепад давления масла на GMT; 28 – перепад давления воздуха на GMT

Таблица 1. Характеристики ГМТ на базе биметаллических ребристых труб с БК

Наименование параметра	Величина
Габаритные размеры ГМТ (диаметр × длина), мм	420×3520
Тип труб	биметаллические ребристые
Материал несущей трубы	сталь 12Х18Н10Т
Материал оребрения	алюминиевый сплав АД1
Коэффициент оребрения	9
Параметры несущей трубы (диаметр × толщина), мм	18×3
Компоновка труб	шахматная
Шаг труб (поперечный × продольный), мм	86,6×25
Длина труб, мм	2410
Количество труб	44
Число ходов по трубам	2

вать следующие параметры на входе в ГМТ:

– Горячий теплоноситель – масло:

– расход масла – 23400 кг/ч

– температура масла на входе

в ГМТ – 80 °С

– давление масла на входе

в ГМТ – 0,25 МПа

– холодный теплоноситель – воздух:

– расход воздуха – 1220 кг/ч

– температура воздуха на входе

в ГМТ – 5÷30 °С

– давление воздуха на входе

в ГМТ – 0,8 МПа

На стенде планируется проводить исследования теплопередачи, гидравлического и аэродинамического сопротивления в ГМТ на базе биметаллических ребристых труб с БК в диапазоне чисел Рейнольдса: со стороны воздуха – $Re_g = 4 \cdot 10^3 \div 5 \cdot 10^6$, со стороны масла – $Re_m = 10^2 \div 2 \cdot 10^4$.

Порядок и методика проведения испытания ГМТ

Проведение испытания ГМТ требует соблюдения следующего порядка действий:

1. Произвести монтаж оборудования стенда согласно схеме (рис. 2) и конструкторской документации на стенд.

2. Установить датчики для измерения параметров работы ГМТ и оборудования стенда, а также расходомерные диафрагмы согласно конструкторской документации на стенд и табл. 2.

3. Включить электронасосный агрегат, электронагреватели и установить требуемую температуру масла в маслобаке равной 80 °С.

4. С помощью регулирующей арматуры установить давление

масла на входе в ГМТ 2,55 кгс/см² (0,25 МПа). Расход масла при этом должен быть 23400 кг/час.

5. Включить воздушный поршневым компрессор.

6. С помощью регулирующей арматуры установить давление воздуха на входе в ГМТ 7,16 кгс/см² (0,7 МПа). Расход воздуха при этом должен быть 1220 кг/час.

7. Выдержать время до наступления стационарного теплового режима (изменение разности температур масла и воздуха на входе в ГМТ не более 0,5 °С за 5 минут).

8. Произвести измерение следующих параметров (точки измерения согласно схеме рис. 2):

- барометрического давления;
- температуры окружающего воздуха;

- давления и температуры воздуха на выходе из компрессора;

- давления и температуры воздуха на входе и выходе из ГМТ;

- перепад давления воздуха на расходомерной диафрагме с последующим расчетом расхода воздуха;

- перепад давления воздуха на ГМТ;

- давления и температуры масла на входе и выходе из ГМТ;

- перепад давления масла на расходомерной шайбе с последующим

расчетом расхода масла;

- перепад давления масла на ГМТ;

9. Результаты измерений заносятся в соответствующий протокол.

Методика обработки данных испытания ГМТ

Тепловой поток ГМТ определяется по формулам:

$$Q = G_g \cdot C_{p,ср,g} \cdot (T_{2g} - T_{1g}), \text{ кВт} \quad (1)$$

$$Q = G_m \cdot C_{p,ср,m} \cdot (T_{1m} - T_{2m}), \text{ кВт} \quad (2)$$

где G_g, G_m – расходы воздуха и масла через ГМТ, определенные с помощью диафрагмы, кг/с; $C_{p,ср,g}, C_{p,ср,m}$ – средняя удельная теплоемкость воздуха и масла, кДж/(кг·К); T_{1g}, T_{2g} – температуры воздуха на входе и выходе из ГМТ, °С; T_{1m}, T_{2m} – температуры масла на входе и выходе из ГМТ, °С.

Гидродинамическое сопротивление определяется разностью измеренных давлений масла на входе и выходе из ГМТ.

Аэродинамическое сопротивление определяется разностью измеренных давлений воздуха на входе и выходе из ГМТ.

Теплофизические свойства теплоносителей определяются в соответствии с [5,6].

Погрешности эксперимента определяются в соответствии с рекомендациями, изложенными в [7–9].

Выводы

1. Разработана принципиальная схема стенда для испытания и исследования газомасляного теплообменного аппарата на базе биметаллических ребристых труб с безопасным каналом.

2. Подобрано технологическое оборудование и измерительные приборы для проведения испытаний ГМТ на базе биметаллических ребристых труб с БК.

3. Разработана методика проведения испытаний и методика обработки полученных данных по испытанию ГМТ на базе биметаллических ребристых труб с БК.

Список литературы:

1. Смирнов А. В. Теплообменное оборудование производства ОАО "Сумское НПО им. М. В. Фрунзе" для компрессорных агрегатов и установок с газотурбинным приводом / А. В. Смирнов,

В. П. Парафейник, В. М. Тамиринов, Р. А. Лазоренко, А. В. Сидоренко // Компрессорное и энергетическое машиностроение [Текст]: науч. – произв. и информ. журн. / Междунар. ин-т компрессор. и энергет. машиностроения. – Сумы, 2010. – № 3. – С. 26–29.

2. Triesch F. Rekuperative Brennstoffvorwärmung – Erhöhte Wirtschaftlichkeit von Gasturbinen //

Таблица 2. Комплект измерительных средств

Наименование	Наименование и условное обозначение	Погрешность	Предел измерения
1. Давление барометрическое, мм рт ст.	Барометр-анероид М67	$\pm 0,2 \%$	99–105 кПа
2. Температура окружающего воздуха, °С	Термометр ртутный ТЛ 4	$\pm 0,2^\circ\text{C}$	0...55 °С
3. Температура масла в маслобаке, °С	Термометр многоканальный ТМ 5233	$\pm 0,25 \%$	-50...200 °С
4. Температура масла на входе и выходе из ГМТ, °С	Термометр цифровой малогабаритный ТМЦ 9410	$\pm 0,1^\circ\text{C}$	-50...200 °С
5. Давление масла на входе и выходе из ГМТ, кгс/см ²	Манометр образцовый МО ГОСТ 6521–72	$\pm 0,4 \%$	0...6 кгс/см ²
6. Перепад давления масла на расходомерной диафрагме, кгс/см ²	Сапфир 22ДД-ВН Мультиметр SANWA модель РС 5000	$\pm 0,5 \%$	0...0,63 кгс/см ²
7. Температура воздуха на входе и выходе из ГМТ, °С	Термометр цифровой малогабаритный ТМЦ 9410	$\pm 0,1^\circ\text{C}$	-50...200 °С
8. Давление воздуха на входе и выходе из ГМТ, кгс/см ²	Манометр образцовый МО ГОСТ 6521–72	$\pm 0,4 \%$	0...16 кгс/см ²
9. Перепад давления воздуха на расходомерной диафрагме, кгс/см ²	Сапфир 22ДД-ВН Мультиметр SANWA модель РС 5000	$\pm 0,5 \%$	0...0,63 кгс/см ²
10. Температура воздуха на выходе из компрессора, °С	Термометр многоканальный ТМ 5233	$\pm 0,25 \%$	-50...200 °С
11. Давление воздуха на выходе из компрессора, кгс/см ²	Манометр образцовый МО ГОСТ 6521–72	$\pm 0,4 \%$	0...16 кгс/см ²
12. Перепад давления масла на ГМТ, кгс/см ²	Сапфир 22ДД-ВН Мультиметр SANWA модель РС 5000	$\pm 0,5 \%$	0...0,63 кгс/см ²
13. Перепад давления воздуха на ГМТ, кгс/см ²	Сапфир 22ДД-ВН Мультиметр SANWA модель РС 5000	$\pm 0,5 \%$	0...0,63 кгс/см ²

BWK. *Das Energie-Fachmagazin*. – 2001. – vol. 53. – no. 10. – P. 60–62.

3. Бодунов Д. П. Безопасное решение теплообмена для систем предварительного подогрева топлива на тепловых и электрических станциях [Текст] / Д. П. Бодунов; ООО «ГЕА Машимпэкс» // Газотурбинные технологии. – 2013. – № 6. – С. 18–19. – ISSN 2311–2646.

4. Борисов Н. А. Газомаляный утилизацонный теплообменник

в системе смазки газотурбинного двигателя/ Н. А. Борисов, В. В. Мирошниченко, В. М. Арсеньев // Холодильна техніка та технологія. – 2016. – Т. 52, вип. 2. – С. 40–45.

5. Варгафтик, Н. Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. – М.: Наука, 1972. – 720 с.

6. Андреев В. А. Теплообменные аппараты для вязких жидкостей. – Л.: Энергия, 1971.

7. Кассандрова О. Н. Обработка результатов измерений /

О. Н. Кассандрова, В. В. Лебедев – М.: Наука, 1970. – 104 с.

8. Новицкий П. В. Оценка погрешностей результатов измерений/ П. В. Новицкий, И. А. Зограф – 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отделение, 1991. – 304 с.

9. Правила измерения расхода газов и жидкостей стандартными сужающими устройствами: РД 50–213–80. – М.: Издательство стандартов, 1982. – 320 с.