

РАЗРАБОТКА ТЕПЛООБМЕННОГО АППАРАТА-РЕГЕНЕРАТОРА ДЛЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО НАГРЕВА ГАЗООБРАЗНЫХ СРЕД

Д.А. Базыкин¹, А.И. Сухов², А.В. Бараков¹

¹Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия;

²ООО ФПК «Космос-Нефть-Газ», г. Воронеж, Россия

bazykin.denis@yandex.ru

Резюме: Актуальность поставленной задачи заключается в разработке теплообменного аппарата-регенератора, предназначенного для высокотемпературного нагрева газообразных сред, которые применяются в различных технологических схемах нефтехимической, газоперерабатывающей, энергетической и других отраслей промышленности. Разработанный теплообменный аппарат обладает высокой производительностью за счет развитой поверхности теплообмена, надежностью за счет того, что внутренняя и наружная трубы выполнены относительно друг друга подвижными с компенсацией линейных размеров, прост в изготовлении, не требует применения промежуточного теплоносителя, в качестве греющего теплоносителя могут быть использованы продукты сгорания неочищенного, низкопотенциального газообразного топлива. При этом имеется возможность оснащения разработанного аппарата конвекционным теплообменником для более эффективного использования теплоты продуктов сгорания топлива. В статье описана предлагаемая конструкция, принцип работы данного теплообменного аппарата – регенератора. Произведен обзор технической литературы, показаны основные преимущества аппарата по сравнению с известными в настоящее время отечественными и иностранными аналогами. В работе приведены основные расчетные зависимости, используемые при проектировании, а также полученные результаты проведенных расчетов. Рассмотрена возможность применения предлагаемого теплообменника в составе газотурбинной установки, используемой в качестве автономного источника электропитания, а также приведены сведения о технологических процессах, в которых он может быть использован.

Ключевые слова: теплообменный аппарат, конструкция, газ, воздух, электроэнергия, газотурбинная установка, нагрев, продукты сгорания, топливо, теплоноситель.

Для цитирования: Базыкин Д.А., Сухов А.И., Бараков А.В. Разработка теплообменного аппарата-регенератора для высокотемпературного нагрева газообразных сред // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2019. Т. 21. №5. С. 38-49. doi:10.30724/1998-9903-2019-21-5-38-49.

DEVELOPMENT OF A HEAT EXCHANGER DEVICE-REGENERATOR FOR HIGH-TEMPERATURE GAS HEATING

DA Bazykin¹, AI Sukhov², AV Barakov³

¹Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia;

²Limited liability company Financial industrial company «Cosmos-Oil-Gas»,

Voronezh, Russia

bazykin.denis@yandex.ru

Abstract: The urgency of the task is to develop a heat exchanger-regenerator designed for high-temperature heating of gaseous media, which are used in various technological schemes of the petrochemical, gas processing, energy and other industries. The developed heat exchanger has high performance due to the developed heat exchange surface, reliability due to the fact that the inner and outer pipes are movable relative to each other with linear dimensions compensation, it is simple to manufacture, does not require the use of an intermediate heat carrier, can be used as a heating coolant combustion products of untreated, low-grade gaseous fuel. At the same time, it is possible to equip the developed apparatus with a convection heat exchanger for more efficient use

of the heat of the fuel combustion products. The article describes the proposed design, the principle of operation of this heat exchanger-regenerator. A review of the technical literature has been carried out, the main advantages of the device are shown in comparison with the currently known domestic and foreign counterparts. The paper presents the main calculated dependencies used in the design, as well as the results of the calculations. The possibility of using the proposed heat exchanger as part of a gas turbine unit used as an autonomous power source is considered, as well as information about technological processes in which it can be used. In conclusion, we can say that the developed heat exchanger has high performance, differs in the ability to work at high temperatures without violating the integrity of the structure, does not require the use of an intermediate heat carrier, and is to be used in many industries.

Keywords: heat exchanger, construction, gas, air, electric power, gas turbine plant, heating, combustion products, fuel, coolant.

For citation: Bazykin DA, Sukhov AI, Barakov AV. Development of a heat exchanger device-regenerator for high-temperature gas heating. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2019; 21(5):38-49. (In Russ). doi:10.30724/1998-9903-2019-21-5-38-49.

Введение

На месторождениях нефти и газа, значительно удаленных от линий электропередач и необходимой инфраструктуры, существует потребность в автономных источниках электрического питания, при помощи которых организуется работа всего используемого при добыче оборудования, а также систем автоматического управления и контроля. Автономные источники электропитания должны быть надежными, эффективными, а также иметь длительный межремонтный период. Существует множество вариантов исполнения данных устройств, одним из которых является источник электрического питания на базе газотурбинной установки (ГТУ) [1, 2, 3].

В настоящее время значительный интерес вызывают газотурбинные установки с регенеративным циклом, основным достоинством которых является повышение коэффициента полезного действия установки, а также дополнительный нагрев воздуха, поступающего в камеру сгорания [4]. Известна газотурбинная установка с модернизацией регенеративного цикла, работающей на низконапорном углеводородном газе любого состава, рабочим телом которой является атмосферный воздух. Принципиальная схема газотурбинной установки представлена на рис. 1. Приведенная схема ГТУ является «газотурбинной установкой с камерой внешнего горения», где камера внешнего горения представлена в виде теплообменного аппарата-регенератора. Теплообменный аппарат в данной установке предназначен для нагрева рабочего тела – воздуха [5]. Как известно, воздух обладает значительно низкой теплоемкостью, которая, в свою очередь, зависит от давления и температуры [6], поэтому его нагрев является достаточно сложной задачей. В связи с этим, теплообменный аппарат-регенератор должен работать подобно котлу, где нагрев происходит за счет сжигания газа. При этом, теплообменный аппарат-регенератор должен иметь высокую производительность и иметь устойчивую к воздействию высоких температур конструкцию.

При анализе международных источников [7, 8] были выявлены принципиальные схемы газотурбинных установок, в которых для нагрева рабочего тела так же необходим теплообменный аппарат, не теряющий работоспособности при воздействии высоких температур.

Одна из первостепенных задач, стоящих при разработке теплообменного аппарата-регенератора, заключается в поиске конструктивных решений для обеспечения высокотемпературного нагрева газообразной среды в заданных условиях.

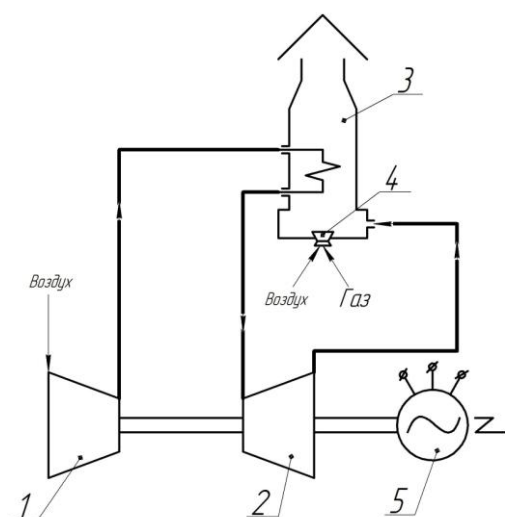


Рис.1. Принципиальная схема газотурбинной установки для переработки попутного нефтяного газа в электроэнергию: 1 – компрессор; 2 – турбина; 3 – теплообменный аппарат-регенератор; 4 – атмосферное горелочное устройство; 5 – электрогенератор

Материалы и методы

Был разработан теплообменный аппарат-регенератор с широким спектром прикладного использования. В частности, разработанное устройство может быть использовано для высокотемпературного нагрева рабочего тела (воздуха) в газотурбинной установке для переработки попутного нефтяного газа в электроэнергию.

Существуют различные типы теплообменных аппаратов, подходящих по принципу действия для их использования в описанной технологической схеме, но каждый из них имеет определенные недостатки. Основные достоинства и недостатки аналогов предлагаемого устройства приведены в таблице 1.

Таблица 1

Достоинства и недостатки аналогов разрабатываемого теплообменного аппарата

Теплообменный аппарат	Достоинства	Недостатки
Подогреватель жидких и газообразных сред [9]	<ul style="list-style-type: none"> - высокая производительность; -развитая поверхность отбора тепла из зоны горения; -возможность использования в качестве топлива неочищенного, низкопотенциального природного газа. 	<ul style="list-style-type: none"> - сложность конструкции; - отсутствие возможности использования для высокотемпературного нагрева.
Подогреватель природного газа [10]	<ul style="list-style-type: none"> - высокая эффективность работы; - простота конструкции; - возможность использования в качестве топлива неочищенного, низкопотенциального природного газа. 	<ul style="list-style-type: none"> - использование промежуточного жидкого теплоносителя, накладывающее определенные требования по выбору материалов конструкции; -максимальная температура нагрева среды зависит от температуры вскипания промежуточного теплоносителя, что ограничивает сферу применения указанного подогревателя верхним пределом достижимых температур при нагреве.

Продолжение таблицы 1

Технологический нагреватель [11]	- высокая эффективность и надежность работы; - возможность использования в качестве топлива неочищенного, низкопотенциального природного газа.	- отсутствие возможности использования для высокотемпературного нагрева; - сложность конструкции и высокая материалоемкость.
Теплообменник для непосредственного использования в микроГТУ [12]	- высокая производительность; - возможность работы при высоких температурах; - возможность использования в качестве топлива неочищенного, низкопотенциального природного газа. - простота конструкции.	- камера сгорания находится вне теплообменного аппарата, в связи с этим, передача теплоты осуществляется только конвекцией, происходят значительные потери тепла, которое могло быть получено от пламени горелки с помощью лучистого теплообмена; - материалоемкость.
Высокотемпературный теплообменник газ – газ [13]	- высокая эффективность; - возможность работы при высоких температурах; - возможность использования в качестве топлива неочищенного, низкопотенциального природного газа.	- использование промежуточного твердого теплоносителя, что приводит к дополнительным потерям тепла; - движение вторичного теплоносителя осуществляется устройством наддува, требующим определенного расхода электрической энергии; - частое обслуживание и ремонт.

На рис. 2. представлен чертеж предлагаемого теплообменного аппарата-регенератора.

В предлагаемом нами теплообменном аппарате-регенераторе [14] отсутствуют указанные недостатки его аналогов.

Устройство теплообменного аппарата

В разработанном теплообменном аппарате-регенераторе (рис. 2) имеется дымовая труба 1, теплообменный модуль, который содержит внутреннюю трубу 3 и наружную трубу 2, расположенные коаксиально. Внутренняя труба 3 имеет развитую поверхность теплообмена за счет продольного оребрения 5 с внешней стороны. Ребра 5 (разрез А-А на рис. 2) должны иметь высоту, обеспечивающую необходимую для эффективного теплообмена скорость нагреваемой среды, а также необходимый зазор между торцами ребер и внутренней поверхностью наружной трубы 2. Подвод нагреваемой газообразной среды осуществляется через штуцер 7 входного коллектора 6, установленного в верхней части наружной трубы 2. Входной коллектор 6 имеет переменное сечение по окружности для обеспечения постоянной скорости потока нагреваемого газа. Постоянная скорость потока достигается за счет сужения сечения входного коллектора 6 в направлении от штуцера 7 подвода нагреваемой среды. Внутренняя стенка входного коллектора 6 выполнена в виде кольцевой решетки 8. Отвод нагреваемого газа осуществляется через штуцер 10 выходного коллектора 9, который так же имеет переменное сечение по окружности для обеспечения неизменной скорости потока нагреваемой среды, осуществляющейся за счет расширения сечения выходного коллектора 9 в направлении штуцера 10.

Для увеличения значения коэффициента полезного действия и более эффективного использования теплоты продуктов сгорания возможно дополнительное оснащение предлагаемого теплообменного аппарата конвекционным теплообменником. Чертеж такого варианта конструкции представлен на рис. 3.

При оснащении аппарата-регенератора конвекционным теплообменником 12 входной коллектор 6 имеет квадратную форму для обеспечения неизменной скорости

движения потока нагреваемой среды, поступающей из конвекционного теплообменника 12 через змеевики 14, которые закреплены в трубчатой решетке 13. Полость внутренней трубы 3 и полость конвекционного теплообменника 12 сообщены для прохода греющего теплоносителя, дальнейшего нагрева змеевиков и последующего его отвода в атмосферу через дымовую трубу 1.

Во избежание перегрева внутренней стенки теплообменного аппарата, горелочное устройство расположено коаксиально с внутренней трубой, длина и внутренний диаметр которой больше, чем диаметр и длина факела горелки.

Линзовый компенсатор закреплен на наружной трубе с целью предотвращения разрыва конструкции аппарата-регенератора во время работы при высоких температурах, которое обеспечивается компенсацией температурных удлинений.

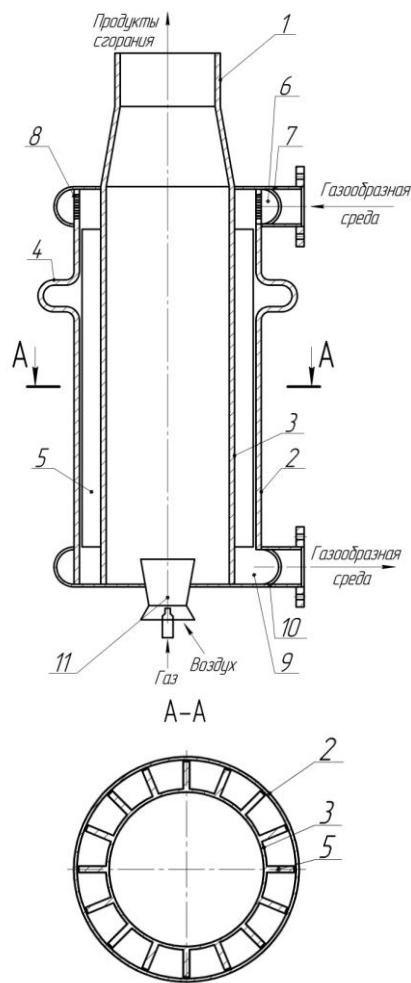


Рис.2. Чертеж предлагаемого теплообменного аппарата-регенератора

Входной коллектор с внутренней стороны снабжен кольцевой решеткой, способствующей равномерному распределению нагреваемой среды по каналам, образованным ребрами.

Принцип работы представленного теплообменного аппарата-регенератора.

Нагреваемый газ подается через штуцер 7 во входной коллектор 6. Через кольцевую решетку 8 из коллектора газообразная среда проникает в образованную между внутренней трубой 3 и наружной трубой 2 полость, которая разделена ребрами 5 на параллельные каналы. Газообразная среда равномерно распределяется по каналам, при движении по каналам нагревается и попадает в выходной коллектор 9, затем с помощью штуцера 10 отводится. Нагрев рабочего тела осуществляется продуктами сгорания. К горелочному устройству 11 подводится топливный газ и атмосферный воздух, необходимый для процесса горения. При сжигании газа непрерывно образуются продукты сгорания высокой температуры, которые нагревают стенку внутренней трубы (лучистый теплообмен). В последующем, отдав тепло стенке, продукты сгорания поступают в атмосферу через дымовую трубу 1. Греющий и нагреваемый теплоносители движутся по противоточной

схеме. При значительных изменениях значений температуры теплоносителей образуется разность температурных удлинений наружной трубы 2 и внутренней трубы 3, которая компенсируется с помощью линзового компенсатора.

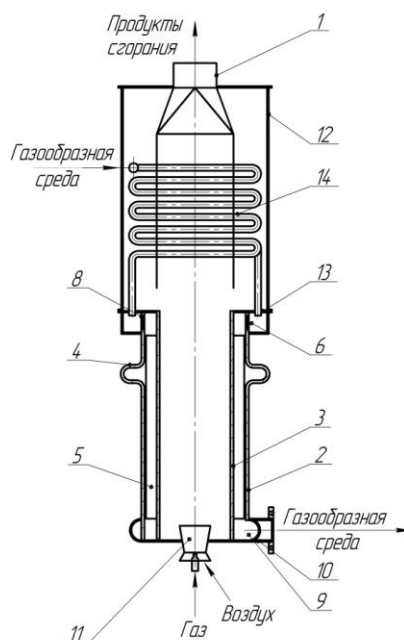


Рис. 3. Предлагаемый теплообменный аппарат-регенератор в соединении с конвекционным теплообменником

В случае присоединения к теплообменному аппарату-регенератору конвекционного теплообменника 12, газообразная среда подается во внутреннюю полость змеевиков 14, откуда проходит во входной коллектор 6. Далее все процессы происходят аналогично. В данном случае продукты сгорания, являющиеся греющим теплоносителем, поступают из полости внутренней трубы 3 в полость конвекционного теплообменника, где происходит теплосдача газообразной среде через стенку змеевиков 14. На выходе из полости конвекционного теплообменника 12 установлена дымовая труба 1, через которую продукты сгорания в последующем поступают в атмосферу.

В ходе проектирования теплообменного аппарата-регенератора были произведены расчеты его основных параметров под определенные условия, которые имеют место при работе теплообменника в составе ГТУ с модернизацией регенеративного цикла. А именно, нагреваемый воздух на входе в теплообменный аппарат имеет температуру 70 °С, теплообменный аппарат при этом должен нагревать рабочее тело до температуры 700 °С. При этом, расход рабочего тела 0,069 кг/с, абсолютное давление 0,2 МПа. Расход топливного газа 12 м³/ч.

Руководствуясь требованиями по монтажу, был выбран внутренний диаметр аппарата, равный 600 мм. Было принято решение количество ребер, размещенных на внутренней трубе, выбрать равным 130, высотой 4 мм и толщиной стенки 7 мм.

В расчетах были использованы следующие основные расчетные зависимости.

Мощность теплового потока Q , Вт рассчитывается по формуле

$$Q = \frac{m \cdot C_p \cdot (T_2 - T_1)}{\eta}, \quad (1)$$

где C_p – удельная изобарная теплоемкость, Дж/(кг·К); T_1 – температура воздуха на входе, К; T_2 – температура воздуха на выходе, К; η – КПД подогревателя.

Расчет теплоотдачи со стороны воздуха

Скорость w , м/с движения воздуха по каналам

$$w = \frac{m}{N \cdot \rho \cdot f_{1K}}, \quad (2)$$

где N – количество каналов, образованных ребрами, шт.; m – расход воздуха, кг/с;
 ρ – плотность воздуха, кг/м³; f_{1K} – площадь проходного сечения одного канала, м².

Число Рейнольдса Re определяется по формуле

$$Re = \frac{w \cdot d_r \cdot \rho}{\mu}, \quad (3)$$

где w – скорость движения воздуха, м/с; d_r – гидравлический диаметр канала движения воздуха, м.

Критерияльное уравнение Nu для расчета теплоотдачи

$$Nu = 3,66 \cdot \left(\frac{Re}{2300} \right)^{2,3 + \lg(Pr)}, \quad (4)$$

где Pr – число Прандтля при данном давлении и температуре.

Коэффициент теплоотдачи со стоны воздуха α_1 , Вт/(м² · К) определяется по формуле

$$\alpha_1 = \frac{Nu \cdot \lambda}{d_r}, \quad (5)$$

где λ – коэффициент теплопроводности воздуха, Вт/(м · К).

Потери давления в каналах движения воздуха на трение $\Delta P_{тр}$, Па на каждый 1 м длины теплообменника

$$\Delta P_{тр} = \zeta \cdot \frac{L}{d_r} \cdot \frac{\rho \cdot w^2}{2}, \quad (6)$$

где L – длина канала, м; ζ – коэффициент сопротивления среды.

Расчет теплоотдачи со стороны дымовых газов

Коэффициент ослабления лучей k_r

$$k_r = \frac{0,8 + 1,6 \cdot r_{H_2O}}{\sqrt{r_p \cdot s}} \cdot \left(1 - 0,38 \cdot \frac{T_p}{1000} \right), \quad (7)$$

где r_{H_2O} – объемная доля водяных паров; r_p – объемная доля трехатомных газов в составе дымовых газов; s – эффективная толщина газового слоя, м; T_p – расчетная температура дымовых газов, К.

Степень черноты трехатомных газов в составе дымовых ϵ_g определяется по формуле

$$\epsilon_g = 1 - e^{-k_r \cdot r_p \cdot s}. \quad (8)$$

Эффективная степень черноты стенки $\epsilon_{эф}$ определяется по формуле

$$\epsilon_{эф} = 0,5 \cdot (\epsilon_{ст} + 1), \quad (9)$$

где $\epsilon_{ст}$ – степень черноты материала стенки.

Поглощательная способность газа A_r определяется по формуле

$$A_r = \epsilon_g \cdot \left(\frac{T_p}{T_{СТ}} \right)^{0,65}, \quad (10)$$

где $T_{СТ}$ – температура стенки, К.

Интенсивность результирующего излучения $E_{рез}$, Вт/м² рассчитывается по формуле

$$E_{рез} = \epsilon_{эф} \cdot C_0 \cdot \left[\epsilon_g \cdot \left(\frac{T_p}{100} \right)^4 - A_r \cdot \left(\frac{T_{СТ}}{100} \right)^4 \right], \quad (11)$$

где $C_0 = 5,67$ – степень излучения абсолютно черного тела.

Коэффициент теплоотдачи α_2 , Вт/(м² · К) для лучистого теплообмена от горячих газов определяется по соотношению

$$\alpha_2 = \frac{E_{рез}}{T_p - T_{СТ}}. \quad (12)$$

Расчет коэффициента теплопередачи и площади теплообмена

Коэффициент теплопередачи k , Вт/(м²·К) определяется по формуле

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_{ст}}{\lambda_{ст}} + \frac{1}{\alpha_2}}, \quad (13)$$

где $\lambda_{ст}$ – коэффициент теплопроводности материала стенки, Вт/(м·К); $\delta_{ст}$ – толщина стенки, м.

Средне логарифмический температурный напор $\Delta T_{ср}$, К рассчитывается по формуле

$$\Delta T_{ср} = \frac{\Delta T_6 - \Delta T_m}{\ln \left(\frac{\Delta T_6}{\Delta T_m} \right)}, \quad (14)$$

где ΔT_6 – большая разность температур, К; ΔT_m – меньшая разность температур, К.

Плотность теплового потока q , Вт/м² определяется по формуле

$$q = k \cdot \Delta T_{ср}. \quad (15)$$

Площадь поверхности теплообмена F , м²

$$F = \frac{Q}{q}. \quad (16)$$

Результаты

Основные результаты проведенных расчетов представлены в таблице 2.

С учетом полученных результатов, можно сделать вывод о том, что габаритные размеры ГТУ совместно с предложенным теплообменным аппаратом, приблизительно составят (ДхШхВ) – 1500 мм x 1500 мм x 1200 мм.

Разработанный аппарат-регенератор обладает следующими преимуществами:

- высокая производительность за счет развитой поверхности теплообмена (внутренняя труба оснащена продольными ребрами);
- во время работы при высоких температурах обеспечивается целостность конструкции (внутренняя и наружная трубы выполнены относительно друг друга подвижными с компенсацией линейных размеров с помощью линзового компенсатора, расположенного на наружной трубе);
- для более эффективного использования теплоты продуктов сгорания подогреватель может быть дополнительно оснащен конвекционным теплообменником;
- не требует использования промежуточного теплоносителя.

Предлагаемый теплообменный аппарат может быть использован в нефтехимической, газоперерабатывающей, энергетической и других отраслях промышленности. В частности, данное устройство может использоваться в следующих областях:

- в качестве теплообменного аппарата-регенератора для ГТУ с модернизацией регенеративного цикла.

С учетом полученных результатов, можно сделать вывод о том, что габаритные размеры ГТУ совместно с предложенным теплообменным аппаратом, приблизительно составят (ДхШхВ) – 1500 мм x 1500 мм x 1200 мм.

Разработанный аппарат-регенератор обладает следующими преимуществами:

- высокая производительность за счет развитой поверхности теплообмена (внутренняя труба оснащена продольными ребрами);
- во время работы при высоких температурах обеспечивается целостность конструкции (внутренняя и наружная трубы выполнены относительно друг друга подвижными с компенсацией линейных размеров с помощью линзового компенсатора, расположенного на наружной трубе);
- для более эффективного использования теплоты продуктов сгорания подогреватель может быть дополнительно оснащен конвекционным теплообменником;
- не требует использования промежуточного теплоносителя.

Таблица 2

Результаты расчетов основных параметров теплообменного аппарата

Параметры	Значения
Нагреваемая среда	Воздух

Продолжение таблицы 2

Расход нагреваемого теплоносителя m , кг/с	0,069
Температура нагреваемого теплоносителя на входе t_1 , °C	70
Температура нагреваемого теплоносителя на выходе t_2 , °C	700
Диаметр внутренний $D_{вн}$, мм	600
Высота продольных ребер h , мм	4
Расчетная площадь теплообмена F , м ²	1,832
Число продольных ребер N , шт	130
Ширина паза каналов движения воздуха $\delta_{п}$, мм	8,9
Толщина стенки $\delta_{ст}$, мм	7
Коэффициент теплопередачи k , Вт/(м ² ·К)	29,34
Плотность теплового потока q , Вт/м ²	25349
Расчетная длина теплообменника L , м	0,972
Рекомендуемая длина теплообменника L' , м	1,2
Потери давления на трение $\Delta P_{тр}$, Па	1207
Средняя температура стенки $T_{ст}$, К	1188

С учетом полученных результатов, можно сделать вывод о том, что габаритные размеры ГТУ совместно с предложенным теплообменным аппаратом, приблизительно составят (ДхШхВ) – 1500 мм х 1500 мм х 1200 мм.

Разработанный аппарат-регенератор обладает следующими преимуществами:

- высокая производительность за счет развитой поверхности теплообмена (внутренняя труба оснащена продольными ребрами);

- во время работы при высоких температурах обеспечивается целостность конструкции (внутренняя и наружная трубы выполнены относительно друг друга подвижными с компенсацией линейных размеров с помощью линзового компенсатора, расположенного на наружной трубе);

- для более эффективного использования теплоты продуктов сгорания подогреватель может быть дополнительно оснащен конвекционным теплообменником;

- не требует использования промежуточного теплоносителя.

Предлагаемый теплообменный аппарат может быть использован в нефтехимической, газоперерабатывающей, энергетической и других отраслях промышленности. В частности, данное устройство может использоваться в следующих областях:

- в качестве теплообменного аппарата-регенератора для ГТУ с модернизацией регенеративного цикла;

- для подогрева природного газа на входе газораспределительной станции. На газораспределительных станциях природный газ после прохождения дроссельных клапанов охлаждается до низких температур, поэтому для предотвращения гидратообразования и обмерзания оборудования необходимо организовывать подогрев газа. Сущность метода предотвращения образования газовых гидратов заключается в том, что температура добываемого газа, содержащего влагу, поддерживается выше температуры гидратообразования при постоянном давлении [15, 19].

- для подогрева воздуха, необходимого при проведении различных технологических процессов;

- для подогрева газа перед детандер-генераторными агрегатами (ДГА). Важнейшим фактором, который влияет на эффективность работы ДГА, является выбранный метод подогрева газа. Для подогрева газа перед детандером используется теплоноситель с высокой температурой, который образуется в процессе сжигания органического топлива [17].

- для предупреждения обмерзания промысловых газопроводов – подогрев газа у скважин;

- для нормального процесса работы газоперекачивающих агрегатов требуется подогрев газа, идущего на топливную систему [16];

- на месторождениях с небольшими объемами добычи. При подготовке газа на таких объектах существует необходимость применения подогревателей газа, которые являются центрами обогрева всего используемого оборудования, а также трубопроводов [18]. Обогрев осуществляется с помощью нагретого в подогревателе газообразного теплоносителя.

Заключение и выводы

Таким образом, разработанный теплообменный аппарат обладает высокой производительностью, отличается возможностью работы при высоких температурах без нарушения целостности конструкции, не требует использования промежуточного теплоносителя, подлежит применению в составе газотурбинной установки для переработки попутного нефтяного газа в электроэнергию, а также во многих отраслях промышленности, где в технологическом процессе необходим нагрев газообразной среды до высокой температуры.

Литература

1. Горшков М.В., Пашали Д.Ю. К вопросу применения газотурбинных электростанций на нефтяных месторождениях с целью обеспечения надежности электроснабжения и экологичности // Инновационная наука. 2018. № 7-8. С. 32-35.
2. Леушева Е.Л., Моренов В.А. Энергообеспечение производственных объектов в условиях Севера при кустовом строительстве скважин // Территория «НЕФТЕГАЗ». 2015. № 5. С. 92-95.
3. Садыков Б.Х. Автономное электроснабжение нефтяных месторождений // Наука сегодня. Ключевые проблемы и перспективы развития. 2015. С. 91-92.
4. Романов В.В., Спицын В.Е., Боцула А.Л., и др. Особенности создания газотурбинной установки регенеративного цикла для ГПА // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2009. № 4 (40). С. 16-20.
5. Сухов А.И., Лачугин И.Г., Шевцов А.П., и др. Совершенствование технологии производства электроэнергии газотурбинными установками // Насосы. Турбины. Системы. 2013. № 1 (6). С. 22-26.
6. Хасанов Н.Г., Шигапов А.Б. Влияние реальных свойств воздуха на показатели стационарных газотурбинных установок // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2014. № 9-10. С. 11-20.
7. Chmielniak T., Czaja D., Lepszy S. Selection of the air heat exchanger operating in a gas turbine air bottoming cycle // Archives of thermodynamics. 2013. V. 34. № 4. pp. 93-106.
8. Kosowski K., Tucki K., Piwowski M., et al. Thermodynamic cycle concepts for high-efficiency power plants. PE B: prosumer and distributed power industry // Sustainability. 2019. №11. pp. 3-16.
9. Смирнов Ю.А., Чистик С.М., Паршин С.Н., и др. Подогреватель жидких и газообразных сред. Патент 2296921 Российская Федерация, МПК F 24 Н 3/08. № 2005122794/06; опубл. 10.04.2007; Бюл. № 10.
10. Абалаков Г.В., Тимонин В.А., Шушин Н.А., и др. Подогреватель природного газа и газовая горелка подогревателя. Патент 58674 Российская Федерация, МПК F 24 Н 3/08. опубл. 27.11.2006; Бюл. № 33.
11. Добрянский В.Л., Зарецкий Я.В., Коротков Л.В., и др. Технологический нагреватель. Патент 2168121 Российская Федерация, МПК F 24 Н 3/08. опубл. 27.05.2001; Бюл. № 15.
12. AL-Attab K.A., Zainal Z.A. Design of high temperature heat exchanger for the indirectly firing of a micro gas turbine using biomassfuels // Product & Design. 2007. pp. 22-26.
13. Amirante R., Tamburrano P. High Temperature Gas-to-Gas Heat Exchanger Based on a Solid Intermediate Medium // Advances in Mechanical Engineering. 2014. P.20.
14. Лачугин И.Г., Шевцов А.П., Хохлов В.Ю., и др. Подогреватель газообразных сред. Патент 2686357 Российская Федерация, МПК F 24 Н 3/08, F 24 Н 3/10. опубл. 25.04.2019; Бюл. № 12.
15. Зацепин С.С., Купцов С.М. Применение турбодетандерных установок на газораспределительных станциях // Территория «НЕФТЕГАЗ». 2016. № 12. С. 50-53.
16. Асташев С.И., Медведева О.Н. Разработка альтернативного способа подогрева топливного газа на газоперекачивающих агрегатах // Вестник гражданских инженеров. 2017. № 6 (65). С. 172-176.
17. Агабабов В.С., Корягин А.В., Архарова А.Ю. Эффективность использования двухступенчатого подогрева газа перед детандер-генераторным агрегатом на ТЭС // Энергосбережение и водоподготовка. 2004. № 4 (31). С. 70-72.
18. Евдокимов Ю.Ю., Теньковский Д.В. Технологии с малым энергопотреблением на удаленных объектах Крайнего Севера // Экспозиция Нефть Газ. 2014. № 6 (38). С. 64-65.
19. Ефимов В.В., Халиулин Д.В., Халиулина Л.Э. Образование газовых гидратов на элементах внутренних устройств сепараторов при промысловой подготовке природного газа // International Scientific Review. 2018. № 1 (40). С. 27-34.

Авторы публикации

Базыкин Денис Александрович – магистрант, Воронежский государственный технический университет, инженер отдела разработки и реализации НИОКР, ООО ФПК «Космос-НефтьГаз».

Сухов Анатолий Иванович – д-р. техн. наук, помощник исполнительного директора по новой технике, ООО ФПК «Космос-Нефть-Газ». Email: suhov@kng.vrn.ru.

Бараков Александр Валентинович – д-р. техн. наук, профессор, заведующий кафедрой Теоретической и промышленной теплоэнергетики, Воронежский государственный технический университет. Email: pt_vstu@mail.ru.

References

1. Gorshkov MV, Pashali DY. On the use of gas turbine power plants in oil fields to ensure the reliability of power supply and environmental friendliness . *Innovation science*. 2018;7-8:32-35.
2. Leusheva YeL, Morenov VA. ` Electric power supply of production facilities in arctic conditions when the wells are constructed in clusters . *Oil and Gas Territory*. 2015;5:92-95.
3. Sadykov BH. Autonomous power supply of oil fields. *Science today. Key problems and development prospects*. 2015. pp. 91–92.
4. Romanov VV, Spitsyn VE, Botsula AL, et al. Features of the creation of a gas turbine unit of the regenerative cycle for gas pumping units. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2009;4(40):16-20.
5. Sukhov AI, Lachugin IG, Shevtsov AP, et al. Improved production of electricity by using gas turbine plant. *Pumps. Turbines. Systems*. 2013;1(6):22-26.
6. Hasanov NG, Shigapov AB. The influence of real properties of combustion materials parameters on stationary gas turbine units. *Proceedings of the higher educational institutions. Energy sector problems*. 2014;9-10:11–20.
7. Chmielniak T, Czaja D, Lepszy S. Selection of the air heat exchanger operating in a gas turbine air bottoming cycle . *Archives of thermodynamics*. 2013;34(4): 93-106.
8. Kosowski K, Tucki K, Piwowarski M, et al. Thermodynamic cycle concepts for high-efficiency power plants. Pt B. Prosumer and distributed power industry *Sustainability*. 2019;11:3-16.
9. Smirnov JA, Chistik SM, Parshin SN, et al. *Podogrevatel' zhidkih i gazoobraznyh sred*. Patent No. 2296921 RF, F 24 H 3/08. N. 2005122794/06; opubl. 10.04.2007; Byul. N.10. P.8.
10. Abalakov GV, Timonin VA, Shushin NA. *Podogrevatel' prirodnogo gaza i gazovaya gorelka podogrevatelja*. Patent N. 58674 RF, F 24 H 3/08. N. 2006119680/22; opubl. 27.11.2006; B. N. 33.
11. Dobrjanskij VL, Zaretskij JaV, Korotkov LV. *Tehnologicheskij nagrevatel'*. Patent N. 2168121 RF, F 24 H 3/08. No. 99119765/06; opubl. 27.05.2001 Byul. N. 15.
12. AL-Attab K.A, Zainal ZA. Design of high temperature heat exchanger for the indirectly firing of a micro gas turbine using biomassfuels . *Product & Design*. 2007. pp. 22-26.
13. Amirante R, Tamburrano P. High Temperature Gas-to-Gas Heat Exchanger Based on a Solid Intermediate Medium . *Advances in Mechanical Engineering*. 2014. P.20 .
14. Shevtsov IG, Hohlov AP, Suhov VJ, et al. *Podogrevatel' gazoobraznyh sred* Patent No. 2686357 RF, F 24 H 3/08, F 24 H 3/ N. 2018105811; opubl. 25.04.2019; Byul. N.12.
15. Zatsepin SS, Kuptsov SM. The Use Of Turbo-Expander Units On Gas-Distributing Stations. *Oil and Gas Territory*. 2016;12:50-53.
16. Astashev SI, Medvedeva ON. The development of an alternative method for heating of fuel gas in gas transmittal units . *Scientific-technical journal «Bulletin of Civil Engineers»*. 2017;6(65):172-176.
17. Agababov VS, Korjagin AV, Arharova AY. Efficiency of using two-stage gas preheating before the expander-generating unit at thermal power plants. *Energy saving and water treatment*. 2004;4(31):70-72.
18. Evdokimov YY, Ten'kovskij DV. Technologies with small power consumption at remote objects of the Far North. *Exposition Oil Gas*. 2014;6(38):64-65.
19. Yefimov VV, Khaluylun DV, Khaluyluna LE. Problems of separation in the formation of gas hydrates on the elements of internal devices of separators in the field preparation of natural gas. *International Scientific Review*. 2018;1(40):27-34.

Authors of the publication

Denis A. Bazykin – Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia; Limited liability company Financial industrial company «Cosmos-Oil-Gas», Voronezh, Russia.

Anatoly I. Sukhov – Limited liability company Financial industrial company «Cosmos-Oil-Gas», Voronezh, Russia. Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia. Email: suhov@kng.vrn.ru.

Alexander V. Barakov – Limited liability company Financial industrial company «Cosmos-Oil-Gas» Voronezh, Russia. Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia. Email: pt_vstu@mail.ru.

Поступила в редакцию

03 июня 2019 г.