

## РАЗРАБОТКИ НИО ПРОБЛЕМ ГОРЕНИЯ НТУУ “КПИ” В НАПРАВЛЕНИИ СОЗДАНИЯ ПЕРЕДОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ СЖИГАНИЯ ТОПЛИВ

### Этапы становления исследований и разработок

Исследования и разработки в области передовых технологий сжигания топлив начаты в Киевском политехническом институте в середине 50-х годов XX-го столетия тогда еще аспирантом КПИ, а впоследствии Заслуженным деятелем науки и Почетным энергетиком Украины, академиком Академии инженерных наук Украины профессором Христичем Владимиром Александровичем. Уже в первом своем законченном исследовании - защищенной в 1954 году кандидатской диссертации - им была решена важная научно-техническая проблема, связанная с созданием камер сгорания испарительного типа, результаты которой были успешно реализованы в авиационном двигателестроении [1]. В данной работе в полной мере проявились основные принципы выполнения научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, проводимых в последующем в КПИ под руководством проф. Христича В.А., суть которых сводится к реализации неординарных научно-технических решений, выполнению поэтапного структурного анализа исследуемых процессов и систем, комплексности решаемых научно-технических задач и оперативному отклику на требования промышленности.

Период 1960–1970 гг. стал временем становления возглавляемого проф. Христичем В.А. творческого коллектива и развития материально-технической базы в КПИ. Уже первые результаты исследований обратили на себя внимание специалистов и в 1960 году, когда возникла потребность в развитии газовых турбин энергетического и промышленного назначения, в соответствии с Постановлением СМ СССР №198 “О дальнейшем развитии газотурбостроения в СССР”, КПИ был включен соисполнителем в число организаций-создателей головных образцов ГТУ и ПГУ и по этому же Постановлению при теплоэнергетическом

факультете была организована научно-исследовательская Лаборатория газотурбостроения КПИ, которая в дальнейшем вошла в состав Проблемной лаборатории “Теплообмена и газодинамики” КПИ (рук. проф. Орнатский А.П.). В это время начались исследования и разработки по созданию струйных, струйно-стабилизаторных и диффузионно-стабилизаторных технологий сжигания топлив (позиции, соответственно, 1,2 и 3 на рис.1) [2-10].

В последующее время (1970–1980 гг.) продолжались исследования в направлении модернизации диффузионно-стабилизаторной технологии на базе использования плоских стабилизаторов (поз. 4 на рис.1). Был реализован пилотный проект по созданию диффузионно-стабилизаторной горелки с использованием трубчатых модулей, проведен цикл исследований и разработок по конверсии авиадвигателей AI-20A, AI-20D, AI-20L, AI-24, РД-500, ЗД-45, ВК-1, Д-25, НК-12, РД-3М-500, на базе которых для нужд газовой промышленности были созданы буровые установки, передвижные автоматизированные электростанции, и пиковые энергоблоки мощностью от 18 до 108 МВт. В это же время состоялась Государственная аттестация струйных горелок КПИ. Учитывая межотраслевой характер решаемых проблем и необходимость комплексного их выполнения, на базе НИЛ Газотурбостроения КПИ был создан научно-исследовательский отдел проблем горения и эффективности использования топлив (рук. Христич В.А.).

Период 1980–1990 гг. ознаменовался широким научно-техническим сотрудничеством НИО проблем горения с академическими, отраслевыми и проектными институтами, турбостроительными заводами, энергетическими и промышленными предприятиями, итогом которого стало создание типовых конструкций теплогенераторов широкого промышленного назначения и обеспечено успешное их внедрение в различных отраслях промышленности.

В рамках тематики данного отдела в последующем периоде (1990–2000 гг.) проведено научно-техническое обоснование эффективности трубчатой технологии сжигания газовых топлив, выполнены исследования и разработки в области энергосбережения, обеспечения энергетической и экологичес-

кой безопасности энергетических объектов, систем и территорий, в том числе исследования и разработки в области форсированных систем утилизации энергии на выходе ГТУ и создания автономных теплоцентров для коммунальной энергетики.

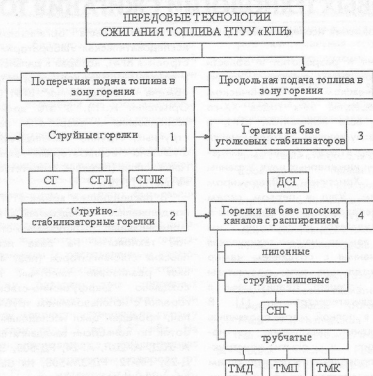


Рис. 1. Классификация горелок НТУУ «КПИ»

**Особенности технологий сжигания топлив НТУУ “КПИ”**

На рис.2 представлены схемы горелок струйного и струйно-стабилизаторного типа (поз. а, б, в) и одиночные (изолированные) элементы горелок диффузионно-стабилизаторного типа (поз. г, д, е).

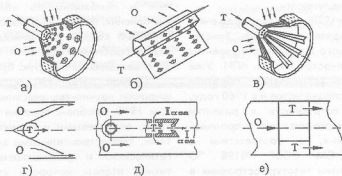


Рис.2. Принципиальные схемы струйных (а, б), струйно-стабилизаторных (в) горелок НТУУ “КПИ” и конфигурация проточной части диффузионно-стабилизаторных топливосжигающих модулей на базе V-образных (г), плоских (д) и трубчатых (е) интенсификаторов смесеобразования и горения

Идея создания горелок струйного (рис.2-а) и струйно-стабилизаторного (рис.2-в) типа возникла как альтернатива традиционным регистровым горелкам, рабочий процесс которых основан на вихревом взаимодействии потока окислителя с топливными струями. В отличие от вихревых технологий в основу струйных технологий КПИ положены эффекты аэродинамического взаимодействия перекрестно-ориентированных струи топлива и системы струй окислителя (горелки СГ, СГЛ и СГЛК) [6,7,11-13] или такого же взаимодействия струи топлива с поперечным осевым течением в затененной зоне за уголкового стабилизатором, обтекаемым потоком окислителя (горелки ССГ) [6]. Созданию рациональных схем горелок струйного и струйно-стабилизаторного типа предшествовало всестороннее исследование особенностей структуры течения за перфорированным сектором струйной горелки и в затененной зоне за уголкового стабилизатором, закономерностей смесеобразования и стабилизации пламени в зоне горения, условий выгорания топлива, а также проведение энергетической диагностики рабочего процесса и экологического аудита состава продуктов сгорания. В результате выполненного комплекса исследований разработаны приемы рационального проектирования горелок данного типа и определены условия достижения минимальных энергетических потерь и разработаны приемы минимизации эмиссии токсичных оксидов азота ( $\text{NO}_x$ ) и оксида углерода ( $\text{CO}$ ). В этих горелках на основе дробления зоны горения в совокупности с высокой интенсивностью смесеобразования (микрофакельное горение) и саморегулируемости процесса горения достигается широкий диапазон устойчивой работы по коэффициенту избытка воздуха.

Следующим направлением разработок КПИ в области передовых технологий сжигания топлив явились диффузионно-стабилизаторные технологии, в основу которых было положено использование одиночных (изолированных) топливосжигающих модулей на базе применения прямоточных каналов с расширением потока окислителя в зоне горения и стабилизации пламени, в том числе с использованием V-образных (рис.2-г) [9] и плоских стабилизаторов пламени (рис.2-д) [10], а в последующем - трубчатых интенсификато-

ров смесеобразования, горения и стабилизации пламени (рис.2-е) [14,15].

Особенностью диффузионно-стабилизаторных технологий является использование аэродинамических эффектов взаимодействия системы топливных струй, внедряемых в зону обратных токов за телами плохобтекаемой формы, которые находятся в потоке окислителя (рис.2-г, д, е).

Среди вариантов реализации диффузионно-стабилизаторных технологий особое место занимают технологии на основе использования плоских стабилизаторов пламени (пилонов - на рис.2-д) и трубчатых каналов с расширением потока (насадок Борда на рис.2-е). Данные технологии отличаются от рассмотренных выше (предназначенных для сжигания топлива при высоких и переменных избытках воздуха) тем, что они эффективно работают как при высоких ( $\alpha \rightarrow 2,0$ ), так и при низких ( $\alpha \rightarrow 1,0$ ) избытках воздуха. Кроме того, в них легко реализуются альтернативные методы организации рабочего процесса на основе диффузионного, предварительного и комбинированного смесеобразования.

При разработке диффузионно-стабилизаторной технологии сжигания газа впервые было показано существенное отличие режимов работы горелочных устройств при диффузионном и предварительном смесеобразовании, что иллюстрируется данными, приведенными на рис.3 [10].

Установлено, что в области высоких избытков воздуха ( $\alpha \geq 2,0$ ) преимущество имеет применение диффузионного смесеобразования, в то время как в области  $\alpha < 2,0$  предпочтительным является предварительное смесеобразование, недостатком которого является наличие режимов вибрационного горения при  $\alpha > 2,0$ , что легко устраняется за счет применения комбинированного смесеобразования.

Дальнейшим развитием диффузионно-стабилизаторной технологии следует считать горелки, в которых щелевые воздушные каналы трансформированы в цилиндрические с регулярной сотовой компоновкой этих каналов (воздушных трубок) в трубной доске. Такая технология получила название трубчатой и на сегодняшний день не имеет аналогов в практике сжигания органических топлив.

Совокупность разработанных в КПИ методов сжигания топлив представляет

универсальную базу технологических решений, обеспечивающих эффективное сжигание топлив в установках различного энергетического и промышленного назначения. Последнее предопределило широкое применение горелок КПИ в различных отраслях промышленности как элементов обогревательных и сушильных установок, в

системах термokatалитической нейтрализации токсичных промышленных газовых выбросов, в автономных теплоцентрах и др. Особое место занимает опыт использования передовых технологий сжигания топлив КПИ в газотурбинных установках в качестве элементов основных камер сгорания и дожигающих устройств на выходе ГТУ.

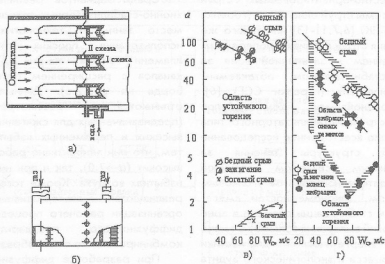


Рис.3. Схема рамной компоновки (а) плоских стабилизаторов (б) и диаграммы режимов работы при диффузионном (в) и предварительном (г) смесеобразовании

**Примеры использования струйных и струйно-стабилизаторных горелок КПИ в газотурбинных установках**

Первым успешным опытом применения горелок КПИ в ГТУ стал цикл исследований и разработок, выполненных по заказу Калужского турбинного завода, при создании газотурбинной установки ГТУ-9 КТЗ (рис.4-а) [16].

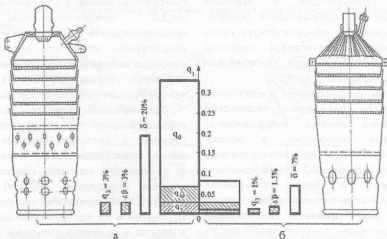


Рис.4. Результаты энергетической диагностики камеры сгорания ГТУ-9 КТЗ с регистровым (а) и струйно-стабилизаторным (б) фронтальным устройством

В результате наладочных работ на данной ГТУ с регистровыми камерами сгорания (8 жаровых труб в напорном патрубке компрессора) установлен целый ряд недостатков их рабочего процесса: трудности с запуском установки, узкий диапазон эффективной и устойчивой работы, высокая неравномерность температурного поля в газосборнике ГТУ, что и стало причиной замены регистровых горелок на горелки струйно-стабилизаторного типа КПИ (рис.4-6). Энергетические преимущества струйно-стабилизаторной технологии по сравнению с вихревой отображены на рис.4, а соответствующая диагностика проведена на основе разработанной в КПИ методики оценки воздействия термодинамической необратимости рабочего процесса камер сгорания на эффективный КПД ГТУ. В данном случае основными источниками необратимости являются химический недожог топлива ( $q_3$ ), относительные потери давления в камере сгорания ( $\Delta p = \frac{\Delta p}{p}$ , где  $p$  - абсолютное давление в камере сгорания) и неоднородность распределения температур продуктов сгорания в газосборнике ГТУ, определяемая из соотношения

$$\delta = (T_{\max} - T_{\text{ср}}) \Delta T_{\text{к.сг}}$$

где  $T_{\max}$  и  $T_{\text{ср}}$ , соответственно, максимальная и средняя температура газов в газосборнике;

$$\Delta T_{\text{к.сг}} = T_{\text{ср}} - T_{\text{к.в}} - \text{подогрев в камере сгорания.}$$

В результате замены регистрового фронтного устройства на струйно-стабилизаторное и дополнительной модернизации жаровой трубы достигнуто снижение уровня химического недожога ( $q_3$ ) в 3 раза, потерь давления ( $q_{\Delta p}$ ) в 2 раза и неравномерности температурного поля ( $q_{\delta}$ ) почти в 3 раза. Все это способствует снижению суммарных энергетических потерь  $\Sigma q_i = q_3 + q_{\Delta p} + q_{\delta}$  почти в 3 раза.

Особенности рабочего процесса струйных и струйно-стабилизаторных горелок (возможность их эксплуатации при повышенных избытках воздуха и прямоточность факела, высокая эффективность смесеобразования в совокупности с гомогенизацией и микрофакельностью зоны горения) способствуют существенному снижению эмиссии токсичных оксидов азота

(NOx) и оксида углерода (CO) в продуктах сгорания. Это подтверждается опытом применения горелок струйного типа при создании энергетической ГТУ мощностью 50 МВт, разработанной Харьковским турбинным заводом. В первоначальном варианте ГТ-50-800 ХТЗ в конструкцию камеры сгорания высокого давления (КСВД) было заложено фронтное устройство на основе регистровой горелки (рис.5-а). Недостатки данного конструктивного решения были выявлены уже на первой стадии доводочных работ и заключались, как и в случае с ГТУ-9 КТЗ, в затрудненном запуске КСВД при высоком уровне заброса температур, повышенном уровне потерь давления и высокой неравномерности температурного поля в газосборнике турбины высокого давления. Все эти недостатки были устранены за счет реконструкции КСВД на основе применения семигорелочного струйного фронтного устройства (рис.5-б). Более того, при работе ГТУ с модернизированным вариантом КСВДС по результатам экологических испытаний, выполненных Всероссийским теплотехническим институтом (ВТИ) [17,18], установлено существенное снижение эмиссии NOx, о чем свидетельствуют данные, приведенные на рис.5-в, на котором параметр  $f$  обратно пропорционален коэффициенту избытка воздуха, т.е.  $f = \alpha^{-1}$ .

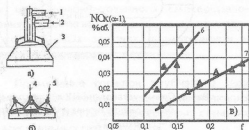


Рис.5. Однорегистровый (а) и семигорелочный (б) варианты фронтного устройства камеры сгорания ГТ-50-800 ХТЗ:

- 1 и 2 - подвод пускового и основного топлива на регистровую горелку;
- 3 - конус;
- 4 и 5 - подвод пускового и основного топлива на струйные горелки [17]

#### Диффузионно-стабилизаторные и струйные горелки в форсированных системах утилизации энергии на выходе ГТУ

Как уже отмечалось выше, разработка струйных и струйно-стабилизаторных техно-

логий сжигания топлив была вызвана бурным развитием газовой промышленности и потребностями других отраслей промышленности в использовании эффективных методов преобразования химической энергии газового топлива в другие виды энергии. Первый опыт внедрения газотурбинных установок на компрессорных станциях и в энергетике выявил основной их недостаток – низкую термодинамическую эффективность, обусловленную высокой температурой уходящих газов на выхлопе ГТУ. Это обстоятельство обусловило на первой стадии развития технологий энергосбережения появление различных схем утилизации тепловой энергии на выхлопе ГТУ, а в последующем и разработку форсированных систем утилизации энергии с дожиганием [19-21], в которых реализуется дополнительное генерирование энергии (тепловой, механической или электрической). При этом утилизация (одновременно с когенерацией) энергии может осуществляться по трем основным схемам: с использованием блоков дожигающих устройств (БДУ), встроенных в газоход газовой турбины (рис.6-а); выносных подтопочных устройств (ВПУ), которые

устанавливаются параллельно с газоходом ГТУ; блоков горелочных устройств (БГУ), которые устанавливаются перед котлом-утилизатором, работающим с дожиганием топлива [22, 23]. Во всех случаях принципиально невозможно использование традиционных методов сжигания топлива в утилизационно-когенерационных системах на выхлопе ГТУ в силу специфических требований, предъявляемых к данным системам [21, 22], что и предопределило создание диффузионно-стабилизаторной технологии сжигания топлива на основе использования угольковых стабилизаторов (рис.6-б). Данная технология явилась результатом совместных разработок КПИ, Всероссийского теплотехнического института (ВТИ) и Центрального котлотурбинного института (ЦКТИ) и впервые была реализована при разработке БДУ в составе форсированной системы утилизации энергии на выхлопе 4-х блоков ГТУ Ленинградского металлического завода (ГТ-25 – 700 ЛМЗ) на Якутской ГРЭС [21]. В дальнейшем, после демонтажа агрегатов ГТ-25 – 700 ЛМЗ, которые отработали свой ресурс, такая же система была применена на машинах ГТ-35 ХТЗ.

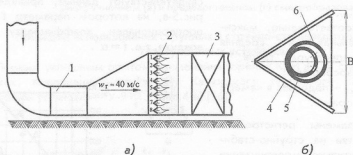


Рис.6. Схема установки БДУ с подогревателем сетевой воды (ПСВ) в газоходе ГТУ (а) и сечение блока диффузионно-стабилизаторной горелки (б) [20]:

- 1 – газоход ГТУ;
- 2 – блок горелок;
- 3 – подогреватель сетевой воды;
- 4 – V-образный стабилизатор (В – ширина стабилизатора);
- 5 и 6 – внутренний и внешний топливные коллекторы

Как показали результаты экспериментальных исследований [9] и доводочных работ [20, 21], такие горелки (рис.6-б) эффективно работают в потоке забалластированного подогретого воздуха при подогреве выхлопных газов ГТУ в диапазоне  $\Delta t_{\text{под}} = 30 \dots 150^\circ\text{C}$  и имеют следующие преимущества: простую конструкцию, технологию изготовления и монтажа;

высокую ремонтоспособность, низкий уровень потерь давления, возможность наращивания тепловой мощности БДУ за счет модульного изготовления (рис.6-б) и применения рамповой компоновки в газоходе ГТУ (рис.6-а).

Еще более эффективным является использование в составе БДУ струйных горелок линейного типа (рис.2-б), два

типоразмера которых успешно прошли Государственную аттестацию.

Характерной особенностью данной технологии является исполнение принципа модульности, что обеспечивает широкий спектр компоновочных решений, в том числе применение рамповой схемы, наиболее целесообразной для газохода ГТУ, а также практическое неограниченное "тиражирование" мощности горелочных систем, набранных на основе отдельных типовых модулей СГЛ-15 и СГЛ-50 (тепловой мощностью 0,17 и 0,7 МВт).

В случае использования выносных подтопочных устройств (ВПУ) в результате совместных разработок КПИ и ОАО "Укргазпроект" [19] были успешно реализованы струйные горелки типа СГ (рис.2-а), которые хорошо себя зарекомендовали в составе промышленных теплогенераторов и термokatалитических реакторов очистки вредных промышленных выбросов. Такие горелочные системы (в одиночном или кассетном исполнении) эффективно работают на неподогретом воздухе, обеспечивая его подогрев на  $\Delta t_{max} = 100...600$  °С и более, имеют простую конструкцию, технологию изготовления и монтажа, а также проведения ремонтного обслуживания. Этим горелкам свойственна высокая надежность эксплуатации, малая металлоемкость, широкий диапазон устойчивой работы, высокий уровень выгорания топлива, низкий уровень эмиссии оксидов азота и незначительные потери давления по воздушному тракту. При проведении Государственной аттестации горелок СГ-40 и СГ-100 (с установленным номинальным расходом газа, соответственно, 39 и 95 м<sup>3</sup>/ч) получены следующие энерго-экологические показатели:  $q_g \approx 0,1$  %,  $CO^I = 0,01$  % об.,  $NO_x^I \approx 122$  мг/м<sup>3</sup> (для горелки СГ-40) и  $q_g \approx 0,12$  %,  $CO^I = 0,04$  % об.,  $NO_x^I \approx 50$  мг/м<sup>3</sup> (для горелки СГ-100).

Впервые форсированная система утилизации энергии на основе использования выносных подтопочных устройств была разработана ОАО "Укргазпроект" в составе ГПА ГТК-10-4 НЗЛ. Использование выносного подтопочного устройства с горелками типа СГ для аварийного или резервного теплоснабжения позволяет сократить в 4 раза капиталовложения по сравнению с аналогичной по тепловой производительности котельной и способствует обеспе-

чению бесперебойного теплоснабжения при остановках ГТУ.

Характерной особенностью рабочего процесса горелок диффузионно-стабилизаторных и струйных с конической и линейной компоновкой элементов является возможность их эффективной эксплуатации при высоких и переменных избытках окислителя, что препятствует их применению в составе блоков горелочных устройств при стехиометрических условиях. В этом случае наиболее эффективной технологией дожига является трубчатая технология, разработанная НТУУ «КПИ» при участии Института газа НАН Украины и ОАО "Укргазпроект" [14,15,25,26]. Данная технология не имеет аналогов в практике сжигания топлив, в основу которой положено использование аэродинамических эффектов канала с внезапным расширением<sup>1</sup> с диффузионным (касательная подача струй топлива к струе воздуха или окислителя), предварительным (радиальная подача струй топлива в поток окислителя) и комбинированное смесеобразование. Совокупность одиночных трубчатых элементов создает регулярную, сотовую структуру факелов, что позволяет размещать такие элементы в газоходах любой конфигурации. При этом достигаются минимальные энергетические потери, реализуется требование эффективного сжигания топлива при низких ( $\alpha \rightarrow 1,0$ ) и высоких избытках воздуха (или окислителя) за счет комбинированного смесеобразования, достигается снижение эмиссии токсичных NO<sub>x</sub> за счет прямооточности и гомогенизации зоны горения.

#### Применение горелок трубчатого типа при реабилитации газоперекачивающих агрегатов (ГПА) на компрессорных станциях магистральных газопроводов

Универсальные свойства горелок трубчатого типа способствуют эффективному их использованию в автономных теплоцентрах децентрализованного теплоснабжения, при реконструкции горелочных устройств паровых и водогрейных котлов и при создании (или модернизации) камер сгорания ГТУ. В этом плане показательными являются научно-исследовательские и опытно-конструкторские разработки, выполненные КПИ совместно ОАО "Укргазпроект"

<sup>1</sup> Концентрации NO<sub>x</sub> и CO приведены к  $\alpha = 1,0$ .

по модернизации камеры сгорания ГПА ГТК-10-4, результатом которых стала замена штатных вихревых горелок на прямоточные трубчатые горелки. В результате сравнительных испытаний данного ГПА до и после модернизации установлены положительные эффекты от применения трубчатых горелок в направлении повышения надежности ГПА, улучшения ее энергетических и экологических показателей. В том числе среди показателей надежности эксплуатации отмечается: безотказность и "мягкость" запуска при использовании штатной дежурной горелки; высокая эффективность работы камеры сгорания во всем диапазоне режимов эксплуатации при использовании штатной системы регулирования ГПА; рост коэффициента избытка воздуха в камере сгорания ГПА (приблизительно на 10 %) при одинаковой эффективной мощности и создание однородной термической структуры потока, что способствует снижению среднего температурного уровня и улучшению термического состояния элементов конструкции камеры сгорания; улучшение равномерности поля температур газов и снижение уровня максимумов температур перед турбиной высокого давления (ТВД), что способствует снижению термо-механических напряжений в лопаточном аппарате ТВД при одинаковой эффективной мощности и созданию запаса по эффективной мощности ГПА при фиксированной максимальной температуре перед ТВД; снижение уровня температур газов за турбиной низкого давления (ТНД), что способствует снижению термических напряжений в элементах конструкции регенератора.

По технико-экономическим показателям ГПА выявлены следующие преимущества: уменьшение необратимых потерь энергии в камере сгорания за счет: сниженного аэродинамического сопротивления трубчатых горелок в сравнении с регистровыми и уменьшения термического сопротивления камеры сгорания за счет снижения среднего уровня температур; повышение равномерности поля температур и однородности аэродинамической структуры потока продуктов сгорания перед ТВД и снижение уровня температур газов за ТНД. Все это способствует повышению эффективности камеры сгорания ГПА, повышению к.п.д. лопаточного аппарата ТВД, снижению

аэродинамического сопротивления регенератора и протечек компрессорного воздуха в нем.

По результатам приемочных испытаний установлена суммарная экономия топливного газа в сравнении с исходным вариантом эксплуатации ГПА (рис.7).

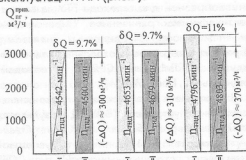


Рис.7. Диаграмма уровней расходов топливного газа на привод ГПА ГТК-10-4 при различных оборотах ТНД в исходном (I) и в модернизированном (II) варианте эксплуатации

Достигнут уровень снижения расхода топлива  $\delta Q = (-\Delta Q/Q) \cdot 100\%$  порядка 10 % (рис.7), что при сравнимой эффективной мощности ГПА определяет повышение соответствующего КПД приблизительно на 3 %. Кроме того, зафиксировано при проведении испытаний снижение эмиссии оксидов азота (NOx) в 2.8 раза (в сравнении со штатным вариантом камеры сгорания с регистровыми горелками) и на 30 % (в сравнении с таким же вариантом камеры сгорания и патрубками локального дозированного вдува воздуха) при уменьшенном уровне эмиссии оксида углерода (CO) в продуктах сгорания.

### Выводы

Проблема повышения эффективного использования газового топлива особенно актуальна для энергетики и промышленности Украины в связи с ограниченностью запасов природного газа собственных месторождений и "газовым кризисом", связанным с существенным ростом цены на данный природный энергоноситель.

Смягчение данной проблемы и ее разрешение возможно в нескольких направлениях:

- за счет модернизации действующих ГПА при реконструкции камер сгорания на основе использования трубчатой технологии сжигания топлива КПИ, а также на основе



использование данной технологии во вновь создаваемых ГПА;

- за счет применения форсированных систем когенерации энергии на выходе ГТУ на основе использования разработанных НИО проблем горения НТУУ "КПИ" струйных и диффузионно-стабилизаторных технологий сжигания топлив;
- на базе развития децентрализованного теплоснабжения с использованием автономных теплоцентров различного типа, созданных с использованием трубчатой технологии сжигания топлив;
- на основе "замещения" природного газа другими горючими газами природного, промышленного и искусственного происхождения, к числу которых относятся шахтный метан и шахтные вентиляционные выбросы, метаносодержащие газы, разбавленные инертными (балластными) примесями ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  и воздухом), горючие газы промышленного происхождения (доменный, генераторный), био-газ и др. в промышленности и коммунальном хозяйстве с использованием передовых технологий сжигания топлив НТУУ "КПИ".

### Литература

1. Христин В.А. К вопросу о применении в авиационных газотурбинных двигателях камер сгорания испарительного типа // Сб. научн. трудов «Газодинамика и теплопередача», Выпуск 1.- К.: КИАГА, 1964.- С. 74 – 87.
2. Христин В.А., Любчик Г.Н. Интенсификация диффузионного сжигания газа // Энергетика и электротехническая промышленность.- 1962.- №2.- С.24-26.
3. Христин В.А., Любчик Г.Н. Новый метод организации диффузионного сжигания газа // Газовое дело.- 1962.- № 11.- С. 41-43.
4. Христин В.А., Любчик Г.Н. Диффузионное горение газовых струй, взаимодействующих с поперечными воздушными струями // Теория и практика сжигания газа.- Л.: Недра, 1964.- Вып. II.- С. 79-91.
5. Христин В.А., Любчик Г.Н. Исследование некоторых закономерностей развития диффузионной горящей газовой струи в турбулентном следе трехмерного стабилизатора // Вестник КПИ. Серия теплоэнергетики.- К.: КГУ, 1964.- № 1.- С. 30-39.
6. Христин В.А., Любчик Г.Н. Высокофорсированное сжигание газа при переменных избытках воздуха.- М.: Труды института им. П.И. Баранова, 1965.- 3 252.- 11 с.
7. Христин В.А., Любчик Г.Н. Струйно-стабилизаторные горелочные устройства и их применение в энергетике и промышленности // Доклады XI Международного газового конгресса.- М.: 1970.- 19 с.
8. Христин В.А., Любчик Г.Н. Газогорелочные устройства для сжигания газа при высоких и переменных избытках воздуха.- М.: ВНИИгазпром, 1977.- 59 с.
9. Бутовский Л.С., Грановская Е.А., Любчик Г.Н., Христин В.А. Исследование закономерностей выгорания топлива за уголковыми и плоскими стабилизаторами пламени // Теория и практика сжигания газа.- М.: Недра, 1975, вып. VI.- С. 324-338.
10. Любчик Г.Н. и др. Фронтное устройство для высокотемпературных камер сгорания // Реферативная информация о законченных научно-исследовательских работах в вузах УССР.- К.: Высшая школа, 1973.- Вы. VII.- С. 6-7.
11. Любчик Г.Н., Христин В.А., Иванникова Л.В. и др. Струйные горелки для сжигания жидкого и газообразного топлива // Науч. достижения, Вып. 6, 1990.- С. 31-34.
12. Марковский А.В., Любчик Г.Н., Плюнова Л.В., Родичев О.Ю. Горелочное устройство модульного типа в установках термического и термokatалитического обезвреживания // Термическая и термokatалитическая очистка газовых выбросов в атмосферу.- К.: Наукова думка, 1984.- С. 123-127.
13. А.С № 877233 (СССР), Газовая горелка / Г.Н. Любчик, В.А. Христин, Г.С. Марченко.- Б.И. 1981, №40.
14. Пат. 34812 Укр., МПК F23D14/02, F23D14/22. Газовый пальник / Г.М. Любчик, Г.С. Марченко. – опубл. 2001, бюл. №2.
15. Любчик Г.М., Марченко Г.С., Варламов Г.Б., Милулін Г.О., Макаренко В.В..

- Левчук С.О. Емісійні характеристики паливників на базі трубчастих модулів // Екотехнології та ресурсозбереження, №1, 2004. – с.73 – 79.
16. Результаты исследований и доводки на природном газе камеры сгорания газотурбинного двигателя ГТУ-9/В.А. Христинич, Г.Н. Любчик, А.З. Пиндрус и др. // Теплоэнергетика.- 1069.- № 3.- С.52-57.
17. Тумановский А.Г. Некоторые пути снижения концентрации оксидов азота в камерах сгорания ГТУ// Теплоэнергетика.- 1973.- №6.- С. 30-33.
18. Христинич В.А., Тумановский А.Г. Газотурбинные двигатели и защита окружающей среды.- К.: Техника, 1983.- 140 с.
19. Макар Р.М., Шелковский Б.И., Любчик Г.Н, Христинич В.А. Энергосбережение и теплоснабжение на объектах транспорта газа // Пром. Теплотехника, т. 14, № 1-3, 1992.- С. 51- 57.
20. Морозов О.В. Горелочные устройства котлов-утилизаторов ПГУ// Энергохозяйство за рубежом, 1986, №5.- С. 13-15.
21. Акулов В.А., Бутовский Л.С., Жемчугов В.И. и др. Испытание блока дожигающих устройств ГТ-25-700 на Якутской ГРЭС//Теплоэнергетика, № 6, 1981. – С.48-51.
22. Любчик Г.Н., Говдяк Р.М., Варламов Г.Б., Шелковский Б.И. Когенерация и утилизация энергии на выхлопе ГТУ// Первая в Украине Международная конференция “Когенерация в промышленности и коммунальной энергетике”. – К., 2004. – С. 219-220.
23. Любчик Г.М., Варламов Г.Б., Говдяк Р.М., Чабанович Л.Б., Шелковский Б.И. Эффективные технологии допалювания топлива у форсованих системах утилізації теплової енергії на вихлопі ГТУ// 36. “Нафта і газ України”.- К.: НАК України. – 2004.- С.159-160.
24. Говдяк Р.М., Шелковский Б.И., Любчик Г.М., Варламов Г.Б. Актуальные проблемы модернизации газотурбинных газоперекачивающих агрегатов// Эко-технологии и ресурсосбережение.- 2003, № 5. – С. 66 – 72.
25. Любчик Г.Н., Варламов Г.Б., Говдяк Р.М., Шелковский Б.И., Микулин Г.А., Левчук С.А. Создание малотоксичных камер сгорания ГТУ // Эко-технологии и ресурсосбережение.- 2003.-№2. - С. 65-74.