

01, январь 2016

УДК 621.438

Высокотемпературные теплообменные аппараты для утилизации бросового тепла газотурбинных установок*

Липихин Е.Г., бакалавр

*Россия, 248600 г. Калуга, КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана
кафедра «Тепловые двигатели и теплофизика»*

Научные руководители: Жинов А.А. к.т.н., доцент

Россия, 248600, г. Калуга, КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана

Шевелев Д.В., к.т.н., доцент

Россия, 248600 г. Калуга, КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана

bauman@bmstu.ru

Целью работы является обзор класса высокотемпературных теплообменных аппаратов, которые нашли себе применение в качестве устройств, позволяющих повысить эффективность циклов энергетических установок.

В настоящее время на рынке энергетических установок в широком диапазоне мощностей – от 100 кВт до 60 МВт одно из доминирующих положений занимают газотурбинные установки (ГТУ) [1]. Причина этого – такие достоинства ГТУ как компактность, маневренность, легкость и быстрота запуска при любых температурах окружающей среды, возможность быстрого разворачивания дополнительных мощностей. К числу основных недостатков ГТУ простого цикла следует отнести большие потери тепловой энергии с выхлопными газами, которые имеют высокую температуру – порядка 375–550°C [2].

Полезное использование теплоты уходящих газов ГТУ возможно различными способами, основными из которых являются:

1. Регенеративный подогрев воздуха перед камерой сгорания ГТУ для повышения эффективности энергетической установки;
2. Создание комбинированных энергетических установок, где теплота выхлопных газов ГТУ используется для получения пара, который используется в качестве рабочего тела в цикле паротурбинной установки;

*- работа выполняется по договору ЗАО НПВП «Турбокон», являющегося исполнителем соглашения № 14.579.21.0031 о предоставлении субсидий Минобрнауки России на выполнение прикладных научных исследований (уникальный идентификатор прикладных научных исследований RFMEFI57914X0031)

3. В когенерационных установках, производящих как электрическую энергию, так и тепловую, в виде горячей воды для нужд теплоснабжения.

В основе любого из перечисленных способов полезного использования тепла уходящих газов ГТУ лежит использование теплообменного аппарата (ТА).

Классификация применяемых для этого ТА весьма разнообразна [3]. По способу передачи теплоты между теплоносителями они могут быть:

1. Регенеративные. Эти устройства состоят из теплоемкостного элемента, который подвергается поочередному воздействию теплоносителей.

2. Рекуперативные. При таком способе теплопередачи теплоносители разделены стенкой и одновременно движутся по каналам.

По схеме движения теплоносителей ТА подразделяются на прямоточные, противоточные и комбинированные.

По конструктивному исполнению их можно разделить на кожухотрубные с гладкими и оребренными трубами, пластинчатые, пластинчато-ребристые (Рис.1).

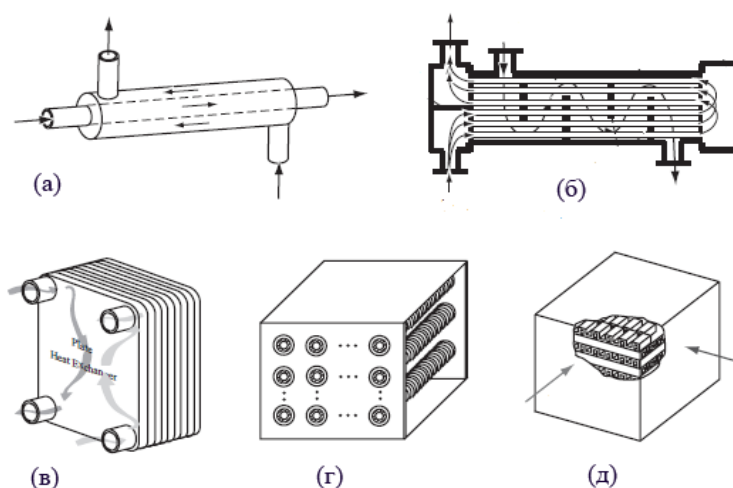


Рис. 1. Типы теплообменных аппаратов по конструктивному исполнению:
а) труба в трубе; б) кожухотрубный ТА с гладкими трубами; в) сварной пластинчатый ТА; г) разборный пластинчатый ТА; д) пластинчато-ребристые ТА

Выхлопные газы газотурбинных установок, согласно их температурному интервалу, относятся к источникам бросового тепла среднего потенциала, а теплообменные аппараты для их полезного использования (особенно при использовании дополнительного дожигания топлива) к высокотемпературным ТА [4].

Работа высокотемпературных ТА обладает рядом особенностей по сравнению с низкотемпературными ТА, учет которых необходим при разработке теплообменного оборудования.

1. Значительные термические напряжения, возникающие на режимах запуска, остановки и изменения нагрузки.
2. Лучистый теплообмен играет важную роль в процессе теплопередачи.
3. Обеспечение требуемого ресурса работы требует применения жаропрочных и жаростойких конструкционных материалов.
4. Большой уровень потерь полного давления из-за высокой температуры выхлопных газов.

Указанные особенности эксплуатации формулируют следующие требования к ТА ГТУ:

1. Надежность работы под действием высоких термических нагрузок.
2. Минимальная тепловая емкость ТА для сокращения времени выхода на номинальный режим.
3. Материалы, из которых изготавливаются высокотемпературные ТА, должны быть жаростойкими, коррозионностойкими и жаропрочными для сопротивления воздействию высоко нагретых выхлопных газов.
4. Простота монтажа и эксплуатации.

Для высокотемпературных ТА характерно [5]:

1. Шаг трубного пучка больше чем в низкотемпературных ТА для снижения потерь полного давления;
2. Большой уровень потерь полного давления может требовать включения в конструкцию котла-утилизатора вытяжного дымососа;
3. В случае сильного загрязнения дымовых газов золообразующими компонентами не используются оребренные теплообменные поверхности.

Для компенсации значительных тепловых расширений применяются ТА байонетного типа [6]. Они представляют собой кожухотрубные аппараты, теплообменные поверхности которых выполнены в виде набора концентрических труб. Наружная трубка герметично закреплена только с одного конца, внутренняя может свободно перемещаться в осевом направлении. Подогреваемый воздух, поступающий в теплообменник, проходит через трубку с меньшим диаметром, потом меняет свое направление в месте, где запаяна внешняя трубка и далее движется по кольцевому сечению. Горячие выхлопные газы движутся подобным образом внутри кожуха и подогревают воздушный поток.

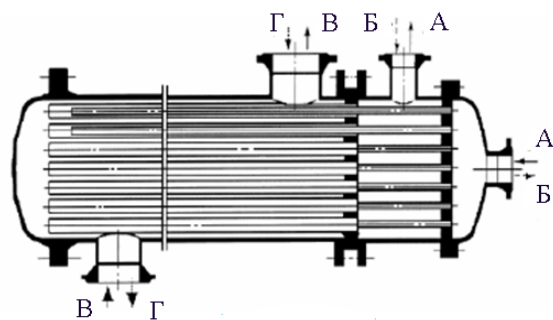


Рис. 2. ТА байонетного типа:

А, Б – вход и выход холодного теплоносителя; В, Г – вход и выход горячего теплоносителя

Главным достоинством труб такого типа является то, что они закреплены только с одной стороны и могут свободно удлиняться и расширяться, следовательно, они менее подвержены нагрузкам, возникающим при воздействии высоких температур.

В качестве материалов для ТА ГТУ используются [7,8,9]:

- Ферритные стали, которые используются при температурах до 750°C.
- Высокотемпературные сплавы на основе никеля (до 1200 К) к их достоинствам следует отнести слабую восприимчивость к агрессивным средам.
- Композитные материалы на основе углерода и карбида кремния, которые имеют хорошие прочностные свойства даже при температурах превышающие 1000°C.
- Керамические материалы на основе порошка оксида алюминия и карбида кремния.

Изготовление пластинчатых и пластинчато-ребристых ТА из металлических сплавов требует применения сварки, что наводит на трудность получения сварного шва или припоя, способного выдержать термические воздействия. В связи с этим были разработаны специальные высокотемпературные порошковые припои на основе никеля, способные работать при температурах выше 1000°C, характеристики которых подробно освещены в [10].

Свойства материалов для производства высокотемпературных ТА приведены в таблице.

Параметр	Сплавы на основе никеля	Керамические материалы на основе Al, Si, Ti, SiN, AlN	Композитные материалы на основе углерода	Композитное волокно SiC
Интервал рабочих температур, °С	1000	1500-2500	1400-1650	1400-1650
Предел прочности, МПа	800-1360	48-2000	33	1400-4500
Модуль упругости, ГПа	50	140-600	4,8	140-720
Теплопроводность, Вт/(мК)	11,2	0,05-300	80-240	Свыше 1200
Ключевые особенности	Сварные швы в ТА являются слабым звеном при термическом расширении	Дорогостоящее производство, сложная технология изготовления ТА	Короткий эксплуатационный ресурс	Относительно недорогое производство, доступность

В настоящее время большое внимание уделяется керамическим теплообменникам так как они стойки к высоким термическим нагрузкам, обладают хорошей теплопроводностью и стойки в агрессивных средах, что особенно важно, когда ГТУ работает на низкосортном топливе, так как выхлопные газы в этом случае содержат в большом количестве SO_2 и NO_x , которые вызывают коррозию у металлических сплавов.

Существует ряд проблем, с которыми сталкиваются при использовании керамических ТА, [5, 11]:

- Высокая стоимость производства керамических труб;
- Трудно получить длинные теплообменные трубки с требуемыми свойствами, так как современные технологии еще нуждаются в улучшении;
- Схема труба-в-трубе при использовании керамики не является абсолютно герметичной вследствие термических расширений;
- Коэффициент теплового расширения может меняться со временем вследствие реакции с некоторыми веществами, которые содержатся в выхлопе.
- Не до конца изучено поведение керамики в случае использования крупных теплообменников.

В заключении следует отметить, что высокотемпературные компактные теплообменники позволяют повысить эффективность цикла ГТУ за счет регенерации тепла выхлопных газов или создания на его основе комбинированных парогазовых установок. Это дает возможность снизить потребление топлива, что приводит к

положительному экономическому эффекту, а так же уменьшает вредное воздействие на окружающую среду, так же это способствует расширению области использования таких энергетических установок. Поэтому, несмотря на множество ограничений и специфические требования, накладываемые на теплообменные аппараты, они все чаще применяются для транспортных и стационарных установок. Следовательно, необходимо дальнейшее развитие и внедрение перспективных технологий в этой сфере.

Список литературы

- [1] Цанев С.В., Буров В.Д., Ремезов А.Н. Газотурбинные и парогазовые установки тепловых электростанций: учебное пособие для вузов / под ред. С.В. Цанева. М.: Издательство МЭИ, 2009. 584 с.
- [2] Каталог энергетического оборудования 2011 г. Т. 1. Каталог газотурбинного оборудования. Рыбинск: Издательский дом «Газотурбинные технологии», 2011. 392 с.
- [3] Kuppan Thulukkanam. Heat Exchanger Design Handbook, CRC Press, 2013.1186 p
- [4] Ganapathy V. Industrial Boilers and Heat Recovery Steam Generator. Design, Applications and Calculation, 2003. 618 p.
- [5] High Temperature Heat Exchangers Bent Sunden // 5th International Conference on Enhanced, Compact and Ultra-Compact Heat Exchangers: Science, Engineering and Technology: proc. NJ: Hoboken, 2005. P. 226–238.
- [6] T O'Doherty , A.J Jolly, C.J Bates. Analysis of a bayonet tube heat exchanger Applied Thermal Engineering Volume 21, Issue 1, 1 January 2001, P. 1–18. DOI: 10.1016/S1359-4311(99)00063-0.
- [7] Lee HoSung. Thermal Design: Heat Sinks, Thermoelectrics, Heat Pipes, Compact Heat Exchangers, and Solar Cells. John Wiley & Sons, Inc. 2011. 630 p.
- [8] Aquaro D., Pieve M. High Temperature Heat Exchangers for power plants: performance of advanced metallic recuperators // 5th International Conference on Enhanced, Compact and Ultra-Compact Heat Exchangers: Science, Engineering and Technology, At Whistler, BC, Canada, 2005. 246 p.
- [9] Hechanova A. High Temperature Heat Exchanger Annual Report. Las Vegas: University of Nevada, 2008. 38 p. DOI: 10.2172/944054.
- [10] Ткачев В.А., Федючук А.К., Калинина Н.Е. Изготовление паяных панелей теплообменников // Авиационно-космическая техника и технология. Научно-технический журнал. 2005. № 1. С. 5-11.

- [11] Vijaisri N. Numerical Study of a Novel Fin Configuration of a High Temperature Ceramic Plate Fin Heat Exchanger. Las Vegas: University of Nevada, 2014. 229 p.