

*На основі теоретичних і експериментальних досліджень аеродинамічних і теплових процесів на реальних установках розроблена і реалізована у паликових системах камер згорання ГТУ нова високоефективна і низькоемісійна трубчаста технологія спалювання газоподібного палива*

*Ключові слова: трубчаста технологія, низькоемісійний палик, комплексний позитивний ефект*

*На основе теоретических и экспериментальных исследований аэродинамических и тепловых процессов на реальных установках разработана и реализована в горелочных системах камер сгорания ГТУ новая высокоэффективная и низкоэмиссионная трубчатая технология сжигания газобразного топлива*

*Ключевые слова: трубчатая технология, низкоэмиссионная горелка, комплексный положительный эффект*

*On the basis of theoretical and pilot studies of aerodynamic and thermal processes at the workable assemblies was designed and implemented in the burner systems of GTU combustors a new high-performance and low-emission pipe technology of gaseous fuel combustion*

*Keywords: pipe technology, low-emission burner, comprehensive positive result*

# НОВОЕ ПОКОЛЕНИЕ ГОРЕЛОЧНЫХ СИСТЕМ ГТУ НА ОСНОВЕ ТРУБЧАТОЙ ТЕХНОЛОГИИ СЖИГАНИЯ ГАЗА

**Г. Б. Варламов**

Доктор технических наук, профессор, проректор\*  
Контактный тел.: (044) 236-42-52, 067-441-00-40

E-mail: varlamov@kpi.ua

**А. А. Халатов**

Академик НАН Украины

Институт технической теплофизики НАН Украины  
ул. Желябова, 2-А, г. Киев, 03680

Контактный тел.: (044) 456-93-02, (044) 456-93-02

E-mail: artem.khalatov@vortex.org.ua

**П. О. Позняков**

Аспирант\*

**Д. Н. Юрашев\***

\*Кафедра теоретической и промышленной теплотехники  
Национальный технический университет Украины  
«Киевский политехнический институт»  
пр. Победы, 37, г. Киев, 03056

## 1. Введение

Технический прогресс и его развитие неразрывно связаны с проведением исследований, разработкой и внедрением новых технологий, позволяющих улучшать показатели работы различных установок и агрегатов.

Особенно это касается высокотехнологичных машин, механизмов, установок и агрегатов, используемых в важных отраслях экономики различных стран и призванных обеспечивать их экономический рост, повышение благосостояния, социальной защиты населения и устойчивое развитие жизненно важных направлений развития страны.

Газотурбостроение, существующее в шести странах мира, относится к стратегически важному виду производства машиностроения, позволяющему оперативно решать государствам вопросы энергоснабжения предприятий, населенных пунктов, важных стратегических объектов [1,2].

Для Украины, обладающей второй по мощности газотранспортной системой в Европе, актуальным является также повышение надежности, экологической безопасности и эффективности эксплуатации газоперекачивающих агрегатов (ГПА) на компрессорных станциях, в составе которых насчитывается более 80% газотурбинных приводов [3]. Для нашей

страны это самая насыщенная газотурбинной техникой составная часть энергетической отрасли.

Представленные в статье результаты исследований и практических внедрений относятся к раскрытию основных преимуществ новой отечественной высокоэффективной трубчатой технологии сжигания газа, которую целесообразно использовать для модернизации существующих и создания новых горелочных систем камер сгорания газотурбинных установок (ГТУ) [4].

## 2. Постановка проблемы

Жесткая конкуренция на международном рынке среди производителей и поставщиков газотурбинной техники для различных отраслей экономики разных стран актуализируют разработку и внедрение новых современных инновационных технологий в газотурбостроении.

Для Украины, являющейся одной из немногочисленных стран, производящей газотурбинные двигатели (ГТД), установки (ГТУ) и агрегаты, становится важным решение вопроса конкурентоспособности выпускаемых ГТД с обеспечением высокой эффективности, экологической безопасности и экономической привлекательности. Если последняя из назван-

ных составляющих конкурентоспособности ГТД легко реализуется в Украине за счет использования отечественного металла, налаженного с высокой рентабельностью производства и низкокзатратного гарантийного обслуживания работающих установок, то стремительное повышение в последние 10 лет эффективности и снижение эмиссионных показателей эксплуатации ГТД зарубежных производителей требуют на данном этапе от заводов-изготовителей газотурбинной техники не только научных изысканий, а и оперативного внедрения новых решений с использованием конструктивных, аэродинамических и тепловых разработок в комплексе.

Учитывая некоторое отставание в решении этих вопросов по сравнению с мощными зарубежными корпорациями и фирмами (General Electric, Siemens, Solar, Rolls-Royce, Mitsubishi и др.) для отечественных предприятий необходимы прорывные инновационные технологии, которые позволят не только достичь низких удельных эмиссионных показателей в работе отечественных ГТД, но и будут способствовать расширению спектра позитивных эффектов с возможностью увеличения и тиражирования мощности двигателей с сохранением высоких энергетических показателей и экологической чистоты эксплуатации, снижению уровня затрат на производство и обслуживание ГТД, обеспечению продления гарантийного и межремонтного периода.

Учеными Киевского политехнического института, обладающими более чем 50-летним опытом разработки и внедрения новых технологий сжигания газообразного топлива в камерах сгорания ГТД, топках паровых и водогрейных котлов и теплогенераторов, создана и успешно прошла стендовые и натурные испытания новая унифицированная и универсальная трубчатая технология газосжигания (ТТГ) [4-9].

### 3. Анализ существующих методов повышения экологической безопасности работы ГТД

Увеличивающееся загрязнение окружающей среды и особенно атмосферного воздуха вредными выбросами от сжигания органического топлива становится мировой проблемой. Человечество пытается решить ее не только подписанием межправительственных соглашений (Киотский протокол) по сокращению глобальных выбросов, но и пытается установить на своих территориях и в отдельно взятых странах ограничения по удельным выбросам токсических веществ и парниковых газов на каждой установке, использующей органическое топливо. К таким установкам, масштабы использования которых в энергетической, транспортной и других отраслях экономики различных стран стремительно возрастают с каждым годом, относятся газотурбинные установки (ГТУ).

В последние десятилетия учеными и конструкторами различных стран и компаний предприняты существенные усилия по детальному изучению механизмов образования вредных выбросов в процессе сжигания органического топлива и созданию методов, конструктивных элементов и технологий,

способствующих снижению эмиссии оксидов азота NOx, оксидов углерода CO, парниковых газов и других наносящих окружающей среде вред токсичных газообразных веществ [2,8-18].

Они базируются на реализации различных классических методов как в процессе подготовки топливо-воздушной смеси, так и в процессе организации горения смеси, так и в процессах выхода отработанных газов в атмосферу.

Известные DLN, SOLO-NOx, ПСТ, RQQL - технологии, метод локального дозированного вдува и другие по различным причинам не находят широкого применения в ГТУ для широкого диапазона мощностей и выборочно по отдельности используются в различных типах агрегатов из-за сложности реализации и не возможности сохранения положительных эффектов в широком диапазоне нагрузок в процессе эксплуатации ГТУ [2,8,10-15].

Нерешенными также остаются вопросы комплексности и эффективности использования новых технологий сжигания газообразных топлив для использования в ГТУ, позволяющие одновременно получить высокий энергетический и экологический эффект с одновременным упрощением, удешевлением изготовления и повышением надежности эксплуатации установки [2,8].

Это связано со сложностью реализации в едином комплексе и в единой технологии сжигания газа основных факторов, влияющих на эффективность и экологичность работы сложного и термонапряженного элемента ГТУ - камеры сгорания.

Например, в используемых технологиях сложно добиться оптимизации процессов смесеобразования и сгорания [2,4-6,8] потому, что:

- качество и скорость смешения топлива с воздухом зависят от давления и скорости движения этих компонентов, а они могут отличаться друг от друга на порядок;
- скорость химических реакций окисления топлива определяются температурой и давлением в зоне горения, которые имеют ограничения;
- подача вторичного воздуха для уменьшения эмиссии вредных веществ и охлаждения жаровой трубы одновременно снижает эффективность процесса превращения энергии;
- сокращение времени пребывания смеси в зоне горения для снижения эмиссии NOx и CO одновременно усложняет процесс образования качественной смеси и ее сгорание;
- использование только предварительного (кинетического) смесеобразования и сжигания топливо-воздушной смеси ограничивает диапазон устойчивой работы ГТД из-за появления неконтролируемого пульсационного горения и масштабных вибраций установки, что снижает рабочий моторесурс агрегата в целом;
- реализованные низкоэмиссионные технологии «привязаны» к конкретным агрегатам, не могут быть использованы на других подобных установках и не поддаются масштабированию по мощности;
- использование разработанных в последнее время газотурбинных технологий для модернизации агрегатов «старых» конструкций практически невозможно из-за необходимости сложной переделки

целых узлов ГТУ и особенно камеры сгорания под целый комплекс требований к аэродинамическим, тепловым, термонапряженным и усталостным характеристикам агрегата;

- для практической реализации преимуществ каталитических камер сгорания в широком диапазоне мощностей ГТУ требуются существенные капиталовложения не только в доработку самой технологии, но и в доводку каждой конкретной установки из-за сложности управления термокаталитическими процессами и невозможностью тиражирования мощностных и экологических характеристик в широком диапазоне нагрузок.

По этим причинам приостановлена широкая реализация в ГТУ известного метода впрыска воды в камеру сгорания для снижения эмиссии NOx поскольку требуется значительное количество качественной воды (около 100 тон воды на 1 тонну уменьшения выбросов NOx), что эквивалентно затратам 3200 долларов США на каждую тонну снижения выбросов NOx.

Использование метода селективного каталитического восстановления тоже приостановлено в связи с наличием существенных капитальных и эксплуатационных затрат (около 5500 долларов США на 1 тонну снижения выбросов NOx) и сложности реализации требований безопасности из-за необходимости использования большого количества аммиака (300-900 тонн в год на один агрегат).

Вместе с тем, мощные мировые компании постоянно продолжают разрабатывать и внедрять новые модели газовых турбин и новые методы повышения эффективности их работы.

Например, General Electric в газовой турбине нового поколения MS9001H реализовала систему сжигания типа DNL 2.5H в 14 сухих трубчатых камерах сгорания, отказавшись от байпасной воздушной заслонки, а регулирование расхода воздуха на горелки предварительного смещения осуществляется за счет использования четырех рядов поворотных направляющих лопаток входного направляющего аппарата, что по данным компании позволяет добиться уровня эмиссии NOx меньше 10 ppm [16].

Компания Siemens для усовершенствования существующей модели ГТУ типа SGT5-4000F использовала высокотемпературные металлокерамические

облицовочные плитки в кольцевой жаровой трубе с 24 двухтопливными горелками типа HR3, что по данным компании позволило снизить одновременно выбросы вредных веществ и уменьшить пульсации давления [18].

В сложной конструкции турбины GT-26 международного консорциума Alstom топливо сначала подается в основную кольцевую камеру сгорания, где сжигается 75% топлива, а потом продукты сгорания с температурой 1213°C расширяются в одноступенчатой газовой турбине высокого давления и подаются в дополнительную камеру сгорания, где и дожигаются остатки топлива, что по данным компании позволяет обеспечивать концентрацию эмиссии NOx меньше 25 ppm [18].

Достижения зарубежных энергетических ГТУ, которые используются в современных системах генерации энергии, приведены в табл. 1 [2,3,6,8,11-18].

К отечественным предприятиям, которые выпускают ГТД, отвечающих современным требованиям по экологическим показателям, следует отнести ПАТ «Мотор-Сич», ГП «Ивченко Прогрес», ГП НПКГ «Заря-Машпроект», которые в современных тяжелых условиях конкуренции с зарубежными компаниями сохранили свой научный и технический потенциал и продолжают разработки.

Например, Научно-производственный комплекс газотурбостроения «Заря»-«Машпроект» выпускает серийно двигатели различной мощности, которые широко используются в энергетической и транспортной отраслях промышленности не только Украины, но и за рубежом.

Обеспечение соответствия современным требованиям по экологичности работы ГТД на данном предприятии для газотурбинного двигателя ДН80Л мощностью 25 МВт была разработана малотоксичная горелочная система, в основу которой положено использование способа сжигания предварительно подготовленной «бедной» топливо-воздушной смеси.

Основным элементом этой системы выступает горелочное устройство, которое состоит из двух радиальных завихрителей первого и второго каналов, за которыми размещены кольцевые камеры смещения и сгорания (рис. 1) [19].

Таблица 1

Основные характеристики зарубежных энергетических ГТУ

Характеристики	General Electric	Siemens	Mitsubishi	ABB
Тип ГТУ	Frame 9H	SGT5-4000F	M701G2	GT 26
Мощность, МВт	282	286,6	334	289,1
Расход газа, кг/с	685	690	750	640,1
Температура газа на входе/выходе, С	1440	1315/577	1500/587	1234/615
К.п.д. ГТУ	39,5	39,5	39,5	39,1
Эмиссия NOx, ppm	<10	<25	<25	<25
Тип камеры сгорания	Трубчатая, 14 шт.	Кольцевая с 24 отдельными горелками	Трубчатая, 20 шт., охлаждение паром	Кольцевая, EV+SEV

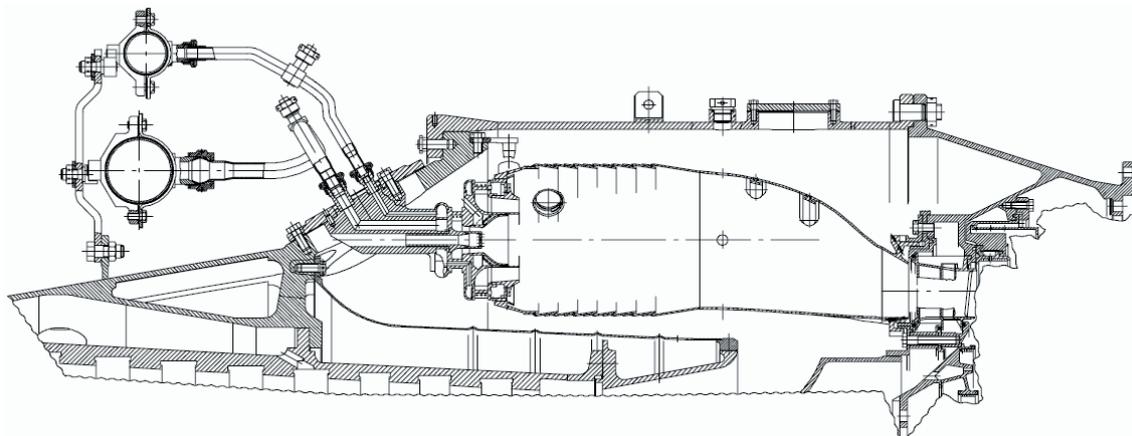


Рис. 1. Конструктивная схема камеры сгорания газотурбинного двигателя ДН80

Камера сгорания не имеет проблем с «проскакиванием» пламени и самовоспламенением топлива в смесительном модуле, она отличается простотой конструкции и системы автоматического управления, низкими затратами на техническое обслуживание в период эксплуатации.

Вместе с тем, при переходе на режимы, отличные от номинальных, снижении температуры атмосферного воздуха и изменении состава топливо-воздушной смеси в камере сгорания создается критическая ситуация для устойчивого горения, а работа двигателя на особо «обедненных» смесях при обеспечении низких эмиссионных характеристик создает усиленную генерацию колебаний звуковой частоты, что приводит к возникновению вибрационного горения [20, 21].

Это требует поддержания и контролирования особо точных параметров работы двигателя и «вживления» в конструкцию и систему управления особых датчиков и программ. Не соблюдение этих условий резко снижает надежность двигателя, существенно сокращает межремонтный период и общий срок рабочего моторесурса.

Такие особенности работы низкоэмиссионных камер сгорания свойственны всем газотурбинным двигателям, которые используют вышеперечисленные технологии снижения эмиссии вредных выбросов, использование которых требует реализации на двигателе особых «ювелирных» и дорогостоящих конструктивных, электронных и программных элементов.

В этой связи, иногда погоня за особо низкими показателями эмиссии оксидов азота и оксида углерода приводит в существенному удорожанию самого двигателя, повышению эксплуатационных затрат, ужесточению требований к регламентным профилактическим и рабочим процессам.

Таким образом, используемые в современных ГТД низкоэмиссионные технологии являются капиталоемкими, монополюбно защищенными, трудно реализуемыми, им свойственны узкие диапазоны устойчивой и надежной работы, для их реализации необходимо придерживаться особо строгих правил и ограничений не только в период эксплуатации, но также и во время проведения профилактических и ремонтных работ.

#### 4. Основные преимущества трубчатой технологии сжигания газообразного топлива

В течение последнего десятилетия в Киевском политехническом институте проведены интенсивные разработки новой малозатратной легко осуществимой и доступной трубчатой технологии газосжигания (ТТГ) с обеспечением одновременно комплекса высоких показателей по энергетической эффективности и экологической безопасности [22].

В результате осуществления разработанных подходов в использовании уникальных аэродинамических и тепловых эффектов за счет реализации унифицированного расположения трубчатых элементов авторам удалось оптимизировать как процесс разработки, так и процесс изготовления горелочных систем на основе использования ТТГ [23-25].

ТТГ обладает универсальностью применения, т.к. позволяет с высокой эффективностью сжигать различные по химическому составу и теплотворной способности газообразные среды природного и искусственного происхождения в горелочных системах трубчатого типа для топков котлов, теплогенераторов (в т.ч. и контактного типа), камерах сгорания газотурбинных, газопаровых и парогазовых установок [6, 26, 27].

Для демонстрации комплекса позитивных эффектов использования ТТГ были созданы и успешно испытаны новые горелочные системы в камерах сгорания ГТУ в составе газоперекачивающих агрегатов типа ГТК-10-4 (НЗЛ, Санкт-Петербург, Россия) и ГТ-750-6 (Брненский механический завод, Чехия) [4,6,7,27-29].

Полученные результаты в натурных испытаниях агрегатов под нагрузкой позволили перейти к разработке нового поколения горелочных систем для современных отечественных газотурбинных двигателей с высокофорсированными камерами сгорания.

Разработка нового поколения горелочной системы для камеры сгорания ГТД ДН80 с использованием ТТГ и ее стендовые испытания позволили констатировать наличие комплекса положительных свойств этой системы, которые детально описаны в [9].

Стендовые исследования проводились последовательно на горелочных системах трубчатого типа первого [30], а затем второго поколения [31]. Была получена положительная динамика в улучшении комплекса показателей.

В последние годы проведены исследования новых поколений горелочных систем трубчатого типа для ГТД ДН80, которые отличаются от предыдущих обеспечением более высоких показателей по качеству смеси образования в широком диапазоне массовых долей топлива в газообразной смеси, широкого диапазона скоростей движения компонентов, высокого уровня гомогенности предварительно подготовленной смеси топлива и воздуха, плавного безкризисного перехода с диффузионного режима смеси образования и горения на комбинированный и чисто кинетический режим.

Проведенный комплекс исследований позволил выделить главные преимущества трубчатой технологии сжигания газа для использования их в конкретной камере сгорания реального двигателя ДН80 без каких-либо конструктивных изменений жаровой трубы, ее конструктивных и стыковочных размеров и двигателя в целом. Системный анализ особенностей каждого поколения горелочных систем трубчатого типа обеспечил возможность оптимизировать ее основные характеристики и создать пятое поколение горелочной системы на основе ТТГ для ГТД ДН80 [30].

Таким образом, в настоящее время получены оптимистические результаты исследований для широкого внедрения в газотурбинную технику новой отечественной трубчатой технологии сжигания газа.

К основным доказанным преимуществам использования трубчатой технологии газосжигания по сравнению с существующими системами горелочных устройств в камерах сгорания ГТУ необходимо отнести следующие:

- высокий уровень равномерности температуры в поперечном разрезе жаровой трубы и вдоль ее длины;
- температурные градиенты от центра жаровой трубы к ее стенке не превышают значения в 5%;
- поле скоростей по всему объему жаровой трубы характеризуется повышенной равномерностью, а именно отклонение значений скорости в центре и на периферии жаровой трубы не превышает 10%;
- отсутствуют зоны и объемы с повышенными значениями температуры и низким значением скорости, что способствует снижению эмиссии оксидов азота;
- обеспечение гомогенного состава топливовоздушной смеси и ее горения по всему поперечному сечению жаровой трубы позволяет достичь высококачественного режима сгорания топлива с нейтрализацией условий образования оксида углерода СО;

- прямолинейность движения смеси позволяет сократить время ее пребывания в зоне горения, что способствует снижению эмиссии оксидов азота;

- наличие тороидальных вихрей в прикорневой области факелов способствует интенсивному перемешиванию газа с воздухом на любых режимах нагрузки в автоматическом режиме, что расширяет диапазон устойчивой работы двигателя от очень «бедных» до очень «богатых» смесей в кинетическом (предварительном), диффузионном и комбинированном режимах смеси образования;

- низкое аэродинамическое сопротивление фронтальной части горелочного устройства позволяет обеспечить высокоэффективные показатели эксплуатации;

- разработанная методика расчетов горелочных систем на основе ТТГ позволяет прогнозировать эксплуатационные и экологические показатели работы двигателя;

- появляется возможность создания отечественной современной высокоэффективной и экологически безопасной камеры сгорания со свойствами, отвечающих современным мировым требованиям.

## 5. Перспективы дальнейших исследований

Перспективным направлением работы является создание полноразмерного прототипа горелки для высокофорсированной современной камеры сгорания ГТД ДН-80 с проведением полномасштабных стендовых испытаний на модельных параметрах и создание двигательного варианта горелочной системы на основе трубчатых модулей для испытаний на двигателе.

После получения результатов испытаний появится возможность системного анализа результатов всех типов испытаний и комплексной оценки перспективного использования отечественной трубчатой технологии унифицированного сжигания газообразного топлива на газотурбинных двигателях и в составе газопаровых установок типа STIG.

Разработанная идеология масштабирования мощности горелочных систем на основе ТТГ позволяет создание горелочных систем для ГТУ различных мощностей с обеспечением стабильно высокого эффекта по энергетической эффективности и экологической безопасности.

## Литература

1. Костенко Д.А. Модернизация газотранспортной системы Украины: проблемы создания новых газоперекачивающих агрегатов/ Костенко Д.А., Романов В.В., Халатов А.А.// Промышленная теплотехника. – 2011.- Т.33,№2. – С.41-45.
2. Говдяк Р.М. Актуальные проблемы модернизации газотурбинных газоперекачивающих агрегатов/ Говдяк Р.М., Шелковский Б.И., Любчик Г.Н., Варламов Г.Б. // Экологические и ресурсосбережение.–2003.–№5.–С. 66-72.
3. Халатов А.А. Состояние и проблемы развития механического привода для ГТС Украины/ Халатов А.А., Долинский А.А., Костенко Д.А., Парафейник В.П. // Промышленная теплотехника. - 2010. - № 1. - С. 44-53.
4. Варламов Г.Б. [и др.] Трубчатая технология газосжигания – прорыв у энергоэкономності та екологічності транспортування природного газу/ Варламов Г.Б., Марчук Я.С., Беккер М.В., Любчик Г.М., Камасев Ю.М., Позняков П.О., Кузьменко Д.О. // Нафтова і газова енергетика. – 2010. – Т.12,№1 - С. 60-63.
5. Любчик Г.Н. Новая технология создания и использования эффективных и высокоэкологических горелочных устройств для энергетических котлов и камер сгорания ГТУ и ПГУ / Любчик Г.Н., Варламов Г.Б.; Под редакцией Вороновского Г.К., Недина И.В.// Инновационное развитие топливно-энергетического комплекса: проблемы и возможности. - К.: Знання України. – 2004. – С.115-121.

6. Варламов Г.Б. Технология повышения энергетической и экологической эффективности работы котлов и камер сгорания ГТУ / Варламов Г.Б., Любчик Г.Н., Олиневич И.В., Ивасенко А.В. // Мир техники и технологий . – 2006. – №4 – С.64-65.
7. Любчик Г.Н. Перспективы повышения надежности, экологической безопасности и энергетической эффективности ГПА на основе применения трубчатой технологии сжигания газа / Говдяк Р.М., Шелковский Б.И., Чабанович Л.Б., Гриник О.Г., Любчик Г.Н., Варламов Г.Б. // Ин-т електродинаміки Національної академії наук України. Спеціальний випуск. – К: Інститут електродинаміки НАН України, 2006.-С.54-57.
8. Любчик Г.Н. [и др.] Создание малотоксичных камер сгорания ГТУ / Любчик Г.Н., Варламов Г.Б., Говдяк Р.М. Шелковский Б.И., Марченко Г.С., Микулин Г.А., Левчук С.А. // Экологические и ресурсосбережение.–2003.–№ 2.–С. 65-74.
9. Любчик Г.Н. [и др.] Результаты испытаний камеры сгорания ГТД ДГ80 с низко-эмиссионным горелочным устройством на базе трубчатых модулей / Любчик Г.Н., Варламов Г.Б., Романов В.В., Ванцовский В.Г., Вилкул В.В. // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. Современные технологии в газотурбостроении. Часть III – 2009. – Т.40, № 4/6 – С.13-18.
10. Снижение выбросов вредных веществ ГТУ на компрессорных станциях ОАО «ГАЗПРОМ»: научн.-техн. отчет / ВТИ-ЦИ-АМ; В.А. Щуровский, Ю.Н. Сеницын, А.В. Черемин – Москва, 2004.
11. Fulton K. Dry low emissions design based on series vs. parallel fuel staging./ Fulton K. // Gas Turbine World: January-February 1999. – p26-28.
12. Lieuwen T. Fuel Flexibility Influences on Premixed Combustor Blowout, Flashback, Autoignition, and Stability/ Lieuwen, T., McDonell, V., Petersen, E., and Santavicca, D. // ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power – Vol. 130 – 2008.
13. Вплив якості змішування палива і повітря на емісію NOx при горінні бідної попередньо перемішаної і попередньо випареної суміші. AIAA paper, 95-0729.
14. Постников А.М. Снижение оксидов азота в выхлопных газах ГТУ / Постников А.М. – Самара: СНЦ РАН, 2002 – 286 с.
15. Ольховский Г.Г. Снижение концентрации оксидов азота в выбросах ГТУ/ Ольховский Г.Г.// Теплоэнергетика, № 3, - М., 1990. – с.65-71.
16. Nuovo P., Gas Turbines, Oil & Gas, General Electric, A-50127, Florence-Italy, 2005.
17. The Jet Engine, Rolls-Royce, ISBN 0 902121 2 35, England, 1996.
18. А.С. Лебедев Тенденции повышения эффективности ГТУ / А.С. Лебедев // Теплоэнергетика – № 6 – 2008.
19. Пат. 68446 МПК F23R 3/34 (2006.01) Камера згорання газової турбіни енергетичної установки/ Коваленко А.В., Ванцовський В.Г., Коротич Є.В., Жихарев С.Д. Опубл. 16.08.2004, бюл. № 8.
20. М.Б.Налісний, В.П.Герасименко, С.О.Саприкін. Аналіз нестійких режимів роботи газоперекачувальних агрегатів //Матеріали 8-ої Міжнародної науково-практичної конференції “Нафта і газ України - 2004” в м. Судак. -Київ: Українська нафтогазова академія. - 2004. -Том 2. - с. 163-164.
21. Н.Б.Налесный, В.П.Герасименко. Диагностирование неустойчивых режимов работы газоперекачивающего агрегата //Материалы 15-ой международной деловой встречи “Диагностика - 2005” в г. Сочи. - Москва: ОАО “Газпром”. - 2005. - Том 2. - с. 86-89.
22. Любчик Г.Н. Использование конструктивных особенностей и аэродинамических эффектов насадка Борда при создании малотоксичных топливосжигающих модулей / Любчик Г.Н., Варламов Г.Б., Микулин Г.А., Левчук С.А., Зарицкий А.А., Ольховская Н.Н. // Технологические системы.– 2002.– № 1.– с. 130-133.
23. Деклараційний Пат. № 50168А, м.п.кл. F23D14/02, F23D14/22 Газовий пальник / Варламов Г.Б., Любчик Г.М., Марченко Г.С., Макаренко В.О. бюл. № 10.– 2002.– С.5.
24. Деклараційний Пат. № 56602А м.п.кл. F23D14/02, F23D14/22 Газовий пальник / Варламов Г.Б., Любчик Г.М., Марченко Г.С., Макаренко В.О., Мікулін Г.О. бюл. №5.–2003.–С. 5.
25. Деклараційний Пат. № 57498А м.п.кл. F23D14/02, F23D14/22 Газовий пальник / Варламов Г.Б., Любчик Г.М., Марченко Г.С., Макаренко В.О., Манжула І.О. бюл. №6.– 2003.– С. 6.
26. Любчик Г.Н. Создание малотоксичных камер сгорания ГТУ / Любчик Г.Н., Варламов Г.Б., Говдяк Р.М. Шелковский Б.И., Марченко Г.С. [и др.] // Экологические и ресурсосбережение.–2003.–№ 2.–С. 65-74.
27. Варламов Г.Б. Особенности горелочной системы трубчатого типа для камеры сгорания гту в составе ГТК-10. / Варламов Г.Б., Позняков П.О., Юрашев Д.Н. // Экологические и ресурсосбережение – №2 – 2012г.
28. Пат. № 68097 Российской Федерации Газовая горелка трубчатой камеры сгорания газотурбинной установки / Любчик Г.Н., Говдяк Р.М., Варламов Г.Б., Чабанович Л.Б., Шелковский Б.И., Микулин Г.А. опубл. 10.11.2007.
29. Пат. № 69614 Российской Федерации Многогорелочное фронтное устройство камеры сгорания газотурбинной установки / Любчик Г.Н., Говдяк Р.М., Варламов Г.Б., Пужайло А.Ф., Чабанович Л.Б., Шелковский Б.И., Микулин Г.А. опубл. 27.12.2007.
30. Пат. 63686 МПК F23R 3/34 (2006.01) Газовая горелка на основе насадка Борда для камеры сгорания газотурбинного двигателя / Варламов Г.Б., Приймак Е.А., Позняков П.О., Олиневич Н.В. опубл. 10.10.2011, Бюл. №19. -8 с.
31. Пат. 63687 МПК F23R 3/34 (2006.01) Газовая горелка трубчатого типа газотурбинного двигателя с регулируемым распределением газоподачи / Варламов Г. Б., Приймак Е. А., Позняков П. О., Олиневич Н. В. опубл. 10.10.2011, Бюл. № 19. - 8 с.
32. Пат. 98097 МПК (2012.01) F23R 3/34 (2006.01) Багатоканальний пальник трубчатого типу газотурбінного двигуна з інжекторною газоподачею / Варламов Г. Б., Приймак Е. А., Позняков П. О., Олиневич Н. В. опубл. 10.04.2012, Бюл. № 7. - 10 с.