

3. Кузнецов, В. В. Проектирование теплообменных аппаратов для ГТУ сложных циклов [Текст] / В.В. Кузнецов, Д.Н. Соломонюк // Вісник НТУ „ХПІ”. Збірник наук.праць. – Харків: НТУ „ХПІ”. – 2008.-№35. -С.78-88.
4. Калинин, Э. К. Интенсификация теплообмена в каналах [Текст] / Э. К. Калинин, Г. А. Дрейцер, С. А. Ярхо. – М.: Машиностроение, 1990. – 208 с.
5. Кузнецов, В. В. Оптимизация массогабаритных показателей регенераторов ГТУ [Текст] / В.В. Кузнецов, Д.Н. Соломонюк// Восточно - Европейский журнал передовых технологий 4/6(40), 2009. – С.48–52.
6. Халатов А. А. Теория и практика закрученных потоков [Текст] / А. А. Халатов - К.: Наукова Думка, 1989.- 200 с.
7. Халатов А. А. Теплообмен и гидродинамика в полях центробежных массовых сил в 9 т. [Текст]/ А. А. Халатов, А. А. Авраменко, И. В. Шевчук. – К.: Изд. Ин-та технической теплофизики НАН Украины, 2010 – Т. 9: Теплообмен и гидродинамика при циклонном охлаждении лопаток газовых турбин . – 2010. -317 с.
8. Кузнецов, В. В. Теплоотдача при закрутке потока внутри трубчатых каналов теплообменных аппаратов газотурбинных установок [Электронный ресурс] / В.В. Кузнецов, С.Н. Мовчан, В.И. Романов, А.П. Шевцов // Електронне видання Вісник НУК, Зб. наук. праць - Миколаїв: НУК, 2011. – № 4.
9. Кузнецов, В. В. Представление и обобщение экспериментальных исследований теплоотдачи при закрутке потока внутри трубчатых каналов элементов газотурбинной установки [Текст] / В.В. Кузнецов, С.Н. Мовчан, В.И. Романов, А.П. Шевцов // Зб. наук. праць НУК – Миколаїв: НУК, 2011. – № 5. С. 69-75

Наведено результати досліджень аеродинамічних та теплообмінних процесів у камері згорання газотурбінної установки (ГТУ) з пальниковою системою, виготовленою на основі використання трубчастої технології газоспалювання (ТТГ). Показано комплекс переваг трубчастих пальникових систем для забезпечення якісного сумішоутворення та високого рівня рівномірності полей швидкості і температур у процесі спалювання суміші. Доведено можливість створення малоемісійної камери згорання для ГТУ будь-якої потужності

Ключеві слова: камера згорання, трубчаста технологія газоспалювання, комплексні переваги сумішоутворення, згорання

Рассмотрены особенности тепловых и аэродинамических характеристик камер сгорания ГТУ с горелочной системой, изготовленной на основе применения трубчатой технологии газосжигания (ТТГ). Анализируются преимущества трубчатых горелочных систем для обеспечения качественного смесеобразования и высокого уровня равномерности полей скоростей и температур при сжигании топливной смеси. Показана возможность создания малоэмиссионной камеры сгорания для ГТУ любой мощности

Ключевые слова: камера сгорания, трубчатая технология газосжигания, комплексные преимущества смесеобразования, горения

УДК 621.43.056

АЭРОДИНАМИЧЕСКИЕ И ТЕПЛОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КАМЕР СГОРАНИЯ ГТУ С ГОРЕЛОЧНОЙ СИСТЕМОЙ ТРУБЧАТОГО ТИПА

Г. Б. Варламов

Доктор технических наук, профессор, проректор*

E-mail: varlamov@kpi.ua

А. А. Халатов

Доктор технических наук, профессор, академик

Национальной академии наук Украины, заведующий кафедрой

Кафедра «Физика энергетических систем»

Физико-технический институт*

пр-т Победы, 37, г. Киев, Украина, 03056

E-mail: Artem.Khalatov@vortex.org.ua

*Национальный технический университет Украины

«Киевский политехнический институт»

1. Введение

Современное развитие промышленных секторов экономики различных стран часто сталкивается с проблемой надежного и постоянного энергообеспечения. Чаще всего это относится к промышленным комплексам или отдельным предприятиям отечественных или международных корпораций, которые развиваются самостоятельно и строят свои объекты в странах с минимальным

налогообложением и нуждаются в увеличении потребляемой тепловой и электрической мощности.

В решении вопроса энергообеспечения предприятий корпорации все чаще используют газотурбинные установки (ГТУ) или тепловые схемы с использованием этих высокотехнологических агрегатов. Для Украины основными объектами с широким использованием газотурбинных установок являются компрессорные станции (КС) газотранспортной системы (ГТС), где

они применяются для привода газоперекачивающих агрегатов (ГПА), металлургия и энергетика. В последнее время к этим агрегатам предъявляются особые требования по надежности эксплуатации, экономичности и экологичности [1, 2]. При этом ведущую роль в обеспечении этих показателей играют камеры сгорания, которые являются наиболее теплонапряженным элементом камеры сгорания.

В статье рассмотрены результаты анализа аэродинамических и тепловых характеристик в камере сгорания газотурбинных установок (ГТУ) с горелочной системой, выполненной на основе трубчатой технологии сжигания газа (ТТГ) [3, 4].

2. Постановка проблемы в общем виде

Для каждого типа ГТУ предприятия-изготовители используют различные способы, методы и конструктивные особенности жаровой трубы и горелочного устройства для снижения концентрации оксидов азота NO_x и оксида углерода CO в выхлопных газах [1].

Камеры сгорания ГТУ различных производителей сильно отличаются друг от друга даже для одинаковой мощности и достигнутых значений эмиссии NO_x и CO . Тиражирование ГТУ по мощности за счет использования одинаковой (или подобной) конструкции отработанных горелочных не надежно в связи с непредсказуемостью процесса смешения и сжигания в горелочных системах регистрового, форкамерного и другого типа.

Ведущие мировые производители в области газотурбостроения, такие как General Electric, Siemens, Solar Turbines, Rolls-Royce, Mitsubishi в жесткой конкуренции идут по пути создания и внедрения собственных систем смесеобразования и сжигания топливо-воздушной смеси в камерах сгорания, которые характеризуются высокой сложностью. Это осуществляется с целью монополизации разработки и обеспечения невозможности копирования разработки конкурирующими фирмами, т.е. для обеспечения монополярной защищенности [4, 5].

Это значительно повышает стоимость конструкции, усложняет ее эксплуатацию и требует даже при относительно простых профилактических операциях и ремонтах присутствия представителя завода-разработчика, что удорожает ремонт и приводит к увеличению его срока. Эти обстоятельства не только увеличивают эксплуатационные расходы, но и «привязывают» пользователей ГТУ к заводам-изготовителям на длительное время, т.е. обременяют первых наличием неэффективных и затратных связей. Особенно заметно это проявляется в том случае, если используются ГТУ иностранного производства. Вопрос ремонтнопригодности и взаимозаменяемости является проблемным для всех элементов ГТУ, но особенно остро он стоит для камер сгорания.

В связи с этим особенно актуальным является вопрос создания универсальных и тиражируемых по мощности технологий сжигания топлива и камер сгорания с низким уровнем эмиссии вредных и парниковых газов, что позволит в период эксплуатации и ремонта ГТУ освободиться от поставок зарубежных фирм-производителей газотурбинной техники. Это также позволит создать условия для распространения этих технологий на другие энергетические установки [6-8].

3. Предпосылки создания и особенности трубчатой технологии газосжигания (ТТГ)

Украина относится к немногочисленным странам, обладающим высокотехнологическим оборудованием по производству ГТУ. Поэтому для страны важно развивать свои отечественные технологии в газотурбостроении, способствующие увеличению конкурентоспособности выпускаемых газотурбинных двигателей (ГТД) с обеспечением высокой эффективности, экологической безопасности и экономической привлекательности.

Отсутствие механизмов эффективной мотивации разработки инновационных отечественных технологий в процессах конструирования и производства ГТУ не позволяет заводам-изготовителям газотурбинной техники мобильно реагировать на запросы рынка и вести постоянную научно-исследовательскую и проектно-конструкторскую работу в этом направлении. Не ведутся также систематические научные работы и по фундаментальным и прикладным задачам газотурбостроения.

Стереотип действия новых руководителей отечественных заводов-производителей ГТУ базируется на принципе максимальной прибыли при минимальных затратах. На коротком отрезке времени для специфических условий под воздействием внутренних и внешних факторов эта стратегия оправдана. Однако на длительный период времени такая стратегия приводит к застою в перспективных разработках и создает предпосылки хронического запаздывания в развитии и необратимого проигрыша в конкуренции с другими производителями аналогичного оборудования и систем.

Позитивным моментом для Украины остается наличие в отечественной научной среде творческих, пусть и немногочисленных научных коллективов в составе высших учебных заведений и академических институтов, которые продолжают без финансовой поддержки государства и предприятий проводить по собственной инициативе научно-исследовательские и проектно-конструкторские работы по созданию современных технологий, устройств и систем инновационного наполнения, в том числе и для газотурбинной отрасли промышленности. В таком коллективе относится Научно-технический центр «Экотехнологии и технологии энергосбережения» (НТЦ «ЭКОТЭС») Национального технического университета Украины «Киевский политехнический институт», работающий в содружестве с Отделом высокотемпературной термогазодинамики Института технической теплофизики НАНУ [4, 9].

За последние годы специалистам НТЦ «ЭКОТЭС» удалось разработать и испытать в составе реальных камер сгорания газотурбинных двигателей новую трубчатую технологию газосжигания (ТТГ), которая по своим свойствам способна составить серьезную конкуренцию существующим зарубежным технологиям сжигания газа в камерах сгорания ГТУ [9-15]. Лабораторные, стендовые и промышленные испытания горелочных систем трубчатого типа в составе камер сгорания ГТУ мощностью 6 и 10 МВт [11, 12, 13], а также горелочной системы с использованием ТТГ в ГТУ мощностью 25 МВт [14, 15] позволяют утверждать, что при реализации в камерах сгорания ТТГ газотурбинные установки могут получить ряд положительных свойств, к числу которых относятся следующие:

- низкое аэродинамическое сопротивление по воздушному тракту;
- прямоочное высокоскоростное движение топливовоздушной смеси в горелке и в жаровой трубе;
- короткое время пребывания газовой смеси в зоне горения;
- возможность плавного регулирования способом смесеобразования с контролем заданной интенсивности;
- обеспечение высокого уровня полноты сгорания топлива в широком диапазоне значений коэффициента избытка воздуха.

Эти характеристики ТТГ способствуют приданию горелочным системам целого ряда положительных свойств, основные из которых следующие:

- универсальность (возможность эффективного использования в установках различных типов с возможностью сжигания различных газообразных топливных сред);
- унифицированность (горелочные системы для установок различных типов и мощностей создаются на основе одной методики);
- надежность работы (ограниченное тепловыделение вблизи горелки и отсутствие условий для проскакивания пламени);
- устойчивое зажигание и стабилизированный режим горения в широком диапазоне нагрузок и значений коэффициента избытка воздуха;
- простота конструкции;
- обеспечение маломощности и минимальных вибраций в элементах и всей установки в целом;
- надежность конструкции и отсутствие необходимости в серьезных ремонтных мероприятиях в процессе эксплуатации.

4. Аэродинамические и тепловые характеристики горелочных систем на основе ТТГ

Аэродинамические и тепловые характеристики горелочных систем на основе использования ТТГ подробно изучены при различных организациях газовой смеси в одной и той же камере сгорания ГТУ со штатной (регистрационной) системой и системой трубчатого типа в газоперекачивающем агрегате ГТК-10 [12, 13]. Показано, что использование горелочной системы трубчатого типа с микрофакельным механизмом сжигания позволяет обеспечить высокую степень гомогенизации топливовоздушной смеси и прямоочность ее движения с минимальным временем пребывания в зоне горения.

На рис.1 видно, что на расстоянии 3...5 см от фронтальной поверхности горелочной системы практически исчезает неравномерность концентрации газа по всему поперечному сечению зоны сжигания. В камере сгорания с горелочной системой трубчатого типа отсутствуют области резкого изменения скорости потока и неравномерности поля скорости по ходу движения газа от входа к выходу из жаровой трубы, что обеспечивается упорядоченной структурой и оптимизированным расположением трубчатых модулей по всему поперечному сечению жаровой трубы.

Одновременно с этим, горелочная система трубчатого типа за счет более низкого аэродинамического сопротивления позволяет увеличить массовую долю

воздуха, участвующего в процессе сжигания, что позволяет на 15...20% увеличить коэффициент избытка воздуха и увеличить скорость движения воздушного потока в зоне горения. Это, в свою очередь, способствует уменьшению эмиссии NO_x и CO .

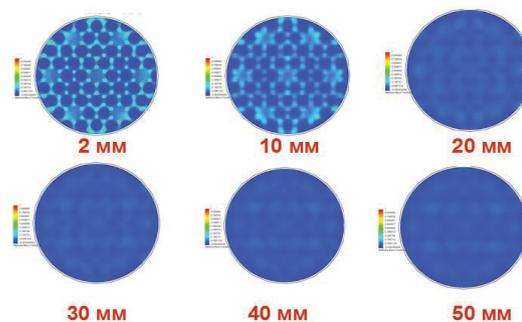


Рис. 1. Концентрация природного газа в различных сечениях жаровой трубы от фронта подачи топлива из горелки трубчатого типа

Анализ аэродинамических и температурных полей в жаровой трубе с горелочной системой трубчатого типа показывает следующие преимущества по сравнению с регистрационными (завихрительными) горелочными системами:

- по сечению жаровой трубы и вдоль нее от входного сечения жаровой трубы до входа на лопаточный аппарат температурное поле имеет высокий уровень равномерности и не претерпевает каких-либо качественных изменений, оно не содержит локальных зон и объемов с высоким температурным градиентом;
- поля скоростей газовых потоков по поперечному сечению жаровой трубы и в осевом направлении от фронтального устройства к выходу из камеры сгорания характеризуются высокой степенью однородности;
- аэродинамическое сопротивление фронтального устройства на 30% ниже по сравнению со штатным фронтальным устройством.

Таким образом, для горелочной системы трубчатого типа характерным является качественное улучшение характера и условий сгорания топливовоздушной смеси. Скоростные и температурные поля высокой равномерности способствуют обеспечению высококачественного процесса превращения химической энергии топлива в тепловую и кинетическую энергию с уменьшением времени пребывания смеси в зоне горения и существенному снижению эмиссии оксидов азота и углерода.

5. Перспективы дальнейшего использования ТТГ в ГТД

Горелочные системы трубчатого типа позволяют осуществить малозатратную и быструю модернизацию горелочных систем существующих камер сгорания практически без изменений в конструкции топливно- и воздухоподводов, жаровых труб и направляющего лопаточного аппарата. Модернизация является эффективной в экономическом и экологическом плане. Среди главных факторов, влияющих на высокий уровень эффективности и экологичности ГПА, в котором в качестве привода служит ГТУ с горелочной системой трубчатого типа, необходимо назвать следующие:

- высокий уровень равномерности полей скорости и температуры газового потока в жаровой трубе;
- высокий уровень качества смесеобразования и сгорания газозвдушной смеси;
- снижение аэродинамического сопротивления фронтального устройства трубчатого типа воздушному потоку позитивно влияет на эффективность и экологичность камеры сгорания ГТУ и агрегата в целом.

Указанные особенности ТТГ позволяют успешно реализовать принцип эффективного тиражирования единичной мощности горелочной системы трубчатого типа с высокими энергетическими и экологическими показателями для камер сгорания различного вида и типа.

6. Выводы

Реализация на практике горелочных систем на основе ТТГ позволит создавать универсальные конструкции систем сжигания топлива и камер сгорания, тиражируемые по мощности и обладающие высокими экологическими показателями. Они могут быть использованы в традиционных и каталитических камерах сгорания ГТУ, системах когенерации с дожиганием топлива, циклах ПГУ и ГПУ типа «STIG» и «Водолей» для однопаливных и многотопливных горелочных систем, включая сжигание водорода. Реализация на практике ТТГ позволит освободиться от поставок зарубежных фирм-производителей газотурбинной техники в период эксплуатации и ремонта ГТУ.

Литература

1. Костенко, Д. А. Модернизация газотранспортной системы Украины: проблемы создания новых газоперекачивающих агрегатов [Текст]/ Д. А. Костенко, В. В. Романов, А. А. Халатов// Промышленная теплотехника. – 2011.- Т.33,№2. – С.41-45
2. Халатов, А. А. Состояние и проблемы развития механического привода для ГТС Украины [Текст]/ А. А. Халатов, А. А. Долгинский, Д. А. Костенко, В. П. Парафейник// Промышленная теплотехника. - 2010. - № 1. - С. 44-53.
3. Говдяк, Р. М. Актуальные проблемы модернизации газотурбинных газоперекачивающих агрегатов [Текст]/ Р. М. Говдяк, Б. И. Шелковский, Г. Н. Любчик, Г. Б. Варламов// Экотехнологии и ресурсосбережение.–2003.–№5.–С. 66-72.
4. Варламов, Г. Б. Новое поколение горелочных систем ГТУ на основе трубчатой технологии сжигания газа [Текст]/ Г. Б. Варламов, А. А. Халатов, П. О. Позняков, Д. Н. Юрашев// Восточно-Европейский журнал передовых технологий. - Т. 3, №10 (57). - 2012. - 9-14 с..
5. Любчик, Г. Н. Создание малотоксичных камер сгорания ГТУ [Текст]/ Г. Н. Любчик, Г. Б. Варламов, Р. М. Говдяк, Б. И. Шелковский, Г. С. Марченко, Г. А. Микулин, С. А. Левчук// Экотехнологии и ресурсосбережение.–2003.–№ 2.–С. 65-74.
6. Любчик, Г. Н. Перспективы повышения надежности, экологической безопасности и энергетической эффективности ГПА на основе применения трубчатой технологии сжигания газа [Текст]/ Р. М. Говдяк, Б. И. Шелковский, Л. Б. Чабанович, О. Г. Гриник, Г. Н. Любчик, Г. Б. Варламов// Ін-т електродинаміки Національної академії наук України. Спеціальний випуск. – К: Інститут електродинаміки НАН України. - 2006.-С.54-57.
7. Любчик, Г. Н. Новая технология создания и использования эффективных и высокоэкологических горелочных устройств для энергетических котлов и камер сгорания ГТУ и ПГУ [Текст]/ Г. Н. Любчик, Г. Б. Варламов; Под редакцией Вороновского Г. К., Недина И. В.// Инновационное развитие топливно-энергетического комплекса: проблемы и возможности. - К.: Знання України. – 2004. – С.115-121.
8. Варламов, Г. Б. Технология повышения энергетической и экологической эффективности работы котлов и камер сгорания ГТУ [Текст]/ Г. Б. Варламов, Г. Н. Любчик, И. В. Олиневич, А. В. Ивасенко// Мир техники и технологий . – 2006. – №4 – С.64-65.
9. Любчик, Г. Н. Использование конструктивных особенностей и аэродинамических эффектов насадка Борда при создании малотоксичных топливосжигающих модулей [Текст]/ Г. Н. Любчик, Г. Б. Варламов, Г. А. Микулин, С. А. Левчук, А. А. Зарицкий, Н. Н. Ольховская// Технологические системы.– 2002. – № 1.– с. 130-133.
10. Любчик, Г. Н. Создание малотоксичных камер сгорания ГТУ [Текст]/ Г. Н. Любчик, Г. Б. Варламов, Р. М. Говдяк, Б. И. Шелковский, Г. С. Марченко // Экотехнологии и ресурсосбережение. – 2003. –№ 2. –С. 65-74.
11. Варламов, Г. Б. Трубчаста технологія газоспалювання – прорив у енергозбереженні та екологічності транспортування природного газу [Текст]/ Г. Б. Варламов, Я. С. Марчук, М. В. Беккер, Г. М. Любчик, Ю. М. Камаєв, П. О. Позняков, Д. О. Кузьменко// Нафтова і газова енергетика. – 2010. – Т.12,№1 - С. 60-63.
12. Варламов, Г. Б. Комплексні дослідження енергоекологічних показників експлуатації ГТУ у складі газоперекачувального агрегату типу ГТК-10. [Текст]/ Г. Б. Варламов, П. О. Позняков, Д. М. Юрашев// Енергосбереження, енергетика, енергоаудит . - №01 (95) 2012. - 15-25 с.
13. Варламов, Г. Б. Особенности горелочной системы трубчатого типа для камеры сгорания ГТУ в составе ГТК-10. [Текст]/ Г. Б. Варламов, П. О. Позняков, Д. Н. Юрашев// Экотехнологии и ресурсосбережение. – №2. – 2012г.
14. Любчик, Г. Н. Результаты испытаний камеры сгорания ГТД ДГ80 с низко-эмиссионным горелочным устройством на базе трубчатых модулей [Текст]/ Г. Н. Любчик, Г. Б. Варламов, В. В. Романов, В. Г. Ванцовский, В. В. Вилкул // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. Современные технологии в газотурбостроении. Часть III. – Т.40,№ 4/6. – 2009. – 13-18 С.
15. Варламов, Г. Б. Модернизация горелочной системы газотурбинного двигателя ДН80 с использованием трубчатой технологии газосжигания [Текст]/ Г. Б. Варламов, Ю. М. Камаєв, П. О. Позняков, Д. Н. Юрашев// Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Нові рішення в сучасних технологіях. - Харків: НТУ «ХПІ». - №18. - 2012.– С. 117-126.