

## **ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ АППАРАТЫ И РАЗРАБОТКА НОВЫХ ЭФФЕКТИВНЫХ РЕГЕНЕРАТОРОВ ГПА ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ К.П.Д. И УТИЛИЗАЦИЯ ВЫСОКОПОТЕНЦИАЛЬНОЙ ТЕПЛОТЫ С ЦЕЛЮ СНИЖЕНИЯ ВЫБРОСОВ В АТМОСФЕРУ**

Проведен литературный обзор используемых регенераторов в компрессорных станциях России и Казахстана. Показаны преимущества и недостатки их. На основе анализа и научных исследований процессов в теплообменных аппаратах предложена новая конструкция высокоэффективного регенератора. Также показаны пути утилизации теплоты уходящих газов ( $t_r = 500^\circ\text{C}$ ) с использованием регенераторов и уменьшения выбросов в окружающую среду.

Последние десятилетия характеризуются значительным развитием газотурбостроения во всем мире. Непрерывное, быстрое развитие газотурбинных установок, расширение областей их применения, повышение параметров, совершенствование узлов и изменение их схем требуют в настоящее время особо обращать внимание на охрану окружающей среды с точки зрения выбросов вредных веществ. За выбросы в окружающую среду теплоты с горячим газом предусматриваются значительные штрафные санкции со стороны госкомэкологии.

Основные источники загрязнения приземного слоя атмосферы при трубопроводном транспорте газа – аварийные выбросы газа при отказах линейной части магистральных газопроводов и выбросы при проведении технологических операций (пуск и остановка ГПА, продувка пылеуловителей и т.д.), а также продукты сгорания ГПА. Самопроизвольное возгорание газа при повреждении линейной части является, хотя редким и временным, но мощным источником за-грязнения атмосферы.

На компрессорных станциях (КС) магистральных газопроводов (МГ) основным источником

загрязнения являются газоперекачивающие агрегаты (ГПА), в выхлопных газах которых содержатся окислы азота и углерода. Так, один агрегат типа ГТК-10-4 за год выбрасывает свыше 750 тонн вредных веществ. Через свечи турбодетандеров, нагнетателей, газосепараторов и АВО газа выбрасывается природный газ общей массой около 200–250 тонн в год на один цех.

Магистральные газопроводы служат основными потребителями стационарных газотурбинных установок (ГТУ), и совершенствование конструкций и параметров ГТУ для привода нагнетателей природного газа наиболее целесообразно проводить по общеизвестным трем основным направлениям и их возможным сочетаниям.

Одним из наиболее эффективных методов повышения эффективности ГТУ для компрессорных станций (КС) является исследование и разработка технических решений по повышению эффективности теплообменников газоперекачивающих агрегатов (ГПА).

Температура газа на выходе из турбины второй ступени ГТК-10-4 имеет довольно высокое значение  $t_r=500^\circ\text{C}$  и выброс такого высокопотенциального газа в атмосферу приводит к снижению к.п.д. ГТУ и ухудшает экологическую обстановку на компрессорных станциях магистрального газопровода [1–3]. За выбросы в окружающую среду теплоты с горячим газом предусматриваются штрафные санкции со стороны госкомэкологии.

Поэтому для повышения общего к.п.д. ГПА в схему включают регенератор, который подогревает воздух, что улучшает процесс горения топлива из-за повышения температуры смеси и существенно экономит расход топлива.

Эффективность регенератора оценивают часто степенью регенерации  $z_r$ , которая представляет собой отношение действительного подогрева воздуха к предельному, т. е.

$$z_r = (T_p - T_k) / (T_{т-} - T_k)$$

и в открытых ГТУ, работающих на воздухе и продуктах сгорания углеводородных топлив, характеризует поверхность, размеры и гидравлическое сопротивление регенератора.

Включение регенераторов в цикл газовой турбины относится к так называемым средствам Карно, под этим понимаются такие вмешательства в реальный рабочий цикл, которые ведут к его

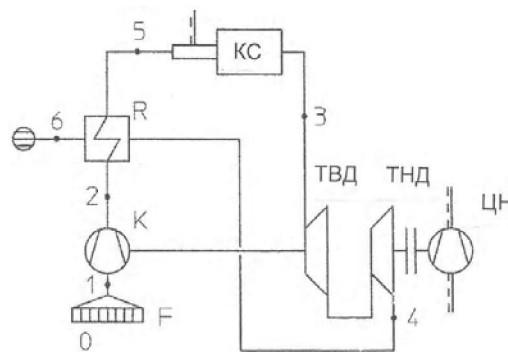


Рис. 1. Схема рабочего цикла с регенерацией тепла

F – воздушный фильтр, К – компрессор, R – регенератор, KC – камера сгорания, ТВД – турбина высокого давления, ТНД – турбина низкого давления, ЦН – центробежный нагнетатель

конвергенции к циклу Карно, т. е., таким образом, и к увеличению его термического к.п.д. Схема рабочего цикла с регенерацией тепла приведена на рис. 1. Очевидно, что рабочий цикл с регенерацией получим из простого рабочего цикла путем включения теплообменника, в котором сжатый воздух подогревается (2–5) теплом, переданным от отработанных продуктов сгорания (4–6). При этом уменьшится подвод тепла к циклу (5–3), из-за чего возрастет его термический к.п.д.  $z_r$  и снизится удельный расход тепла  $q_t = 1 / z_r$ .

Регенераторы, поставляемые фирмой ЕКОЛ (Чехия), достигают (при длине трубок  $L = 5$  м) к.п.д. регенерации  $z_r = 0,80$ .

С другой стороны, включение регенераторов в простой рабочий цикл газовой турбины повышает его потери давления как на стороне воздуха, так и на стороне продуктов сгорания, что негативно влияет как на муфтовую мощность, так и на удельное потребление тепла газовой турбины. Существенным результатом, по сравнению с простым рабочим циклом, является относительно небольшое снижение муфтовой мощности и значительное повышение термического к.п.д., т.е. снижение удельного потребления тепла.

Обозначив величины, относящиеся к работе с регенератором, звездочкой, экономию топлива для данной мощности  $P_{sp}$  можно рассчитать при помощи уравнения:

$$\Delta m_p = m_p - m_p^* = m_p \left( 1 - \frac{m_p^*}{m_p} \right) = \frac{P_{sp}}{\eta_t H_U} \left( 1 - \frac{\eta_t}{\eta_t^*} \right). \quad (1)$$

Экономия топлива в единицах [Нм<sup>3</sup>/ч] получим из уравнения:

$$\Delta V_p \text{ [Нм}^3\text{/ч]} = \frac{\Delta m_p \text{ [кг/сек]}}{\rho_N \text{ [кг/Нм}^3\text{]}} \cdot 3600, \quad (2)$$

где  $H_U = 48730$  кДж/кг – обозначает низшую теплоту сгорания топлива,  $\rho_N = 0,7351$  кг/Нм<sup>3</sup> – удельная масса топлива при нормальных условиях 0°C и 101325 Па.

В техническом исполнении используются различные виды и типы регенераторов. Известны регенераторы ГТУ фирм «Броун-Бовери», «Метрополитен-Виккерс», «British Thompson Houston», «Роллс-Ройс», «Зульцер», и заводов НЗЛ, ЛМЗ, «Подольский машиностроительный завод», «ОРМА», «НПЦ Анод-Центр» и др.

Пластинчатый регенератор ГТУ является одним из самых эффективных оборудований в части теплообмена, и степень регенерации  $\xi_r$  достигает до 0,92. Однако для пластинчатых регенераторов характерен ряд недостатков. Достаточно сложна технология изготовления, а затем при сборке пакетов тяжело обеспечить высокую герметичность большого числа сварных швов, дорогостоящий материал (нержавеющая сталь – 1Х18Н9Т). При эксплуатации образуются трещины, т.е. теряется герметичность воздушного тракта регенератора. Попытки устранить неплотности с помощью заварки не дают ощутимого положительного результата. Качественная чистка каналов между пластинами также практически невозможна.

Тем не менее, на основе профильных листов в НЗЛ был сконструирован ряд пластинчатых регенераторов.

Трубчатые регенераторы при относительной конструктивно-технологической простоте имеют два существенных недостатка: у них слишком большие масса (до 198 т) и габариты (длина трубок до 7 м).

Особенно значим для агрегатов ГТУ типа ГТК-10-4 вопрос замены низко надежных и неремонтопригодных пластинчатых регенераторов на теплообменники, обеспечивающие не меньшую степень регенерации, чем штатные, и позволяющие, по своим массогабаритным показателям, установить их на существующие фундаменты без демонтажа и переноса дымовых труб, то есть модернизация регенеративных ГТУ в

части конструкции рекуператоров становится весьма актуальной.

Тем временем развитие трубчатых регенераторов не прекращалось и за рубежом, и в России. Имеется трубчатый регенератор фирмы GEA (ФРГ), послуживший прототипом для многих аналогичных устройств.

По данным фирмы GEA, один из построенных ею регенераторов проработал без повреждений в составе энергетической ГТУ на тепловой электростанции в течение 20 лет при наработке около 85 000 ч и 5 500 пусках, требуя лишь текущего периодического контроля герметичности, что, безусловно, является отличным показателем. Такого рода регенераторы успешно применены фирмой на десятках ГТУ.

Подольский машиностроительный завод разработал серию трубчатых регенераторов для модернизации газоперекачивающих агрегатов путем замены пластинчатых на трубчатые: РВП-4600, РВП-3600-02, РВП-2400, РГУ-1800, РГУ-1800-1.

Трубчатый регенератор разработки фирмы Nuovo Pignone, имеющий значительно меньшую массу, предназначен для модернизации импортных газоперекачивающих агрегатов ГТК-25И путем перевода их с простого цикла на регенеративный.

Известен трубчатый регенератор ТНМ1304R разработки фирмы MAN GHH, и, несмотря на значительную абсолютную ее массу, по удельной массе он сопоставимы с пластинчатыми регенераторами или даже эффективнее их. Таким образом, с учетом того, что трубчатые регенераторы имеют меньшую конструктивно-технологическую сложность и большую надежность, они перспективны для использования в новых ГТУ.

Надежность, экологичность и экономичность единой системы газопроводов во многом зависят от технического состояния компрессорных станций [2]. Это прежде всего относится к энергоемкому парку ГПА. Их эффективность на КС Казахстана невысока. Значительная часть этого парка уже выработала свой назначенный ресурс. КПД ГПА типа ГТК-10-4 составляет 20–21 % при мощности 0,6–0,7 от номинального значения. Все это приводит к росту затрат при транспортировке газа. Однако замена существующих агрегатов на ГПА нового поколения требует привлечения огромных финансовых ресурсов.

Поэтому необходим дифференцированный подход к решению проблемы продления ресурса и восстановления показателей энергооборудования и уменьшения выбросов тепла в атмосферу.

Установлено, что пластинчатые теплообменники, которыми оснащены регенеративные агрегаты, не обладают ресурсом, равным ресурсу ГПА. Фактически после 40 тыс. ч наработки они имеют утечки циклового воздуха свыше 5–10 %, делающие агрегат практически неработоспособным. Мощность ГТУ снижается на 30–50 % по сравнению с проектной. Заварка трещин пластинчатых воздухоподогревателей показал, что эффект от ремонта сохраняется не более чем на 1000–1500 ч, причем полностью устранить утечки даже на этот период не удается. В связи с этим одним из направлений модернизации ГТК-10-4 с целью восстановления и улучшения технических характеристик является замена пластинчатых ВП более надежными трубчатыми [4].

Трубчатые ВПТ менее чувствительны к термическим нагрузкам, возникающим при пуске, останове и переходных режимах работы ГТУ, а также способны обеспечить надежную работу ВПТ при высоких температурах и давлениях рабочих сред.

ЗАО «ОРМА» был создан воздухоподогреватель трубчатого типа, реализованный в модульном исполнении [5]. Термоэластичность ВПТ достигается за счет использования U-образных тонкостенных труб. Масса типового модуля ВПТ-1400 около 5 т (степень регенерации 0,72); это облегчает транспортировку и не требует привлечения тяжелого подъемно-транспортного оборудования при монтаже.

Разработкой энергетических и промышленных ГТУ нового поколения страны Европы и Америки активно начали заниматься с начала девяностых годов. НИР и ОКР проводился по нескольким направлениям, причем наиболее крупные компании-производители (ABB, Siemens, General Elektrik, Mitsubishi, Sjllag и др.) координировали свои действия. В США и странах Европы эти работы курируются в рамках правительственных программ и получают мощную финансовую поддержку.

В результате этого был совершен качественный скачок по повышению надежности и КПД установок, а также снижение тепловых и химических выбросов новых зарубежных ГТУ. Россия за

последние годы перестройки в целом сильно отстала в разработке газотурбинных установок нового поколения, но по некоторым позициям еще может предложить достаточно конкурентоспособные разработки.

ООО «Анод-Теплообменный Центр» предложена новая конструкция теплообменной поверхности из змеевиков с малым радиусомгиба (РГ10-БМ5.00.00 для ГТК-10-4), которая по своим показателям качества значительно превосходит применяемые в настоящее время прямотрубные, пластинчатые и обычные змеевиковые.

Данный регенератор имеет следующие преимущества: интенсивный теплообмен; высокий коэффициент регенерации; оптимальное гидравлическое сопротивление; высокая компактность при использовании труб небольшого типоразмера, объединенных в модули (рис. 2); самокомпенсация змеевиков при температурных расширениях; высокий коэффициент регенерации.



Рис. 2. Модуль регенератора

Для подтверждения технических характеристик регенератора ООО «Анод-Теплообменный Центр» нами было проведено совместное испытание опытного образца регенератора РГ-10БМ5 на Фроловском ЛПУ МГ ООО «Волгоградтрансгаз». Результаты испытаний показали, что регенератор РГ-10БМ5 имеет лучшие характеристики по сравнению с трубчатым теплообменником.

Из данных следует, что степень регенерации у теплообменника «АНОД-ЦЕНТР» выше, чем у «ОРМА». Также по массогабаритным характеристикам лучшие показатели у «АНОД-ЦЕНТР». Суммарные потери давления на 0,5% ниже у «ОРМА». Регенератор «АНОД-ЦЕНТР» изго-

тавливает из нержавеющей стали (X18H10T), следовательно, стоимость выше, однако моторесурс высок. Следует заметить, что в настоящее время регенераторы «ОРМА» имеют более широкое применение на КС магистрального газопровода России и Казахстана.

Результаты расчетных экспериментальных исследований и промышленных испытаний регенераторов использованы в ЗАО «Интергаз Центральная Азия» в качестве рекомендаций при реконструкции и модернизации существующих теплообменных аппаратов ВПТ-2000.

В основу процессов расчета конвективного теплообмена в элементах поверхностей теплообмена положены данные обширных экспериментальных исследований теплообмена [6, 7] на специальных моделях и натуральных объектах, обработанные на основе теории подобия и представленные в виде критериальных уравнений типа:

$$Nu = f(Re, Gr, Pr, l/d, T_c/T_{ж}). \quad (3)$$

Помимо уравнений подобия для расчета теплоотдачи в каналах необходимы уравнения подобия, с помощью которых можно оценить эффект интенсификации теплоотдачи, достигнутой благодаря применению змеевиков, каналов сложной формы, искусственных турбулизаторов, разрушающих или возмущающих пограничный слой [6–8].

Эмпирические уравнения, обобщающие опыты отечественных и зарубежных исследователей, универсальны, хотя для описания теплоотдачи используются уравнения для гладких труб, но скорость потока рассчитывается в сечении, площадь которого зависит от геометрии завихрителя.

Уравнения подобия для определения среднего по длине канала коэффициента теплоотдачи  $b$  в змеевиках имеют вид:

Так, например, для спиральных змеевиков при ламинарном течении с макровихрями

при  $Re = 100 \dots Re_{кр}$ , для воды, масла, воздуха,  $t = t_p$ ,  $l = d_{вн}$

$$Nu = 3,65 + 0,08 [1 + 0,8 (D_{3м} / d_{вн})^{-0,9}] Pr^{1/3} Re^{0,5} + 0,2903 (D_{3м} / d_{вн})^{-0,194}, \quad (4)$$

$$Re_{кр} = 2300 [1 + 8,6 (d_{вн} / D_{3м})^{0,45}].$$

Для спиральных змеевиков при турбулентном течении с макровихрями

при  $Re = 8 \cdot 10^3 \dots 7 \cdot 10^4$ ;  $(D_{3м} / d_{вн}) = 6,2 \dots 104$

$$\text{и } t = t_f; l = d_{вн}$$

$$Nu = 0,0266 Pr^{0,4} [Re^{0,85} (D_{3м} / d_{вн})^{-0,15} + 0,225 (D_{3м} / d_{вн})^{1,55}]. \quad (5)$$

Результаты расчетов показывают, что теплоотдача на газовой стороне в змеевиковых регенераторах меньше, чем на воздушной стороне, то есть нужно конструировать теплообменник с большим значением  $b_f$ . Это можно достигнуть при высоких значениях  $Re_f$  и при использовании трубок с высокой шероховатостью.

В то же время гидравлическое сопротивление при течении воздуха внутри труб больше гидравлического сопротивления при течении газа в межтрубном пространстве. Поэтому необходимо использование труб большего диаметра для навивки змеевиков с более плотной упаковкой, т. е. с меньшим проходным сечением межтрубного пространства при одних и тех же значениях среднего диаметра навивки  $D_{ср}$ .

На основе анализа и научных исследований процессов в теплообменных аппаратах, используемых на компрессорных станциях магистрального газопровода Казахстана и России, на базе

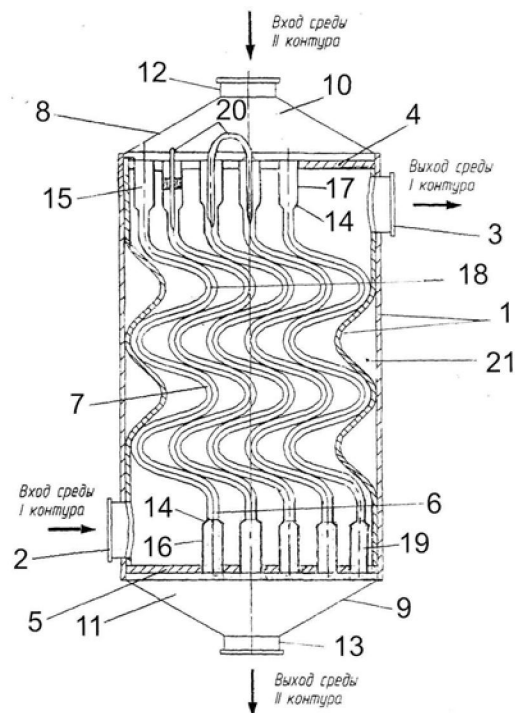


Рис. 3. Общий вид теплообменного аппарата

промышленных испытаний опытного образца регенератора РГ-10БМ5 и статистических данных действующих регенераторов с учетом их недостатков и особенностей эксплуатации нами предложена новая конструкция теплообменника (рис. 3).

Энергетическая эффективность достигается за счет преобразования спирально витого змеевика теплообменника – трубы постоянного геометрического сечения – по ее длине в трубу Вентури, что приводит к росту скорости протекания среды, по всей длине змеевика и повышает интенсивность теплообмена, по сравнению с известными устройствами.

Готовность предлагаемого теплообменного аппарата к использованию высока, и он принят заводом «Сервисный Центр «КазТурбоРемонт» (г. Атырау) на изготовление и производственное испытание.

Предложенный новый высокоэффективный регенератор повышает общий к.п.д. ГПА, снижает выбросы тепла в атмосферу и улучшает экологическую ситуацию в регионе.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Щуровский В.А. Новое поколение ГТУ для магистральных газопроводов // Газотурбинные технологии. 1999. № 4. С. 8-13.
2. Ремизов В.В., Седых А.Д., Вольский Э.Л. и др. Основные направления научно-технической политики РАО «Газпром» // Газовая промышленность. 1998. № 5. С. 4-5.
3. Игнатьев Е.А., Походяев С.Б. Повышение надежности теплообменного оборудования для ГТУ. Компрессорная техника и пневматика. 1997. X°16-17. С. 122-125.

4. Кузнецов Е.Ф. Сравнительная оценка массы различных конструкций воздухоподогревателей ГТУ // Турбины и компрессоры. 2002. № 1, 2. С. 12-20.

5. Орберг А.Н., Виноградов В.В., Третьяков С.И. Модульный воздухоподогреватель для ГТК-10-4 // Газовая промышленность. 2001. №5. С. 78-79.

6. Справочник по теплообменникам. В 2-х т. / Пер с англ. / Под ред. Б. С. Петухова и В. К. Шикова. М.: Энергоатомиздат, 1987. Т. 1. 560 с; Т. 2. 352 с.

7. Тепло- и массообмен. Теплотехнический эксперимент: Справочник. М.: Энергоиздат, 1982. 510 с.

8. Теплообмен и гидродинамика в каналах сложной формы / Ю. И. Данилов, Б. В. Дзюбенко, Г. А. Дрейцер и др. М.: Машиностроение, 1986. 200 с.

#### Резюме

Россия мен Қазақстандағы компрессор станцияларында пайдаланып жатқан регенераторларға ғылыми-техникалық шолу жасалған. Олардың артықшылығы мен кемшіліктері көрсетілген. Анализ жасау және жылу-алмасқыш аппараттарындағы процестерді ғылыми зерттеу негізінде жаңа құрылымды, тиімділігі жоғары регенератор ұсынылды. Тағы да, шығып жатқан газдардың ( $t_r = 500\text{ }^\circ\text{C}$ ) жылулығын регенератор қолдану арқылы кәдеге жарату жолдары және сырт ортаға кетіп жатқан жылулықтарды азайту жолдары көрсетілген.

#### Summary

In clause the literary review of used regenerations in compressor of Russia and Kazakhstan is lead. Advantages and their lacks are shown. On the basis of the analysis and scientific researches of processes in heat change devices the new design of a highly effective regenerator is offered. Also ways of recycling of heat of leaving gases ( $t = 500\text{ }^\circ\text{C}$ ) with use of regenerator and reduction of emissions of heat in an environment are shown.

УДК 621.565.93  
622.691(692)

«Сервисный Центр «КазТурбоРемонт»,

г. Астана

Поступила 28.04.09г.