

Разработка технических решений при утилизации теплоты отходящих газов газотурбинной установки

С.Ю. Лебедев, К.П. Гусева, И.А. Пуртова

Тюменский индустриальный университет (ТИУ), Тюмень

Аннотация: Объектом исследования является утилизационный теплообменный аппарат. Цель работы – разработать конструкцию теплообменного аппарата (ТА), используемого для утилизации теплоты отходящих газов газотурбинной установки (ГТУ), с увеличенной тепловой мощностью. В процессе работы проводился расчет и численное моделирование новой конструкции теплообменного аппарата. Результатом исследования стала конструкция газовоздушного теплообменного аппарата, требующая на 6,5 % меньше расхода теплоносителя (выхлопных газов) по сравнению с прототипом.

Ключевые слова: теплообменный аппарат, утилизация теплоты, энергоэффективность газотурбинной установки, численное моделирование, газовоздушный теплообменник.

Введение

Компримирование газа в магистральных газопроводах реализуется посредством применения компрессорных станций (КС), соединяющих участки трубопровода определенной длины. Давление в трубопроводе создается с помощью центробежных насосов, имеющих газотурбинный привод, и, установленных на КС. Главный недостаток газотурбинной установки (ГТУ) – низкий коэффициент полезного действия (КПД). Один из путей повышения КПД установки - использование теплоты отходящих газов, которое возможно через теплообменные аппараты (ТА).

Все ТА газотурбинных установок можно разделить на две группы: включенные и не включенные в цикл ГТУ. К включенным в цикл относятся регенераторы, возвращающие часть энергии воздуху, который поступает в камеру сгорания ГТУ. ТА, не включенные в цикл, используются в маслоохладителях, подогревателях воды, подогревателях топливного газа и др.

Несмотря на то, что ТА аппараты второй группы влияют на КПД ГТУ косвенно, они снижают расходы газа на надежное обеспечение ГТУ и КС.

Цель исследования – разработать конструкцию ТА, используемого для утилизации теплоты отходящих газов ГТУ, с увеличенной тепловой мощностью.

Анализ конструкций теплообменных аппаратов ГТУ, используемых для утилизации теплоты отходящих газов

В таблице 1 представлена классификация по характерным признакам существующих [1,2] и перспективных [3,4] теплообменных аппаратов для утилизации теплоты.

Таблица № 1

Классификация теплообменных аппаратов

	Поверхностного типа		Контактные
	регенеративные	рекуперативные	
Вид теплоносителя	Газ-газ, газ-воздух	Газ-газ, газ-жидкость, газ-воздух, жидкость-жидкость	Газ-жидкость
Схема движения теплоносителя	Прямоток, противоток	Прямоток, противоток, перекрестный ток	Прямоток, противоток, перекрестный ток
Поверхность теплообмена	Сетчатая, пористая, развитая ребристая, насыпная	Гладкотрубная, трубчато-ребристая, пластинчатая, пластинчато-ребристая	Гофрированные листы, решетки
Компоновка	Встроенные	Встроенные, выносные	Выносные
Назначение	Цикловые, вспомогательных систем	Цикловые, вспомогательных систем	Вспомогательные системы

Для различных типов ГТУ разработана унифицированная конструкция утилизационного теплообменника [5]. Отличие утилизаторов для различных

типов ГПА заключается в конструкции диффузора подвода и конфузора отвода дымовых газов.

Помимо ТА, используемых при утилизации теплоты отходящих газов ГТУ, существуют конструкции различных ТА, применяемых для других технологических целей [6,7]. Например, конструкции ТА судовых холодильников имеют плоские профилированные трубки [8].

Профилированные трубки с непрерывными каналами на наружной поверхности трубки, представляют собой мембранное оребрение, увеличивающее площадь тепловой поверхности. Использование таких трубок в судовых холодильниках позволило уменьшить их массогабаритные характеристики в 2-2,5 раза при сохранении тепловой мощности [8].

Анализ конструкций ТА показал:

1) Наиболее полно разработаны схемы и аппараты утилизации теплоты уходящих газов с использованием регенеративных ТА и газовойданных ТА для систем теплоснабжения.

2). Газовоздушные ТА перспективны для использования с ГТУ, установленными на КС, находящихся в районах Крайнего Севера, ввиду более простой эксплуатации.

3). Существенным недостатком газовоздушных ТА по сравнению с газовойдными ТА является их низкая тепловая мощность [9,10].

4) Применение плоских профилированных трубок в ТА холодильных установок позволяет значительно снизить их габариты, что говорит о высоком коэффициенте теплопередачи.

Проектирование теплообменного аппарата ГТУ с увеличенной тепловой мощностью

В качестве прототипа будет использоваться унифицированная конструкция утилизационного теплообменника (рис. 1) для

централизованного получения горячего воздуха, устанавливаемого в выхлопном устройстве ГПА-Ц-16 [10].

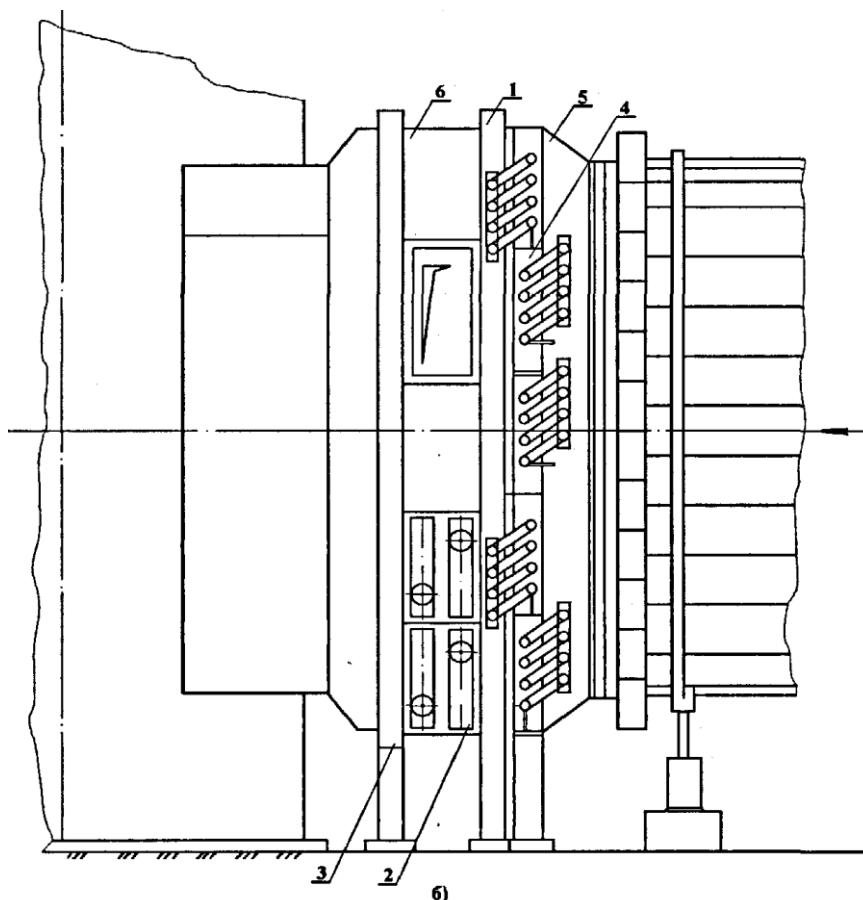


Рис. 1. – Прототип ТА:

1-воздушная секция; 2-водяная секция; 3-опоры

Исходя из задачи увеличения тепловой мощности при сохранении массогабаритных характеристик прототипа, используем профилированные эллиптические трубки с непрерывными каналами, задействуемые в судовых холодильниках, ввиду их эффективности. На рис. 2 представлена расчетная схема плоской трубки.

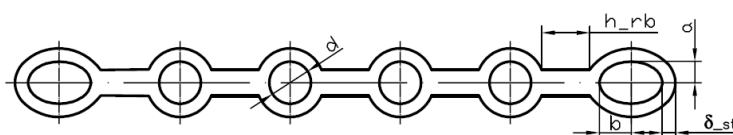


Рис. 2. – Расчетная схема трубки

На рис. 3 представлен алгоритм расчета ТА. Расчетные блоки алгоритма 1-4 выполняют теплофизический расчет ТА. Если расчетная мощность совпадает с мощностью ТА (блок 1), то выполняем аэродинамический расчет по газовому и воздушному трактам (блок 5), иначе изменяем расход выхлопных газов. Если при аэродинамическом расчете сопротивления не превышают допустимые, то ТА рассчитан, иначе изменяем число трубок в поперечном или продольном сечении и/или параметры плоской трубки. Также необходимо учитывать продольный и поперечный зазор между трубками, ввиду теплового расширения и возможности существования ТА (зазор должен быть больше нуля).

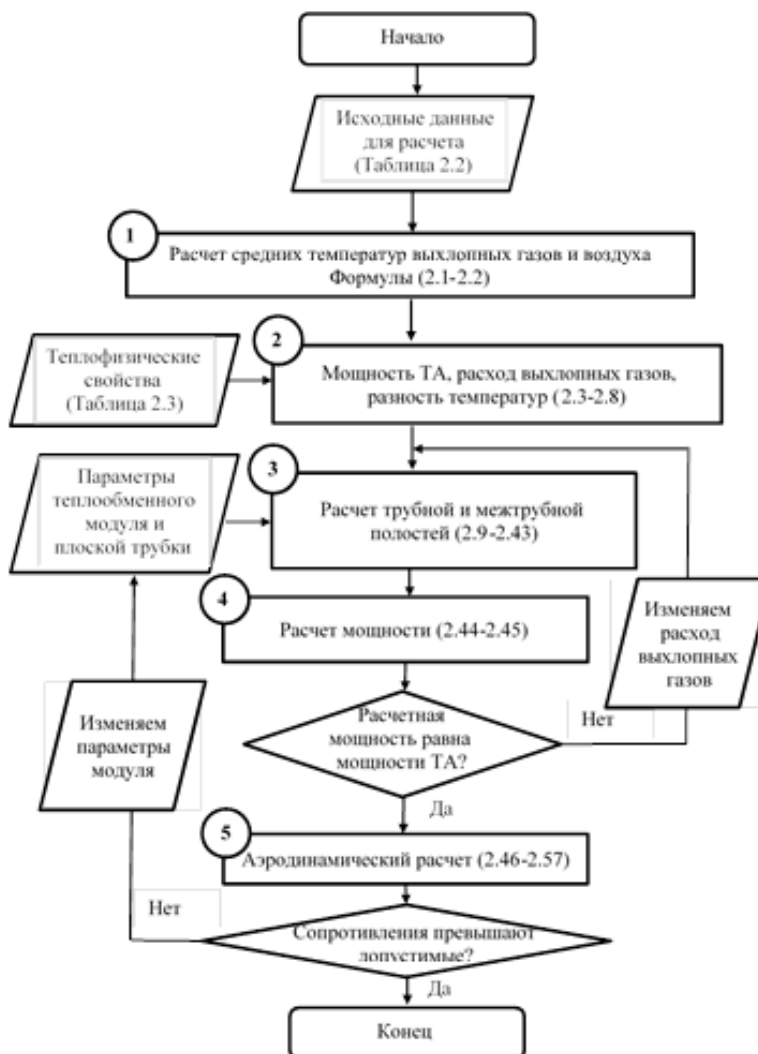


Рис. 3. – Алгоритм расчета ТА

Применение в алгоритме подбора расхода выхлопных газов вместо начальной температуры позволяет оценить эффективность ТА по сравнению с прототипом, т.к. снижение необходимого расхода выхлопных газов через ТА говорит о его более высокой мощности. Также сниженный расход уменьшает сопротивления течения выхлопных газов по выхлопному тракту, что положительно сказывается на работе ГТУ.

В таблице 2 представлены характеристики для полученного ТА с плоскими профилированными трубками и для прототипа с круглыми оребренными трубками.

Таблица № 2

Технические характеристики ТА

Показатель	ТА	Прототип
Количество теплообменных модулей	4	4
Площадь поверхности теплообмена, м ²	522	810
Теплопроизводительность теплообменника при развиваемой мощности ГПА $\bar{N} = 1$ и $T_{н.в.} = 233$ К, МВт	1,5	1,5
Коэффициент теплопередачи, Вт/м ² · °С	24,415	16,101
Максимальный расход выхлопных газов при развиваемой мощности ГПА $\bar{N} = 1$ и $T_{н.в.} = 233$ К, МВт	6,1	6,5
Расход воздуха, кг/с	11,3	11,3
Температура воздуха на выходе из теплообменника, К	383	383
Аэродинамическое сопротивление по газовому тракту, кПа	1,0	1,0
Аэродинамическое сопротивление по воздушному тракту, кПа	1,2	0,7

По результатам расчетов, полученный ТА позволяет снизить необходимый расход выхлопных газов на 6,15 %, сохранив при этом его габаритные характеристики. Коэффициент теплопередачи увеличен на 51,6 %, сопротивление по воздушному тракту увеличилось на 70 %, сопротивление по газовому тракту удалось сохранить прежним.

Выводы

1. Были рассмотрены основные конструкции ТА, используемых для утилизации теплоты выхлопных газов ГТУ.

2. В качестве технического решения был выбран прототип ТА и определен вид модернизации: замена круглых оребренных трубок на плоские профилированные трубки сложной формы. Для предложенного решения была разработана методика расчета и алгоритм действий при проектировании ТА.

3. Рассчитанный по предложенной методике ТА требует для нагрева потока воздуха до 110°C поток выхлопных газов с расходом 6,1 кг/с, что меньше, чем у прототипа на 6,15 %.

Литература

1. Земенков Ю.Д. Тепломассообменное оборудование и тепловые процессы в системах транспорта и хранения нефти и газа: учебник для студентов ВУЗов; ТюмГНГУ. - Тюмень : ТюмГНГУ, 2015. - 175 с.
2. Пиралишвили Ш.А., Веретенников С.В. Энергосберегающие технологии утилизации тепла уходящих газов приводных ГТУ: Монография. – М.: Машиностроение, 2011. – 214 с.
3. Богуслаев В.А., Горбачев П.А., Кононенко П.И., Михайлуца В.Г. Пат. 2377427 Российская Федерация, МПК F02C6/18. Способ утилизации тепла выхлопных газов газотурбинных приводов газоперекачивающих

- агрегатов компрессорной станции и устройство для его осуществления.
опубл. 27.12.2009.
4. Половников Е.В., Бородин Д.М., Конев В.В. Разработка и модернизация систем прогрева гидропривода и двигателя строительных машин // Проблемы, перспективы и направления инновационного развития науки, 2016. – С. 56-59.
 5. Каталог утилизационных теплообменников ГПА Союзгазпроект. - Киев, 1983. – С. 3-15.
 6. Khaliulin, R.R., Sychenkov V.A., Panchenko V.I. Development of the Technique for Calculating the Ejectors with Low Entrainment Ratios // Russian Aeronautics, 2018, V. 61 (1), pp. 64–70.
 7. Hakan F. Oztop. Natural convection in wavy enclosures with volumetric heat sources // International Journal of Thermal Sciences, 2011, Vol. 50 (4). – pp. 502–514.
 8. Науменко А.В. Разработка конструкции и технологии изготовления компактных теплообменных аппаратов с профилированными трубками для морской техники: автореф. дис ... канд. техн. наук. 05.08.04; СПб, 2019. С. 195.
 9. Зинина С.А., Попов А.И., Брагин Д.М., Еремин А.В. Исследование процесса теплопереноса в тепловыделяющем элементе цилиндрической формы // Инженерный вестник Дона, 2021, №8. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n8y2021/7154.
 10. Грачева Д.А., Ефремова Т.В. Организация воздухообмена в газифицируемых помещениях жилых домов и зависимость диаметров вентиляционных каналов от объемов этих помещений // Инженерный вестник Дона, 2021, №9. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n9y2021/7204.
-

References

1. Zemenkov Yu.D. Teplomassoobmennoe oborudovanie i teplovye protsessy v si-stemakh transporta i khraneniya nefti i gaza: uchebnik dlya studentov VUZov [Heat and Mass Transfer Equipment and Thermal Processes in Oil and Gas Transportation and Storage Systems: A Textbook for University Students]; TyumGNGU. Tyumen': TyumGNGU, 2015. 175 p.
2. Piralishvili Sh.A., Veretennikov S.V. Energoberegayushchie tekhnologii utilizatsii tepla ukhodyashchikh gazov privodnykh GTU: Monografiya [Energy-saving technologies for heat recovery of exhaust gases of drive gas turbines: Monograph]. M.: Mashinostroenie, 2011. 214 p.
3. Boguslaev V.A., Gorbachev P.A., Kononenko P.I., Mikhailutsa V.G. Pat. 2377427 Rossiyskaya Federatsiya, MPK F02C6/18. Sposob utilizatsii tepla vykhlopnykh gazov gazoturbinykh privodov gazoperekachivayushchikh agregatov kompressornoy stantsii i ustroystvo dlya ego osushchestvleniya [Method for utilizing heat from exhaust gases of gas turbine drives of gas-pumping units of a compressor station and a device for its implementation]. Opubl. 27.12.2009.
4. Polovnikov, E.V. Borodin D.M., Konev V.V. 2016. pp. 56-59.
5. Katalog utilizatsionnykh teploobmennikov GPA [Catalog of waste heat exchangers for gas compressor units]. Soyuzgazproekt. Kiev, 1983. pp. 3-15.
6. Khaliulin, R.R., Sychenkov V.A., Panchenko V.I. Russian Aeronautics, 2018, V. 61 (1), pp. 64–70.
7. Hakan F. Oztop. 2011, Vol. 50 (4). pp. 502–514.
8. Naumenko A.V. Razrabotka konstruksii i tekhnologii izgotovleniya kompaktnykh teploobmennykh apparatov s profilirovannymi trubkami dlya morskoy tekhniki [Development of the design and manufacturing technology of compact heat exchangers with profiled tubes for marine equipment]: avtoref. dis ... kand. tekhn. nauk. 05.08.04; SPb, 2019. p. 195.



9. Zinina S.A., Popov A.I., Bragin D.M., Eremin A.V. Inzhenernyj vestnik Dona, 2021, №8. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n8y2021/7154
10. Gracheva D.A., Efremova T.V. Inzhenernyj vestnik Dona, 2021, №9. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n9y2021/7204