

УДК 621.57

doi: 10.20998/2078-774X.2016.10.14

А. В. СМІРНОВ, Р. Н. СЕРЕДА, Н. А. БОРИСОВ**ГАЗОМАСЛЯНЫЙ КОЖУХОТРУБНЫЙ ТЕПЛООБМЕННИК С БЕЗОПАСНЫМ КАНАЛОМ В МАСЛОСИСТЕМЕ ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ ГАЗОПЕРЕКАЧИВАЮЩЕГО АГРЕГАТА**

АННОТАЦИЯ Рассмотрено два варианта подогрева топливного газа газотурбинного двигателя ГПА с использованием подогревателя топливного газа огневого типа и кожухотрубного газомасляного теплообменника с безопасным каналом. Представлена методика исследования и выполнен экономический анализ рассмотренных схемных вариантов по подогреву топливного газа. Экономически обосновано применение кожухотрубного газомасляного теплообменника с безопасным каналом в маслосистеме газотурбинного двигателя ГПА.

Ключевые слова: газоперекачивающий агрегат, газотурбинный двигатель, кожухотрубный газомасляный теплообменник, биметаллическая ребристая труба, безопасный канал, подогрев топливного газа, приведенные затраты, экономический эффект.

A. SMIRNOV, R. SEREDA, N. BORISOV**GAS-OIL SHELL-AND-TUBE HEAT EXCHANGER WITH THE SAFE CHANNEL IN THE OIL SYSTEM OF GAS TURBINE ENGINE FOR THE GAS-COMPRESSOR UNIT**

ABSTRACT To design the equipment for chemical and petrochemical industry, power units, etc. economic indexes are selected as the efficiency criterion especially in conditions of severe competition on the market. The economic indexes are the most informative, because these take into consideration the sphere of production and the sphere of operation. The purpose of this scientific paper is to determine the economic efficiency of the use of gas-oil shell-and-tube heat exchanger with the safe channel in the oil system of gas turbine engine for the gas-compressor unit. Two options of the heating of fuel gas of the gas turbine engine for the gas-compressor unit have been analyzed. The first option uses the fuel gas heater of a flame type and the second option uses the gas-oil shell-and-tube heat exchanger with the safe channel. The investigation was carried out by way of the solution of equation system that includes the equations of thermal balance, heat transfer and the objective function - reduced costs. This investigation allowed us to economically substantiate the use of gas-oil shell-and-tube heat exchanger with the safe channel to heat the fuel gas using the oil heat of the lubricating system of gas turbine engine. It is shown that the use of gas-oil shell-and-tube heat exchanger with the safe channel allows us to reduce power and fuel gas costs and as a result reduce the total amount of operating costs. The saving rate due to the use of gas-oil shell-and-tube heat exchanger with the safe channel for the oil system of the gas turbine engine of gas-compressor unit is about 593 thousand UAH a year.

Key words: gas-compressor unit, gas turbine engine, shell-and-tube heat exchanger, bimetal rifled tube, safe channel, fuel gas heating, reduced costs and the saving rate.

Введение

Газотурбинные двигатели (ГТД) являются одним из основных элементов современных газоперекачивающих агрегатов (ГПА) магистральных газопроводов, к которым в настоящее время предъявляются высокие требования по экономичности и эксплуатационной надежности.

Теплообменное оборудование является одним из основных элементов современных ГТД, которое обеспечивает нагрев и охлаждение технологических потоков, в частности системы смазки, при работе которой выделяется значительное количество тепла. Выделяемое тепло отводится от подшипников с помощью масла, которое в последующем требует охлаждения и, как следствие, может использоваться в качестве рабочего тела в теплообменниках-утилизаторах. К числу таких теплообменников принадлежат кожухотрубные газомасляные теплообменники (ГМТ), в которых рабочими средами являются топливный газ и масло.

Последнее обстоятельство предъявляет повышенные требования к безопасной работе такого

оборудования, 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.

Кожухотрубный ГМТ в безопасном исполнении состоит из биметаллических труб, (двух труб соосно вставленных одна в другую) с безопасным каналом, по которому в случае разгерметизации топливный газ поступает в полость, образованную между двумя трубными решётками, и далее – в систему аварийного останова. Безопасный канал может быть выполнен в форме спиральной или продольной канавки на наружной поверхности внутренней трубы или внутренней поверхности наружной трубы. Наружная труба может быть как гладкой, так и ребристой. В ГМТ обычно масло движется по межтрубному пространству, а газ – по трубам [1–5].

Внедрение нового технологического оборудования в маслосистеме газотурбинного двигателя ГПА приводит к дополнительным материальным и

финансовым вложениям. Поэтому целесообразность применения кожухотрубного ГМТ с безопасным каналом требует технико-экономического обоснования.

Цель работы

Определение экономической эффективности применения газомасляного кожухотрубного теплообменника с безопасным каналом в масляной системе газотурбинного двигателя ГПА.

Методика исследования

При исследовании производилось решение системы уравнений (1)–(4), представляющих собой уравнения теплового баланса, теплопередачи и целевой функции, в качестве которой выбраны приведённые затраты [6–9]:

$$Q = G_m C_{pm} (T_{nm} - T_{km}), \quad (1)$$

$$Q = G_r C_{rg} (T_{rg} - T_{ng}), \quad (2)$$

$$Q = kF\Delta T_{\text{лог}}, \quad (3)$$

$$Z = C + E_n K, \quad (4)$$

где Q – тепловой поток, Вт; Z – приведённые затраты, грн./год; C – эксплуатационные расходы, грн./год; K – капитальные затраты, грн.; $E_n = 1/T$ – нормативный коэффициент окупаемости капитальных затрат; T – срок окупаемости капитальных затрат, год; G_m, G_r – расход масла и газа через теплообменник, кг/с; C_{pm}, C_{rg} – теплоёмкость масла и газа, Дж/(кг·К); $T_{nm}, T_{km}, T_{ng}, T_{rg}$ – начальные и конечные температуры масла и газа, °С; F – площадь поверхности теплообмена, м²; $\Delta T_{\text{лог}}$ – средняя логарифмическая разность температур, °С.

В общем случае:

$$K = f(V_1^k, V_1^k, \dots, V_i^k), \quad (5)$$

$$C = f(V_1^p, V_1^p, \dots, V_i^p), \quad (6)$$

где $V_1^k, V_1^k, \dots, V_i^k$ – конструктивные характеристики ГМТ – количество труб, шаг ребра, высота ребра, продольный шаг трубного пучка, поперечный шаг пучка и т.д., грн.; $V_1^p, V_1^p, \dots, V_i^p$ – режимные характеристики ГМТ – расходы теплоносителей, стоимость энергии на перемещение теплоносителей, затраты на обслуживание, ремонт и др., грн./год.

Приведённые затраты Z являются нормативным критерием при оценке эффективности новой техника и учитывают как сферу производства так и сферу эксплуатации объекта [10–11].

Поиск оптимального решения производился путем полного перебора вариантов по узлам сетки, образованной конструктивными и режимными

характеристиками ГМТ. Конструктивные характеристики ГМТ выбирались исходя из выпускаемой номенклатуры завода изготовителя – ПАО «Сумское НПО».

В качестве базового варианта для сравнения была выбрана схема газоперекачивающего агрегата ГПА Ц-16/76-1,44М1 с газотурбинным двигателем.

Схемы базового и исследуемого вариантов приведены на рис. 1–2.

В базовом варианте топливный газ отбирается из магистрали (после сепарации) и изначально подогревается в подогревателе огневого типа, за счет сжигания части газа на горелках аппарата. Далее газ поступает в блок редуцирования, где его давление понижается до требуемого для подачи в камеру сгорания ГТД. Понижение давления приводит к понижению температуры, поэтому дальнейшее повышение температуры газа осуществляется в кожухотрубном теплообменном аппарате, за счет отбора части газа из нагнетающей линии ГПА, перед аппаратом воздушного охлаждения.

Топливный газ в исследуемом варианте подогревается в кожухотрубном ГМТ с безопасным каналом, который устанавливается в замкнутом контуре системы смазки ГТД. Подогрев топливного газа происходит за счет отбора теплоты от масла, нагретого при работе ГТД.

На ПАО «Сумское НПО» изготовлен опытный образец кожухотрубного ГМТ с БК, который в дальнейшем прошел испытания на экспериментальном стенде. Конструкция кожухотрубного ГМТ с безопасным каналом применяемого для подогрева газа, представлена на рис. 3–4.

Исследуемый вариант имеет ряд преимуществ:

- для подогрева газа используется источник с большим тепловым потенциалом (масло), позволяющий подогреть газ до более высокой температуры;
- отсутствует необходимость подогрева топливного газа (сжигания газа на горелках) перед блоком редуцирования;
- уменьшается тепловая нагрузка на маслоохладители системы смазки ГТД;
- уменьшается количество технологического оборудования, которое участвует в подогреве газа, следовательно, упрощается конструкция топливной системы ГТД;
- дополнительная экономия топливного газа и повышение КПД установки [12];
- не требует дополнительного обслуживающего персонала.

Параметры работы топливной и масляной системы ГТД ДГ-90Л2.1 представлены в табл. 1.

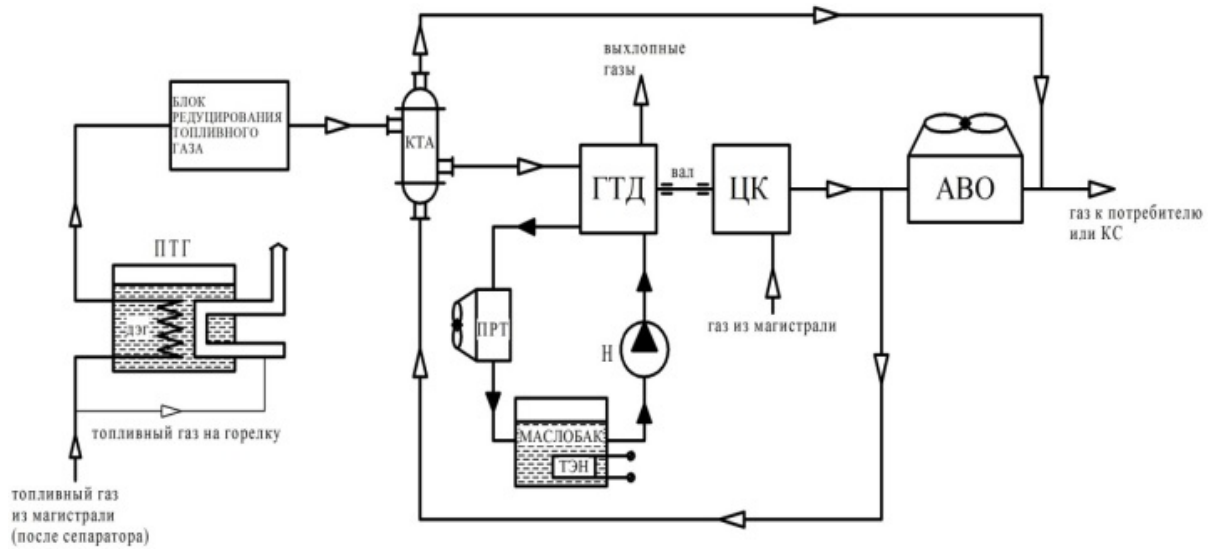


Рис. 1 – Базовый вариант с огневым подогревом топливного газа:

ПТГ – огневой подогреватель топливного газа,

КТА – кожухотрубный теплообменник,

ЦК – центробежный компрессор,

ПРТ – пластинчато-ребристый маслоохладитель,

Н – насос, АВО – аппарат воздушного охлаждения газа

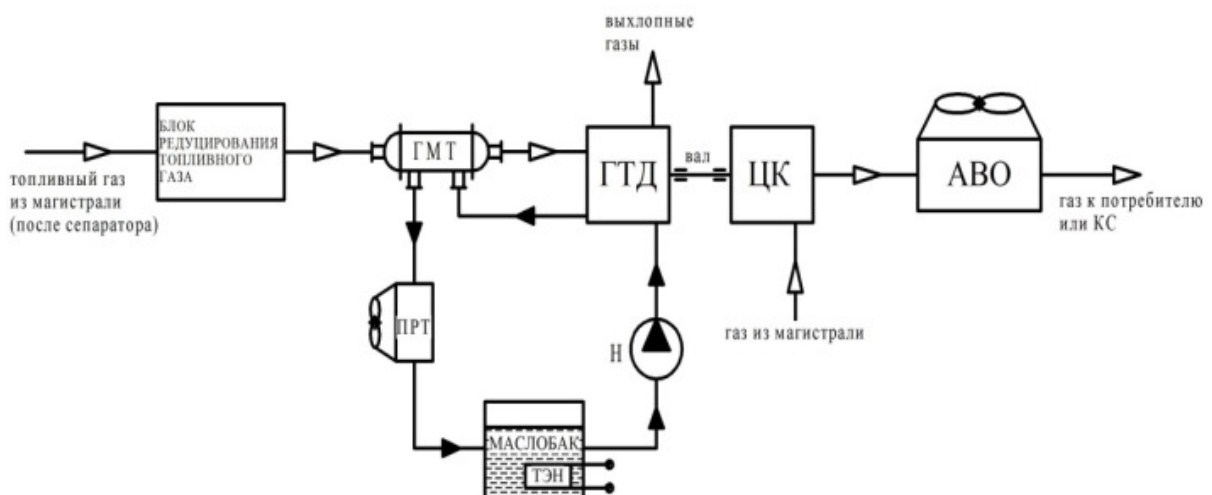


Рис. 2 – Вариант с применением ГМТ для подогрева топливного газа

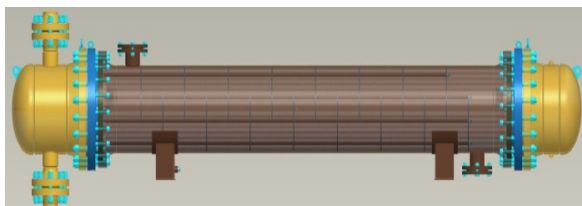


Рис. 3 – Общий вид ГМТ

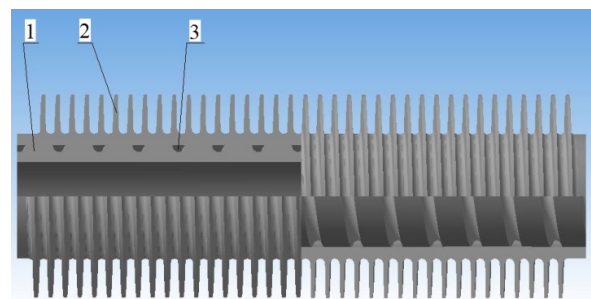


Рис. 4 – Теплообменная поверхность ГМТ – биметаллическая ребристая труба с БК:

1 – внутренняя труба; 2 – наружная ребристая труба;
3 – спиральный БК

Таблица 1 – Параметры работы ГТД ДГ-90Л2.1

Параметр	Единица измерения	Величина
<i>Топливная система</i>		
Топливный газ	—	природный газ
Расход топливного газа	кг/час	3085
Температура топливного газа на входе	°С	20–80
Давление топливного газа на входе	кгс/см ²	30
<i>Маслосистема</i>		
Тип масла	—	ТП-22С
Расход масла	кг/час	11000
Температура масла на входе	°С	45
Тепловой поток от масла	кВт	400

Результаты исследования

На рис. 5 представлена зависимость эксплуатационных и капитальных затрат от температуры топливного газа на входе в ГТД. Показано, что увеличение температуры топливного газа на входе в ГТД приводит к снижению эксплуатационных расходов и росту капитальных затрат. При существующей цене на топливный газ капитальные затраты, которые являются единоразовыми вложениями, окупятся за счет ежегодной экономии эксплуатационных расходов.

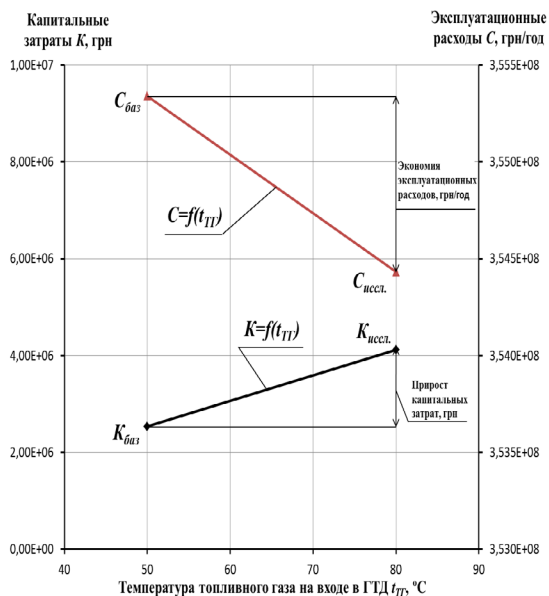


Рис. 5 – График зависимости эксплуатационных и капитальных затрат от температуры топливного газа на входе в ГТД

Таблица 2 – Результаты сравнительного анализа вариантов подогрева топливного газа

Параметр	Ед. изм-я	Вариант	
		базовый	исследуемый
1	2	3	4
Расход топливного газа	нм ³ /час	8232	8212,72
Температура топливного газа на входе в ГТД	°С	50	80
Мощность эл. двигателей ПРТ системы смазки ГТД	кВт	30	22
Количество секций ПРТ системы смазки ГТД	шт.	10	8
Время работы ГТД	час	6000	
Стоимость электроэнергии	грн./кВт·час	1,56	
Стоимость топливного газа	грн./нм ³	7,188	
Срок окупаемости капитальных вложений	лет	5	
Экономия топливного газа	нм ³ /год	—	115 680
Затраты на электроэнергию	грн./год	310 000	235 000
Затраты на топливный газ	грн./год	355 030 000	354 198 000
Эксплуатационные расходы	грн./год	355 340 000	354 433 000
Капитальные затраты на ПТГ	грн.	1 120 000	—
Капитальные затраты на КТА «Газ-Газ»	грн.	482 000	—
Капитальные затраты на GMT	грн.	—	3 370 000
Капитальные затраты на ПРТ	грн.	936 000	750 000
Суммарные капитальные затраты	грн.	2 538 000	4 120 000
Приведенные затраты	грн./год	355 850 000	355 257 000
Экономический эффект	грн./год	—	593 000

В табл. 2 приведены результаты сравнительного анализа подогрева топливного газа с использованием подогревателя топливного газа (ПТГ) и кожухотрубного газомасляного теплообменника (GMT). Показано, что применение кожу-

хотрубного ГМТ с БК в качестве подогревателя топливного газа позволяет экономить 115 680 нм³ топливного газа в год, что обеспечивает получение экономического эффекта в размере 593 тыс. гривен в год.

Выводы

Обосновано применение кожухотрубного ГМТ с БК в маслосистеме газотурбинного двигателя ГПА на основе проведенного технико-экономического анализа.

Экономический эффект от применения кожухотрубного ГМТ с БК в маслосистеме газотурбинного двигателя ГПА составляет 593 тыс. гривен в год.

Список литературы

- Бодунов, Д. П.** Безопасное решение теплообмена для систем предварительного подогрева топлива на тепловых и электрических станциях [Текст] / **Д. П. Бодунов ; ООО «ГЕА Машинпэкс»** // Газотурбинные технологии. – 2013. – № 6. – С. 18–19. – ISSN 2311-2646.
- Yokell, Stanley.** Double-Tubesheet Heat-Exchanger Design Stops Shell-Tube Leakage [Text] / **Stanley Yokell** // *Chemican Engineering*. – 1973. – May 14. – P. 133–136.
- 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.
- Gardner, K. A.** Thermal contact resistance in finned tubing [Text] / **K. A. Gardner, T. C. Carnavos** // *Trans. Am. Soc. Mech. Engrs., J. Heat Transfer*. – 1960. – vol. 82C. – P. 279–293.
- Пат. 117599 Российская Федерация, МПК F 28 F 1/08. Трубный пучок с буферными полостями кожухотрубного газомасляного теплообменника / **Белушов Ю. В., Верещагин Н. Н., Пчелинцев В. Д., Голубцов С. В.** заявитель ; Общество с ограниченной ответственностью «Газхолотехника» ; патентообладатель Москва. – №2012106636/06 ; заявл. 24.02.12 ; опубл. 27.06.12, Бюл. № 18.
- Каневец, Г. Е.** Обобщенные методы расчета теплообменников [Текст] / **Г. Е. Каневец**. – Киев : Наук. думка, 1979. – 271 с.
- Исаченко, В. П.** Теплопередача [Текст] : Учебник для вузов / **В. П. Исаченко, В. А. Осипова, А. С. Сукомел**. – 4-е изд., перераб. и доп. – М. : Энергоиздат, 1981. – 416 с.
- Пермяков, В. А.** Теплообменники вязких жидкостей, применяемые на электростанциях [Текст] / **В. А. Пермяков, Е. С. Левин, Г. В. Дивова**. – Ленинград : Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1983 – 176 с.
- Зинявичюс, Ф. В.** Теплоотдача и сопротивление оребренных труб в потоке вязкой жидкости [Текст] : дис. ... канд. техн. наук : 05.14.05 / **Зинявичус Феликсас Вацловвич**. – Каунас, 1984 – 210 с.
- Попырин, А. С.** Математическое моделирование и оптимизация теплоэнергетических установок / **А. С. Попырин**. – М. : Энергия, 1979. – 416 с.
- Голубков, О. Г.** Повышение эффективности маслоохладителей газоперекачивающих агрегатов магистральных газопроводов [Текст] : автореферат дисс. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук : спец. 05.14.04 «Промышленная теплоэнергетика» / **О. Г. Голубков**. – Харьков, 1984. – 17 с.
- Triesch, F. Rekuperative Brennstoffvorwärmung – Erhöhte Wirtschaftlichkeit von Gasturbinen // *BWK. Das Energie-Fachmagazin*. – 2001. – vol. 53. – no. 10. – P. 60–62.

Bibliography (transliterated)

- Bodunov, D. P.** (2013), "Bezopasnoe reshenie teploobmena dlja sistem predvaritel'nogo podogreva topliva na teplovyh i jelektricheskikh stancijah [Safe solution of heat exchange for systems of the preheating fuel at thermal and power plants]", *Gas Turbo Technology*, no. 6, pp. 18–19, ISSN 2311-2646.
- Yokell, Stanley.** (1973), "Double-Tubesheet Heat-Exchanger Design Stops Shell-Tube Leakage", *Chemican Engineering*, May 14, pp. 133–136.
- Kuznecov, L. G., Kuznecov, Ju. L., Efremov, A. A., Burakov, A. V. and Abramov, A. I.,** ОАО "Компрессор" (2009), *Agregatnyj blok podgotovki toplivnogo gaza* [Fuel gas treatment service module], St. Petersburg, Russian, Pat. 92934.
- Gardner, K. A. and Carnavos T. C.** (1960) "Thermal contact resistance in finned tubing". *Trans. Am. Soc. Mech. Engrs., J. Heat Transfer*, 82C, pp. 279–293.
- Belousov, Ju. V., Vereshhagin, N. N., Pchelincev, V. D. and Golubcov, S. V.** ; Obshhestvo s ogranichennoj otvetstvennost' "Gazholotekhnika" (2012), *Trubnyj puchok s bufernymi polosťami kozhuhotrubnogo gazomaslanogo teploobmennika* [Tube bundle with buffer cavities of shell-and-tube gas and oil heat exchanger], Moscow, Russian, Pat. 117599.
- Kanevec, G. E.** (1979), *Obobshhennye metody rascheta teploobmennikov* [Generalized methods of heat exchangers calculation], Nauk. dumka, Kiev, Ukraine.
- Isachenko, V. P., Osipova V. A. and Sukomel A. S.** (1981), *Teploperedacha* [Heat transfer], Jenergoizdat, Moscow, SSSR.
- Permjakov, V. A., Levin, E. S. and Divova, G. V.** (1983), *Teploobmenniki vjazkih zhidkostej, primenjaemye na jelektrostancijah* [Viscous liquids heat exchangers used in power plants], Jenergoatomizdat, Leningr. otd-nie, Leningrad, SSSR.
- Zinjavichjus, F. V.** (1984), "Teplootdacha i soprotivlenie orebrennyh trub v potoke vjazkoj zhidkosti [Heat transfer and resistance of finned tubes in a viscous fluid flow]", Abstract of Ph.D. dissertation, Kaunas.
- Popyrin, A. S.** (1979), *Matematicheskoe modelirovanie i optimizacija teploenergeticheskikh ustanovok* [Mathematical modeling and optimization of thermal power plants], Jenergija, Moscow, Russian.
- Golubkov, O. G.** (1984), "Povyshenie jeffektivnosti masloohladitelej gazoperekachivajushhih agregatov magistral'nyh gazoprovodov [Improving the efficiency of gas compressor units oil coolers of main gas pipelines]", Abstract of Ph.D. dissertation, Promyshlennaja teploenergetika, Kharkiv, Ukraine.

- 12 **Triesch, F.** (2001), "Rekuperative Brennstoffvorwärmung – Erhöhte Wirtschaftlichkeit von Gasturbinen", *BWK. Das Energie-Fachmagazin*, vol. 53, no. 10, pp. 60–62.

Сведения об авторах (About authors)

Смирнов Андрей Витальевич – кандидат технических наук, генеральный конструктор – начальник СКБ, ПАО «Сумское НПО», г. Сумы, Украина; e-mail: smirnov_a@frunze.com.ua.

Smirnov Andrey – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), General designer - head of special design bureau, PJSC «Sumy NPO», Sumy, Ukraine; e-mail: smirnov_a@frunze.com.ua.

Серета 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; e-mail: sereda_r@frunze.com.ua.

Борисов Николай Анатольевич – аспирант, кафедра технической теплофизики (ТТФ), Сумский государственный университет, г. Сумы, Украина; e-mail: borisov.nikolai.85@yandex.ua.

Borisov Nikolai – Postgraduate student, Department of Engineering Thermophysics, Sumy State University, Sumy, Ukraine; e-mail: borisov.nikolai.85@yandex.ua.

Пожалуйста ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Смирнов, А. В. Газомаляный кожухотрубный теплообменник с безопасным каналом в маслосистеме газотурбинного двигателя газоперекачивающего агрегата [Текст] / **А. В. Смирнов, Р. Н. Серета, Н. А. Борисов** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – № 10(1182). – С. 93–98. – Бібліогр.: 12 назв. – ISSN 2078-774X. – doi: 10.20998/2078-774X.2016.10.14.

Please cite this article as:

Smirnov, A., Sereda, R. and Borisov, N. (2016), "Gaseous Oil Shell-and-Tube Heat Exchanger with the Safe Channel in the Oil System of Gas Turbine Engine for the Gas-Compressor Unit". *Bulletin of NTU "KhPI". Series: Power and heat engineering processes and equipment*, no. 10(1182), pp. 93–98, ISSN 2078-774X, doi: 10.20998/2078-774X.2016.10.14

Будь ласка посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Смірнов, А. В. Газомаляний кожухотрубний теплообмінник з безпечним каналом в маслосистемі газотурбінного двигуна газоперекачувального агрегату [Текст] / **А. В. Смірнов, Р. М. Серета, М. А. Борисов** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – № 10(1182). – С. 93–98. – Бібліогр.: 12 назв. – ISSN 2078-774X. – doi: 10.20998/2078-774X.2016.10.14

АНОТАЦІЯ Розглянуто два варіанти підігріву паливного газу газотурбінного двигуна ГПА з використанням підігрівача паливного газу вогневого типу і кожухотрубного газомаляного теплообмінника з безпечним каналом. Представлена методика дослідження та виконаний економічний аналіз розглянутих схемних варіантів з підігріву паливного газу. Економічно обґрунтовано застосування кожухотрубного газомаляного теплообмінника з безпечним каналом в маслосистемі газотурбінного двигуна ГПА.

Ключові слова: газоперекачувальний агрегат, газотурбінний двигун, кожухотрубний газомаляний теплообмінник, біметалева ребриста труба, безпечний канал, підігрів паливного газу, приведені витрати, економічний ефект.

Поступила (received) 10.01.2016