

УДК 621.57

Н. А. Борисов¹, В. В. Мирошниченко¹, В. М. Арсеньев¹, О. Г. Голубков²¹ Сумський державний університет, ул. Римського-Корсакова 2, Суми, 40000, Україна² ПАО «Сумское НПО», ул. Горького 58, Суми, 40004, Україна**ГАЗОМАСЛЯНЫЙ УТИЛИЗАЦИОННЫЙ ТЕПЛООБМЕННИК В СИСТЕМЕ СМАЗКИ ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ**

Выполнен обзор теплообменного оборудования рекуперативного типа для подогрева топливного газа в газотурбинных двигателях на основе утилизации тепла системы смазки. Рассмотрены конструктивные решения, обеспечивающие безопасную работу оборудования и исключают аварии в случаях нарушения герметичности (протечек, поломок и т.п.). Проведен технико-экономический анализ применения газомасляных теплообменников (ГМТ) для подогрева топливного газа с применением гладких и оребренных биметаллических трубных пучков с безопасным каналом нарушения герметичности.

Ключевые слова: Газотурбинная установка; Газомасляный теплообменник; Биметаллическая оребренная труба; Безопасный канал; Подогрев топливного газа.

М. А. Борисов¹, В. В. Мірошниченко¹, В. М. Арсеньєв¹, О. Г. Голубков²¹ Сумський державний університет, вул. Римського-Корсакова 2, Суми, 40000, Україна² ПАТ «Сумське НВО», вул. Горького 58, Суми, 40004, Україна**ГАЗОМАСЛЯНИЙ УТИЛІЗАЦІЙНИЙ ТЕПЛООБМІННИК В СИСТЕМІ ЗМАЦУВАННЯ ГАЗОТУРБІННОГО ДВИГУНА**

Виконано огляд теплообмінного обладнання рекуперативного типу для підігріву паливного газу в газотурбінних двигунах на основі утилізації тепла системи змащення. Розглянуто конструктивні рішення, що забезпечують безпечну роботу устаткування і виключають аварії у випадках порушення герметичності (протікання, поломок тощо). Проведено техніко-економічний аналіз застосування газомасляних теплообмінників (ГМТ) для підігріву паливного газу із застосуванням гладких та оребрених біметалевих трубних пучків з безпечним каналом порушення герметичності.

Ключові слова: Газотурбінна установка; Газомасляний теплообмінник; Біметалева оребрена труба; Безпечний канал; Підігрів паливного газу.



This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).
<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

І ВВЕДЕНИЕ

Теплообменное оборудование, обеспечивающее нагрев и охлаждение технологических потоков, является одним из основных элементов современных газотурбинных установок (ГТУ).

Отдельный теоретический и практический интерес представляет изучение вопросов утилизации имеющегося тепла ГТУ, что позволяет уменьшить металлоемкость, снизить эксплуатационные расходы и, в конечном итоге, повысить технико-экономические показатели ГТУ.

Надежная работа ГТУ во многом зависит от работы системы смазки газотурбинного двигателя (ГТД), при работе которой выделяется значительное количество тепла. Выделяемое тепло отводится от подшипников качения с помощью масла, требующего в последующем охлаждения. Охлаждение масла можно осуществить с помощью блоков воздушного охлаждения (БВО) или с использованием кожухотрубных теплообменных аппаратов (КТА). КТА в отличие от БВО (в которых тепло, отобранное от масла, безвозвратно теряется в воздухе), позволяют утилизировать

тепловой потенциал масла для подогрева технологических потоков рабочих сред ГТУ.

Одним из технологических потоков в ГТУ является топливный газ, который может использоваться в качестве рабочего тела в рекуперативных теплообменниках. Последнее обстоятельство предъявляет повышенные требования к безопасной работе такого оборудования, в частности, исключение утечек и быстрое реагирование в случае наступления аварийной ситуации.

На рынке теплообменного оборудования представлены конструкции теплообменных аппаратов в безопасном исполнении. Такие теплообменники могут успешно применяться не только для охлаждения масел, но и для охлаждения и нагрева технологических продуктов в различных отраслях промышленности.

Преимуществом данного типа теплообменного оборудования является их высокая безопасность, обусловленная возможностью быстрого обнаружения утечки в случае повреждения. Последнее позволяет предотвратить риск смешивания рабочих сред и тем самым обеспечить безаварийную работу.

Таким образом, исследования в области теплообменного оборудования в безопасном исполнении, направленные на усовершенствование конструкции, повышение тепловой эффективности, улучшение массогабаритных показателей применительно к конструкциям ГТУ, являются актуальными, представляют теоретический и практический интерес.

Цель работы – обоснование применения теплообменного аппарата в безопасном исполнении на базе биметаллических ребристых труб для утилизации тепла системы смазки ГТД.

II. ТЕПЛОБМЕННЫЕ АППАРАТЫ В БЕЗОПАСНОМ ИСПОЛНЕНИИ

В работе [1] достаточно полно представлены схемные решения по подогреву топливного газа перед камерой сгорания ГТД с использованием тепла выхлопных газов и масла системы смазки, где в качестве утилизирующего теплообменного оборудования предлагается использовать теплообменники в безопасном исполнении из биметаллических труб. В работе указано, что рекуперативный подогрев топливного газа позволяет сократить расход топливного газа на 0,1% на каждые 20 °С подогрева (т.е. на 1% при подогреве до 200 °С), что позволяет сэкономить около 100÷150 тыс. € за 1 год эксплуатации ГТУ. При этом КПД установки можно повысить на 0,5% [1].

В [2] для нагрева природного газа и одновременного охлаждения масла используется пластинчатый теплообменник, который имеет пластинчатые буферные каналы, обеспечивающие безопасность при разгерметизации канала газа или масла. В патенте [3] для рекуперативного подогрева природного газа теплом от масла системы смазки предусмотрено использование кожухотрубного или пластинчатого теплообменника, имеющего промежуточную полость для обеспечения мер безопасности. Теплообменные аппараты такого назначения получили название газомасляных теплообменных аппаратов (ГМТ).

Таким образом, ГМТ могут изготавливаться в двух вариантах конструкции – пластинчатой и кожухотрубной.

К известным предприятиям, которые выпускают данный тип теплообменной продукции, относятся – ООО «ГЕА Машинпэкс» (Германия), ООО «Газхолдтехника» (Россия), ОАО КПП «Авиамотор» (Россия), Funke GmbH (Германия), Atlas Sales GmbH (Германия). Так, например, компания ГЕА производит кожухотрубные теплообменники с двойной (коаксиальной) безопасной трубой. Теплообменники могут быть выполнены в цельносварном и разборном вариантах. Двойная безопасная труба состоит из внутренней и наружной труб, которые находятся в плотном контакте друг с другом. Наружная труба может быть как гладкой, так и оребренной. Главной отличительной особенностью такой трубы является то, что на внутренней поверхности наружной трубы выполнены продольные канавки по всей ее длине. Продольные канавки формируют пространство протечек, которое выходит в зазоры между двойными трубными досками, образуя контур протечек, который соединяется с

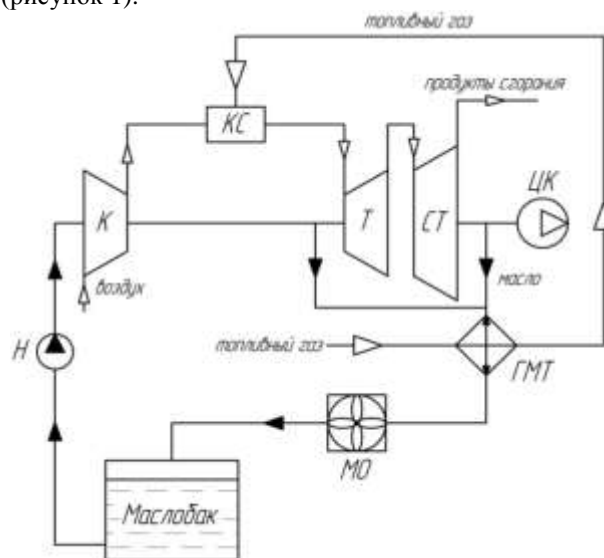
сигнализатором утечек, установленным снаружи теплообменника. Контур протечек заполняется инертным газом и герметизируется. Таким образом, среды, участвующие в теплообмене, надежно изолированы друг от друга [4].

Предприятие ООО «Газхолдтехника» первым в России разработало газомасляный теплообменник с буферной полостью [5]. Конструкция трубного пучка состоит из биметаллических труб, в которых на внешней стенке внутренней трубы выполнены параллельные продольные ребра, равномерно расположенные по поверхности. Поперечное сечение ребер имеет форму равнобедренной трапеции. При плотном контакте внутренней и наружной труб между ними образуется буферная полость, которая в поперечном сечении имеет форму равнобедренного треугольника.

Компания FUNKE производит теплообменники в безопасном исполнении серии SWF/SWP и SSWF/SSWP, выполненные в виде трехкамерных аппаратов с биметаллическими трубами. Конструкция биметаллических труб предусматривает наличие кольцевых зазоров между внутренней и наружной трубой, которые соединены между собой полостью, образующей закрытую камеру безопасности. Камера безопасности заполняется уплотняющей жидкостью, изменение давления которой фиксируется системой управления.

III. ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектом исследования был выбран ГМТ, соответствующий по своим параметрам системе смазки газотурбинного двигателя ДУ32 конструкции ГП НПКГ «Зоря»-«Машпроект» (г. Николаев), где он может быть использован в качестве утилизатора тепла масла системы смазки для подогрева топливного газа (рисунок 1).



К – компрессор; КС – камера сгорания; Т – турбина газогенератора; СТ – силовая турбина; ЦК – центробежный компрессор; ГМТ – газомасляный теплообменник; МО – воздушный маслоохладитель; Н – насос.

Рисунок 1 – Принципиальная схема системы смазки газотурбинного двигателя

IV. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для выбора конструкции ГМТ был проведен сравнительный анализ двух вариантов исполнения трубного пучка: с биметаллическими гладкими и биметаллическими ребристыми трубами (рисунок 2). Были проведены тепловой, гидродинамический и экономический расчеты.

Целью теплового расчета являлось определение необходимой поверхности теплообмена. Расчет теплоотдачи со стороны каждого теплоносителя выполнялся по зависимостям, приведенным в работах [6, 7, 8].

В ходе гидродинамического расчета определялись гидравлические сопротивления технологических потоков рабочих сред.

Целью экономического расчета являлось определение затрат на материалы трубного пучка. Стоимость материала пучка труб определялась с использованием следующей зависимости:

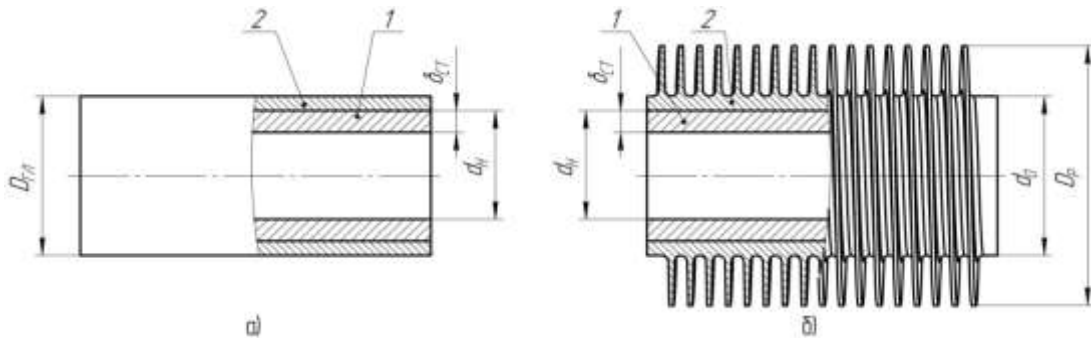
$$C_{п.тр.} = M_{ст} \cdot C_{ст} + M_{ал} \cdot C_{ал}, \$ \quad (1)$$

где $M_{ст}$ – масса пучка труб из углеродистой стали, кг; $C_{ст}$ – цена 1 кг углеродистой стали, \$; $M_{ал}$ – масса

пучка труб из алюминиевого сплава, кг; $C_{ал}$ – цена 1 кг алюминия, \$.

Расчет выполнен для следующих условий:

- рабочие среды: смазочное масло ТП-22, природный газ;
- тепловая мощность, внутренний диаметр аппарата, геометрия внутренней трубы (диаметр d_H и толщина стенки $\delta_{СТ}$) – величины постоянные;
- наружный диаметр биметаллической гладкой трубы равен диаметру у основания ребра оребренной трубы ($D_{ГЛ}=d_0$);
- материал внутренней трубы – углеродистая сталь (Сталь 20);
- материал наружной гладкой/ребристой трубы – алюминиевый сплав (АД0);
- допустимые потери давления по газу / маслу – 100 / 50 кПа;
- термическое сопротивление контакта между наружной поверхностью внутренней трубы и внутренней поверхностью ребристой/гладкой трубы – отсутствует;
- расчет сводится к определению требуемой поверхности теплообмена, потерь давления, массы трубного пучка и аппарата, стоимости материала пучка труб.



а) – биметаллическая гладкая труба; б) – биметаллическая ребристая труба;
1 – внутренняя труба; 2 – наружная гладкая/ребристая труба.

Рисунок 2 – Исследуемые биметаллические трубы

В таблицах 1 и 2 приведены исходные и расчетные характеристики газомасляных кожухотрубных теплообменных аппаратов.

В ГМТ, где масло движется по межтрубному пространству, а топливный газ по трубам, использование биметаллических ребристых труб вместо гладких позволяет повысить компактность теплообменника за счет уменьшения длины труб на 32÷36%, а также уменьшить массу аппарата на 15÷16% и стоимость материала трубного пучка на 48÷52% (таблица 2).

В системах подогрева топливного газа трубопроводную арматуру в ряде случаев выполняют из не-

ржавеющей стали, что обусловлено присутствием коррозионно-активных компонентов – CO_2 , H_2S и др.

В таблице 3 приведены результаты расчета ГМТ, в котором в качестве материала для внутренней трубы применена нержавеющая сталь 12Х18Н10Т.

Результаты расчетов ГМТ показали, что при использовании в качестве материала для внутренней трубы нержавеющей стали масса трубного пучка из оребренных труб, по сравнению с гладкими трубами, будет на 52÷56% меньше (таблица 3), что приведет к снижению стоимости пучка на 59÷62%. При этом масса ГМТ будет на 15÷16% меньше.

Таблица 1 – Исходные технологические характеристики газомасляных теплообменных аппаратов.

Тепловая мощность, кВт	Рабочее давление масла, МПа	Рабочее давление газа, МПа	Расход масла, кг/с	Т, К входа масла	Т, К выхода масла	Расход газа, кг/с	Т, К входа газа	Т, К выхода газа
166	0,25	5,5	6,5	373	361,2	1,806	278	313

Таблица 2 – Расчетные характеристики газомасляных теплообменных аппаратов.

Тип трубы диаметр, мм	Кол. труб, шт	Длина трубы, мм	Длина ГМТ, мм	Внутр. диаметр кожуха, мм	Кол. ходов газа/масла, шт	$F_{ГМТ}$, $м^2$	Потери давления газа/масла, кПа	Масса ГМТ, кг	Масса пучка труб, кг	Стоимость материала пучка труб, \$
биметал. гладкая Al Ø22x2 Ø18x3	90	1730	2750	400	2 / 11	10,8	25 / 2,1	907	253	494
биметал. гладкая Al Ø22x2 Ø18x3	78	1840	2860	400	3 / 12	9,9	105 / 2,2	893	234	456
биметал. ребристая Al Ø36 Ø18x3	44	1170	2190	400	2 / 7	32	73 / 1,7	758	106	238

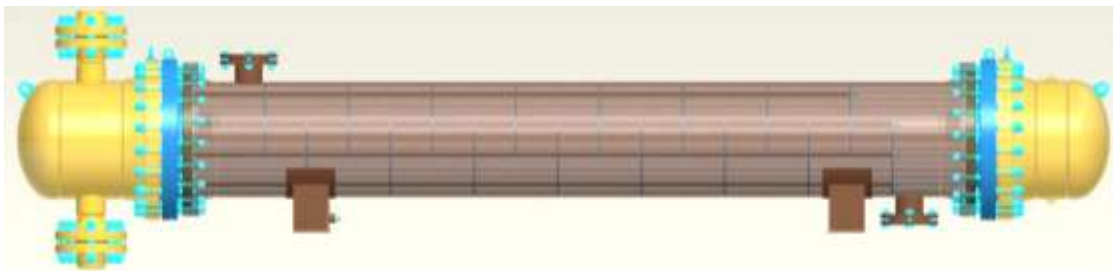
Таблица 3 – Результаты расчета газомасляного теплообменника.

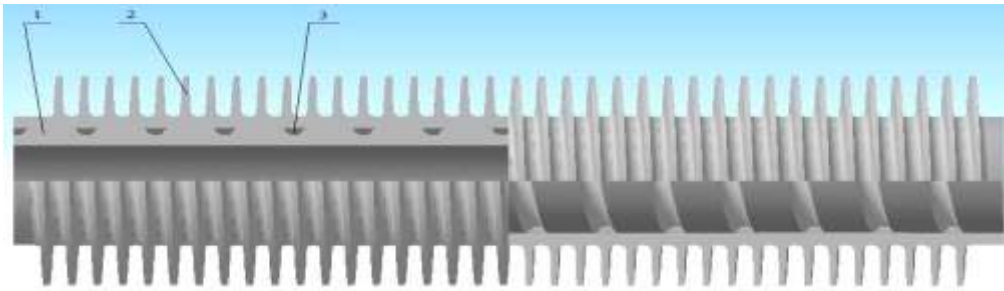
Тип трубы диаметр, мм	Кол. труб, шт	Длина трубы, мм	Длина ГМТ, мм	Внутр. диаметр кожуха, мм	Кол. ходов газа/масла, шт	$F_{ГМТ}$, $м^2$	Потери давления газа/масла, кПа	Масса ГМТ, кг	Масса пучка труб, кг	Стоимость материала пучка труб, \$
биметал. гладкая Al Ø22x2 Ø18x3	90	1780	2800	400	2 / 11	11,1	25 / 2,1	920	261	1512
биметал. гладкая Al Ø22x2 Ø18x3	78	1900	2920	400	3 / 12	10,2	107 / 2,2	904	240	1392
биметал. ребристая Al Ø36 Ø18x3	44	1290	2310	400	2 / 8	35,3	77 / 1,8	773	116	578

V. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ

На основе результатов, полученных в ПАО «Сумское НПО» совместно с кафедрой технической теплофизики Сумского государственного университета, разработана конструкция кожухотрубного ГМТ из биметаллических ребристых труб с безопасным каналом (БК) (рисунок 3). Биметаллическая ребристая

труба с БК состоит из двух труб, которые соосно вставлены одна в другую без зазора. При изготовлении биметаллической ребристой трубы одновременно производится накатка ребер, обеспечивая контакт между внутренней и наружной трубой. На наружной поверхности внутренней трубы по всей ее длине выполнено углубление в виде винтообразной канавки, образующей БК (рисунок 4).

**Рисунок 3** – Общий вид газомасляного теплообменника.



1 – внутренняя труба; 2 – наружная ребристая труба; 3 – БК
Рисунок 4 – Биметаллическая ребристая труба с БК.

Безопасный канал соединен с полостями утечек между двойными трубными решетками ГМТ, расположенными с обеих сторон теплообменника. В случае разгерметизации поток газа поступает в БК, протекая по которому попадает в полость утечек и далее на систему аварийного останова ГМТ. Винтообразным БК выбран из-за того, что разрушение трубы, как правило, происходит вдоль по длине, что неизбежно приведет к срабатыванию аварийной защиты.

VI. ВЫВОДЫ

Обосновано применение ребристых биметаллических труб в ГМТ для утилизации тепла системы смазки ГТД для подогрева топливного газа. Показано, что применение ребристых труб в качестве теплообменной поверхности в ГМТ, позволяет повысить компактность и тепловую эффективность, снизить металлоемкость и уменьшить затраты на материал трубного пучка.

Отсутствие методов теплового расчета аппаратов с учетом наличия БК требует проведения теоретических исследований и проведения физического эксперимента. В связи с этим необходимо решить следующие задачи:

- разработать математическую модель расчета ГМТ и провести численные исследования влияния БК на процесс теплообмена с использованием программно-вычислительного комплекса ANSYS «CFX/FLUENT»;
- разработать и изготовить опытный образец, провести его испытания в составе экспериментального стенда по исследованию характеристик ГМТ на базе биметаллических ребристых труб с БК;
- провести вычислительный эксперимент на основе разработанной математической модели расчета ГМТ и осуществить верификацию математической модели на основе результатов физического эксперимента.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Франк Триш.** Предварительный подогрев топлива – путь повышения КПД газовых турбин / Франк Триш

– Термо Интеграл, Лейпциг, Германия // Газотурбинные технологии – 2005. – № 6. – С. 1–5.

2. Пат. 2312241 Российская Федерация, МПК F 02 C 7/08, F 28 D 9/00. Способ безопасного подогрева топливного газа и газомасляный теплообменник для его осуществления / Шайхутдинов А. З., Белоусов Ю. В., Журавлева И. Н., Щуровский В. А.; заявитель; Общество с ограниченной ответственностью «Газхолдтехника»; патентообладатель Москва. – №2005139828/06; заявл. 21.12.05; опубл. 10.12.07.

3. Пат. 92934 Российская Федерация, МПК F 17 D 1/08, F 28 F 1/10, B 01 D 45/18. Агрегатный блок подготовки топливного газа / Кузнецов Л.Г., Кузнецов Ю.Л., Ефремов А.А., Бураков А.В., Абрамов А.И.; заявители и патентообладатели Санкт-Петербург. ОАО «Компрессор». – №2009146946/22; заявл. 18.12.09.

4. **Бодунов Д. П.** Безопасное решение теплообмена для систем предварительного подогрева топлива на тепловых и электрических станциях / Д. П. Бодунов – ООО «ГЕА Машинпэкс» // Газотурбинные технологии – 2013. – № 6. – С. 18–19.

5. Пат. 117599 Российская Федерация, МПК F 28 F 1/08. Трубный пучок с буферными полостями кожухотрубного газомасляного теплообменника / Белоусов Ю. В., Верещагин Н. Н., Пчелинцев В. Д., Голубцов С. В. заявитель; Общество с ограниченной ответственностью «Газхолдтехника»; патентообладатель Москва. – №2012106636/06; заявл. 24.02.12; опубл. 27.06.12. Бюл. №18.

6. **Исаченко В. П.** Теплопередача: Учебник для вузов / В. П. Исаченко, В. А. Осипова, А. С. Сукомел. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоиздат, 1981. – 416 с.

7. **Пермяков В. А.** Теплообменники вязких жидкостей, применяемые на электростанциях / В. А. Пермяков, Е. С. Левин, Г. В. Дивова. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1983 – 176 с.

8. **Зинявичус Ф. В.** Теплоотдача и сопротивление оребренных труб в потоке вязкой жидкости: дис. ... канд. техн. наук: 05.14.05. / Ф. В. Зинявичус // – Каунас, 1984 – 210 с.

Отримана в редакції 22.01.2016, прийнята до друку 03.03.2016

N. A. Borisov¹, V. V. Miroshnichenko¹, V. M. Arsenyev¹, O. G. Golubkov²

¹ Sumy State University, 2 Rimsky-Korsakov str., Sumy, 40000, Ukraine

² PJSC «Sumy NPO», 58 Gorky str., Sumy, 40004, Ukraine

THE ISSUES OF THE GAS-OIL HEAT EXCHANGER FOR HEAT RECOVERY IN GAS TURBINE ENGINE LUBRICATION SYSTEM

Preheating fuel gas in the gas turbine can be carried out in recuperative heat exchangers installed in the lubricating system of gas-turbine engines, in which heat from the heated oil is passed to fuel gas. In such exchangers it is necessary to exclude the possibility of leakage and mixing of fluids and, in case of emergency, to provide emergency shutdown of the machine. To such heat exchangers belong gas-oil heat exchangers, which are made of bimetallic tubes with safe (signaling) channel. Secure channel provides automatic operation of the system in an emergency. The article describes a constructive solution of the gas-oil heat exchangers from bimetallic tubes with safe channel. Bimetallic tubes are used both smooth and finned, with different design of safe channel. Feasibility analysis of the use of smooth and finned bimetallic tubes in gas-oil heat exchangers was performed. It is shown that the bimetallic finned tubes allow increasing the compactness of the heat exchanger and reducing the weight and material cost of the tube bundle. The lack of methods of thermal calculation of heat exchangers with safe channel resulted in the setting of goals for further research, in particular the development of mathematical models, conduction of numerical studies and physical experiments.

Keywords: Gas turbine unit; Gas-oil heat exchanger; Bimetallic finned tube; Secure channel; Preheating fuel gas.

REFERENCES

1. Frank Trish. (2005). Predvaritel'nyy podogrev topliva – put povysheniya kpd gazovykh turbin. *Gazoturbinnyye tekhnologii*, No. 6, 1–5.

2. Pat. 2312241 Rossiyskaya Federatsiya, MPK F 02 C 7/08, F 28 D 9/00. Sposob bezopasnogo podogreva toplivnogo gaza i gazomaslyani teploobmennik dlia ego osuschestvleniia / Shaykhutdinov A.Z., Belousov Yu.V., Zhuravleva I.N., Shchurovskiy V.A.; zayavitel'; OOO «Gazkholodtekhnika»; patentoobladatel' Moskva. – №2005139828/06; zayavl. 21.12.05; opubl. 10.12.07.

3. Pat. 92934 Rossiyskaya Federatsiya, MPK F 17 D 1/08, F 28 F 1/10, B 01 D 45/18. Agregatnyy blok podgotovki toplivnogo gaza / Kuznetsov L.G., Kuznetsov Yu.L., Efremov A.A., Burakov A.V., Abramov A.I.; zayaviteli i patentoobladateli Sankt-Peterburg. OAO «Kompessor». – №2009146946/22; zayavl. 18.12.09.

4. Bodunov, D. P. (2013). Bezopasnoe reshenie teploobmena dlia sistem predvaritelnogo podogreva topliva na teplovykh i elektricheskikh stantsiyakh. *Gazoturbinnyye tekhnologii*, No. 6, 18–19.

5. Pat. 117599 Rossiyskaya Federatsiya, MPK F 28 F 1/08. Trubnyy puchok s bufernymi polostyami kozhukhotrubnogo gazomaslyanogo teploobmennika / Belousov Yu.V., Vereshchagin N.N., Pchelintsev V.D., Golubtsov S.V. zayavitel'; OOO «Gazkholodtekhnika»; patentoobladatel' Moskva. – №2012106636/06; zayavl. 24.02.12; opubl. 27.06.12. Byul. No.18.

6. Isachenko, V. P. Osipova, V. A., Sukomel, A. S. (1981). *Teploperedacha: Uchebnik dlya vuzov*, 4-e izd., prerab. i dop. Moscow: Energoizdat, 416 p.

7. Permyakov, V. A., Levin, E. S., Divova, G.V. (1983). *Teploobmenniki vyazkikh zhidkostey, primenyaemye na elektrostantsiyakh*. L.: Energoatomizdat, 176 p.

8. Zinyavichyus F. V. (1984). *Teplootdacha i soprotivlenie orebrennykh trub v potoke vyazkoy zhidkosti: dis. ... kand. tekhn. nauk: 05.14.05*. Kaunas, 210 p.

Received 22 January 2016
Approved 03 March 2016
Available in Internet 29 April 2016