

Вестник Евразийской науки / The Eurasian Scientific Journal <https://esj.today>

2023, Том 15, № 5 / 2023, Vol. 15, Iss. 5 <https://esj.today/issue-5-2023.html>

URL статьи: <https://esj.today/PDF/56SAVN523.pdf>

2.1.3. Теплоснабжение, вентиляция, кондиционирование воздуха, газоснабжение и освещение (технические науки)

**Ссылка для цитирования этой статьи:**

Гутник, М. М. Необходимые экспериментальные исследования горелок малоэмиссионных камер сгорания энергетических газотурбинных установок (ГТУ) для обеспечения их надежной эксплуатации / М. М. Гутник, В. Д. Васильев, Л. А. Булысова, И. Н. Белогруд // Вестник евразийской науки. — 2023. — Т. 15. — № 5. — URL: <https://esj.today/PDF/56SAVN523.pdf>

**For citation:**

Gutnik M.M., Vasiliev V.D., Bulysova L.A., Belograd I.N. Necessary experimental studies of burners of low-emission combustion chambers of power gas turbine units (GTU) to ensure their reliable operation. *The Eurasian Scientific Journal*. 2023; 15(5): 56SAVN523. Available at: <https://esj.today/PDF/56SAVN523.pdf>. (In Russ., abstract in Eng.)

**Гутник Михаил Михайлович**

ООО «ЭНПРОС», Дмитров, Россия  
Руководитель направления  
E-mail: m.m.gutnik@mail.ru

**Васильев Василий Дмитриевич**

ООО «ЭНПРОС», Дмитров, Россия  
Технический директор  
E-mail: basbas@mail.ru

РИНЦ: [https://elibrary.ru/author\\_profile.asp?id=646716](https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=646716)

**Булысова Людмила Александровна**

ООО «ЭНПРОС», Дмитров, Россия  
Научный руководитель, заместитель генерального директора  
Кандидат технических наук  
E-mail: bulysov@mail.ru

РИНЦ: [https://elibrary.ru/author\\_profile.asp?id=742875](https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=742875)

SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=35204754200>

**Белогруд Игорь Николаевич**

ФГОБУ ВО «Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации», Москва, Россия  
Профессор Департамента психологии и развития человеческого капитала  
Кандидат технических наук, доктор философских наук, доцент  
E-mail: Kalista00@mail.ru

РИНЦ: [https://elibrary.ru/author\\_profile.asp?id=708463](https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=708463)

## **Необходимые экспериментальные исследования горелок малоэмиссионных камер сгорания энергетических газотурбинных установок (ГТУ) для обеспечения их надежной эксплуатации**

**Аннотация.** В статье авторами проведен анализ рисков, с которыми сталкиваются российские эксплуатирующие энергетические компании в свете санкционной политики и ухода всех крупных иностранных сервисных организаций с российского рынка. Показаны пути развития энергетической отрасли в отсутствии поставок импортных деталей для ремонта и замены. Обозначены потребности в кооперации российских сервисных компаний с научными

институтами отрасли для повышения компетенций и качества ремонтных работ зарубежных газотурбинных установок.

Авторами проанализирован подход к обслуживанию горелочных устройств (ГУ) малоэмиссионных камер сгорания (МЭКС) зарубежных сервисных компаний передовых производителей энергетических газотурбинных установок (ГТУ) активно эксплуатирующихся в России. Рассмотрены этапы сервисного обслуживания горелочных устройств, включающие снятие расходных характеристик топливных каналов, проведения ультразвуковой очистки, неразрушающего контроля и др. для продления ресурса работы и обеспечения надежности. Показаны наиболее вероятные причины, возникающих дефектов в период эксплуатации горелочных устройств (ГУ) и способы их устранения. Продемонстрирована связь между надежной, безаварийной работой ГТУ и качеством проведенного сервисного обслуживания горелок.

Авторы, на примере работ, проводимых отечественной сервисной компанией ООО «ЭНПРОС» показывают необходимость проведения: мониторинга параметров, отражающих состояние горелок, диагностики, профилактических и восстановительных работ в периоды плановых инспекций. Продемонстрированы наиболее сложные проблемы, возникающие из-за малой доступности к большому количеству узлов/компонентов. Отмечено, что основные компоненты газовой турбины имеют ограниченный срок службы по сравнению со сроком службы установки, что приводит к необходимости принятия решений эксплуатирующими организациями относительно замены компонентов или их ремонта. Продемонстрировано, что технологии восстановления компонентов газовой турбины при техническом обслуживании способны минимизировать затраты эксплуатирующих организаций.

**Ключевые слова:** импортозамещение; энергетические ГТУ; малоэмиссионные камеры сгорания; топливные каналы; исследование равномерности подачи топлива; температурное поле; неустойчивость процесса горения; сервисное обслуживание

На сегодняшний день, в условиях санкций и ухода большинства зарубежных сервисных компаний необходимым и критически важным становится поддержание работоспособности и надежности энергетического оборудования. Следует отметить, что санкции на импортное оборудование в перспективе могут создать некоторые проблемы для ремонта и обслуживания такого оборудования. Однако, необходимо учитывать, что последствия будут зависеть от конкретных условий и ограничений, установленных санкциями, а также от возможных альтернативных решений, доступных на рынке. Представляется целесообразным и нам принять ряд мер по снижению негативных последствий в энергетике от возможных нарушений сложившихся ранее хозяйственных связей.

Необходимо учитывать и внешнеэкономические риски.

Нам надо быть готовыми к тому, что санкции могут привести к ограничению или полному запрету на импорт запчастей для импортного оборудования. Это может затруднить или сделать невозможным получение необходимых деталей для ремонта и замены.

Одновременно, ограниченная доступность запчастей может привести к повышению стоимости ремонта импортного оборудования. Если запчасти станут труднодоступными или их цены вырастут из-за санкций, то это может повлиять на общую стоимость ремонта.

Ограниченная доступность запчастей и возможные трудности в получении нужных компонентов, в свою очередь, могут снизить качество обслуживания импортного оборудования. Возможно, придется искать альтернативные решения или использовать

неоригинальные запчасти, что также может повлиять на надежность и эффективность оборудования.

С высокой вероятностью можно ожидать замедление процесса ремонтных и восстановительных работ если потребуется длительное время на получение запчастей или их аналогов из-за санкций. А возможно и к ухудшению качества проводимых работ. В результате компании могут столкнуться с нештатным простоем оборудования и потерями в производственных мощностях.

Для минимизации последствий санкционной политики необходимо наращивать собственный сервис в кооперации с научно-техническими институтами отрасли для повышения его качества и гибкости, а также внедрения инновационных решений. Разберем пример такого подхода ниже.

При работе энергетических газотурбинных установок (ГТУ) на газообразном и жидком топливе в малоэмиссионном диапазоне нагрузки основной расход топлива подводится на горелки предварительного смешения. Во избежание неравномерности температурного поля на выходе камеры сгорания важно, чтобы топливо равномерно распределялось по этим горелкам. При сжигании газообразного топлива, конструктивной особенностью типовых горелок предварительного смешения является наличие в лопатках завихрителя отверстий малого диаметра (0,8...1,5 мм) для подачи газа. В ходе эксплуатации ГУ происходит образование химических отложений внутри топливных каналов и отверстия малого диаметра легко засоряются, из-за чего уменьшаются их проходные сечения. Такие засоры приводят к нарушению равномерности подачи топлива как внутри отдельной горелки, так и общее распределение расхода топлива между горелками всей камеры сгорания (КС). Схожая проблема возникает и в жидкотопливных горелочных устройствах — центробежных форсунках, форсунках аэроаспыла и каналах подвода топлива.

Неравномерное распределение топлива влияет на процесс горения: создает неравномерность температурного поля на выходе из камеры сгорания, увеличивает эмиссии оксидов азота и ухудшает полноту сгорания топлива, вызывает перегрев деталей камеры сгорания и турбины. Кроме того, неравномерное распределение расхода топлива влияет на стабильность процесса горения, что может приводить к повышенным пульсациям давления в КС (автоколебаниям), срывам или проскокам пламени в зону предварительного перемешивания горелки. Нарушение рабочего процесса горения приводит к снижению фактической мощности и сокращению ресурса элементов камеры сгорания и турбины, что негативно сказывается на расходах генерирующих компаний.

На сегодняшний день в России эксплуатируется большой парк импортных ГТУ камеры сгорания которых имеют средние габаритные размеры и съемные горелочные устройства. К ним относятся ГТУ типа SGT-700 и SGT-800 (фирма производитель Сименс); АЕ64.3А (фирма производитель Ансальдо); GE6FA (6F.03) (фирма производитель Дженерал Электрик). Также, на рынке РФ, присутствует объемный парк ГТУ большой мощности, имеющих большие габаритные размеры ГУ, такие как ГТЭ-160 (компания –разработчик Сименс SGT5-2000E). Камера сгорания ГТЭ-160 выносная, состоящая из двух секций, каждая из которых имеет 8 горелок в одной сборочной единице (габаритные размеры одной сборочной единицы: ~2 метра в диаметре и 1 метр в высоту).

Перечисленные выше зарубежные передовые производители ГТУ для обеспечения надёжной и безопасной эксплуатации горелок камер сгорания предусматривают при сервисном обслуживании проводить исследования по идентичности комплекта горелок по их расходным характеристикам. Равномерность подачи топлива должна обеспечить равномерное его сжигание в объеме камеры сгорания и поддержание заданной эпюры поля температуры на входе в ICA [1].

В процессе эксплуатации, из-за образования отложений внутри топливных каналов, изменяется рабочий процесс горения и, как следствие, это приводит к нарушению требуемых параметров ГПА.

Рассмотрим подходы к решению данной проблемы известными производителями ГТУ.

Так, компанией GE для поддержки парка газовых турбин разработаны современные технологии ремонта компонентов.<sup>1</sup> Одним из таких компонентов являются горелки камер сгорания и их обвязывающие элементы (топливные подводы, топливные коллектора, форсунки и т. п.). Глобальная сеть сервисного центра GE ремонтирует все типы топливных горелок и форсунок, от простого газового насадка до многогорелочных фронтальных блоков типа DLN-2.

Развитие систем сжигания от традиционных диффузионных камер сгорания до малоэмиссионных камер сгорания потребовала разработки новых ремонтных технологий, которые были внедрены в сервисных центрах. Эти ремонтные работы обеспечивают восстановление топливных форсунок, отвечающих требованиям к деталям — размеры каналов и сопел, чистота и шероховатость поверхностей, отклонения расходов потока воздуха и топлива в соответствии с производственными спецификациями. Также, сервисные центры GE поддерживают широкий ассортимент расходных деталей, таких как уплотнения, прокладки и контровки для всех типов топливных форсунок, что ускоряет процесс технического обслуживания.

Продувочные испытания газовых насадков, форсунок и их топливных каналов имеют решающее значение для эксплуатации, особенно для трубчато-кольцевых камер сгорания. Очень важно, чтобы одно и то же количество топлива проходило через каждое отверстие/сопло горелочного устройства из комплекта газотурбинного двигателя [2–5].

Уравновешенный расход топлива сводит к минимуму разброс температуры газа, измеренный с помощью термопар на выхлопе ГТУ, а также различия давления между жаровыми трубами камеры сгорания. Испытания по определению расходных характеристик проводятся на автоматизированных стендах. Испытание воздушных и газовых каналов горелки проводится сжатым воздухом, а каналов жидкого топлива — водой.

В испытательном оборудовании для определения расхода используется компьютерная система, которая вычисляет процентное отклонение значения для каждой горелки из комплекта. Удовлетворительное отклонение между горелками обычно ограничивается дисперсией менее 2–3 %. Все накопленные данные по расходным характеристикам сохраняются в архиве.

Компания GE проводит для заказчика продувочные испытания, а также химический анализ проб отложений, отобранных из топливных каналов горелок, что помогает выявить дополнительные проблемы, связанные с подготовкой и качеством топлива. После разборки детали горелочных устройств очищаются с помощью ультразвукового оборудования или гидроабразивной очистки. Затем детали проходят процесс неразрушающего контроля, топливные каналы проверяются на герметичность.

В соответствии с техническими требованиями и требованиями к обеспечению качества в Siemens разработан процесс химической очистки элементов горелки, предназначенный для предотвращения повреждения их поверхностей и внутренних каналов.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> K.J. Pallos «Gas Turbine Repair Technology» GE Power Systems, GER-3957B, 04/01, p. 26.

<sup>2</sup> Ultrasonic cleaning and testing — for better performance and greater efficiency // <https://www.siemens.com/energy/field-service-fossil>.

Опыт эксплуатации кольцевых камер сгорания показал специалистам Siemens, что образование отложений на горелках зависит от топлива, от условий окружающей среды и условий работы. Они выявили, что засоры топливных каналов и отверстий подачи влияют на эффективность эксплуатации, в том числе приводят к:

- появлению горячих/холодных пятен из-за карбонизации и сернистых отложений;
- неустойчивости процесса горения;
- потери мощности;
- увеличению сбоев (аварийных остановов).

Измерения расхода до и после очистки, проводимые специалистами Siemens, показывают ее эффективность. Обеспечивает проверку того, что процесс очистки не повлиял на ухудшение работы газовой турбины.

По измерениям расхода специалисты Siemens оценивают эффективную площадь и ее отклонение от среднего значения для комплекта горелок. Это позволяет им контролировать процесс очистки и предотвратить повреждение горелок. Документация по измерению расходов до и после очистки дает сервис-инженерам Siemens важную информацию для оценки технического состояния горелок и выработки рекомендаций по их обслуживанию.

Опыт Siemens показал, что очистка горелок без предварительной термообработки во многих случаях не дает нужного результата. Процесс организован так, чтобы удалить органические остатки, особенно с внутренней стороны очищаемых деталей. Эти остатки могут быть, например, смазкой, маслом, охлаждающей жидкостью, консервантами или остатками от горения — элементарной серой, которые часто трудно удалить. Детали нагревают в печи, выдерживают установленное время, а затем охлаждают в контролируемом процессе.

Горелки очищаются и промываются в несколько стадий. Для максимального эффекта Siemens обычно проводит два цикла очистки. Результаты подтверждаются последующим измерением расходов.

Совместно созданная Mitsubishi Heavy Industries, Ltd. и Hitachi, Ltd. компания Mitsubishi Hitachi Power Systems, Ltd. (MHPS) аналогично, как и другие производители ГТУ, обеспечивает качественные и надежные ремонтные решения.<sup>3</sup> Одна из ключевых целей специалистов MHPS состоит в том, чтобы свести к минимуму сроки ремонта и увеличить срок службы компонентов при плановом и аварийном сервисном обслуживании для широкого круга производителей. В MHPS применяются отработанные технологии ультразвуковой и химической чистки при ремонте компонентов газовой турбины.

Изучив опыт зарубежных сервисных компаний, ООО «ЭНПРОС» разработало свою методику сервисного обслуживания ГУ МЭКС ГТУ зарубежных производителей, таких как GE, Siemens, Ansaldo и др. Разработало и изготовило установки для измерений расходных характеристик топливных каналов ГУ разного типа — размера и очистки топливных каналов от загрязнений и засоров [6–8].

На примере горелочных устройств ГТУ типа АЕ 64.3А продемонстрируем этапы работ по восстановлению их расходных характеристик.

Горелочное устройство ГТУ типа АЕ 64.3А показано на рисунке 1 [9]. ГУ оснащено центральной пилотной горелкой и горелкой предварительного смешения, которые позволяют работать как на жидком, так и на газообразном топливе. Пилотная горелка содержит запальник

<sup>3</sup> GAS TURBINE FIELD SERVICE // Mitsubishi Hitachi Power Systems, Ltd. // <http://www.mpsHQ.com/gas-turbine-service.html>.



(эл. свеча) для розжига КС. Каналы подачи топлива для предварительного перемешивания (ПП) топливовоздушной смеси (ТВС) подведены в лопатки завихрителей. Это позволяет снизить вероятность несанкционированного воспламенения ТВС и обеспечивает оптимальное смешение топлива и воздуха, поступающего в диагональный завихритель. Для работы на жидком топливе используются специальные форсунки, которые расположены за диагональным завихрителем. Струя жидкого топлива распыляется потоком подаваемого воздуха, капли испаряются и смешиваются с воздухом.

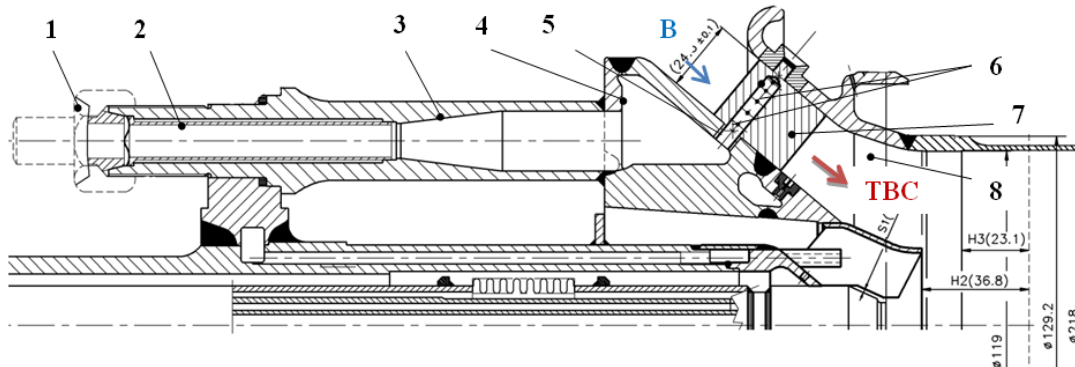
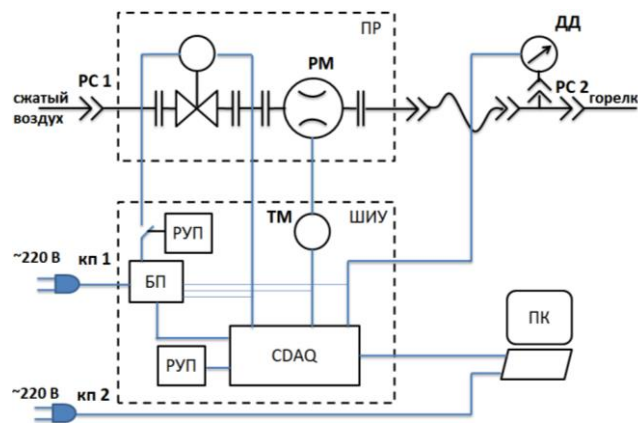


Рисунок 1. Горелка предварительного смешения<sup>4</sup>

Топливо на горелку предварительного смешения подаётся через штуцер 1. Далее через вставку-втулку 2 поступает по трубке 3 в кольцевой коллектор 4, после чего, попадая в канал 5, расположенный в лопатке завихрителя, раздаётся через топливораздающие отверстия 6. Воздух подаётся на вход диагонального завихрителя 7, состоящего из 18 лопаток. Перемешиваясь с топливом в зоне смешения 8, ТВС поступает в объём ЖТ. Топливораздающие отверстия расположены по 5 штук на корыте и спинке лопатки завихрителя.

Для получения расходных характеристик горелок была разработана специалистами ООО «ЭНПРОС» измерительная установка, показанная на рисунке 2, в состав которой входит измерительное и регулирующее оборудование.



PC1 — разъёмное соединение для подключения армированного шланга к компрессору; PC2 — разъёмное соединение для подключения датчика измерения давления; PM — расходомер Micro Motion CMF; ДД — датчик измерения давления; РУП — реле управления подвижкой; ТМ — трансмиттер Micro Motion 1700; БП — блок питания; CDAQ — Программируемый контроллер National Instruments Compact DAQ; ПК-персональный компьютер с установленным программным пакетом LabView; ШИУ — шкаф измерений и управления; КП — кабель питания

Рисунок 2. Схема измерительной установки (разработано автором)

<sup>4</sup> Газовая турбина Ansaldo Energia V64.3A. Руководство по эксплуатации и техническому обслуживанию.

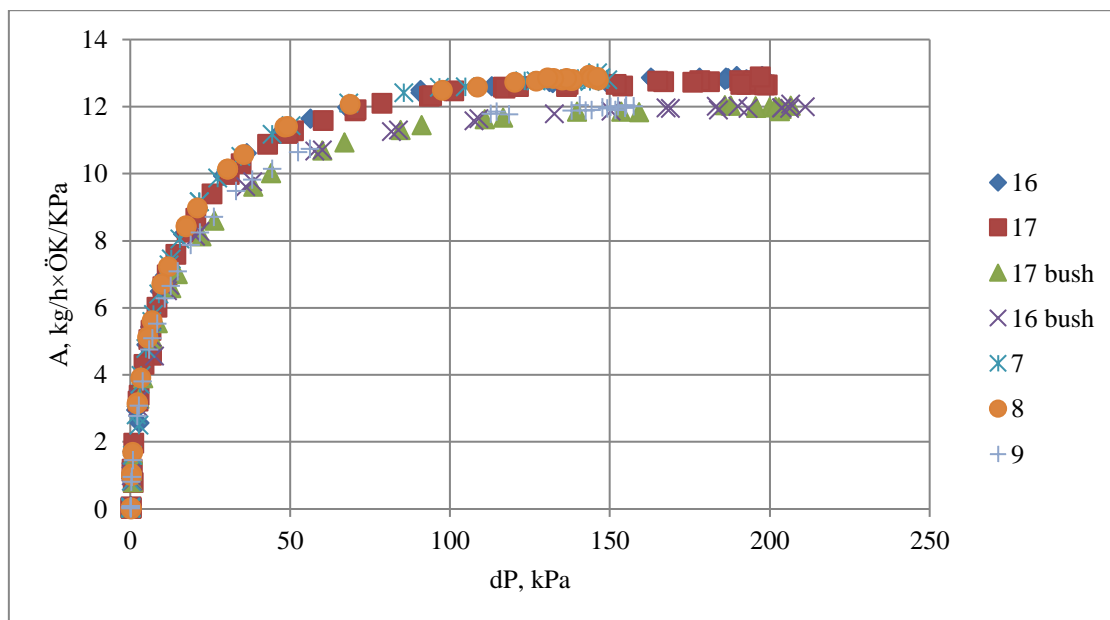
Для проведения анализа пропускной способности топливных каналов ГУ был выбран безразмерный расход воздуха ( $A$ ), определяемый по формуле (1)<sup>5</sup>:

$$A = \frac{G\sqrt{T}}{P}, \quad (1)$$

где  $G$  — массовый расход подаваемого воздуха [кг/час];  $T$  — температура воздуха [K];  $P$  — давление воздуха (абсолютное) на входе в канал [кПа].

При достижении скорости воздуха в наименьшем сечении (проходной площади) узла равной скорости звука, т.е. при достижении критического давления воздуха в нем, безразмерный расход воздуха становится константой и при дальнейшем увеличении давления не меняется ( $A = \text{const} = A_{\text{кр}}$ ).

На рисунке 3 приведен пример зависимостей безразмерного расхода воздуха от перепада давления воздуха на горелках предварительного смешения. Из рисунка 3 видно, что при достижении перепада давления на топливном канале 150–160 кПа значение приведенного расхода становится постоянным, т.е. достигается критическое истечение. Соблюдение данного условия гарантирует большую точность измерения и удобно для анализа и сравнения ГУ.



**Рисунок 3.** Зависимости безразмерного расхода воздуха от перепада давления воздуха на горелках предварительного смешения со втулкой в топливном подводе горелки и без нее (разработано автором)

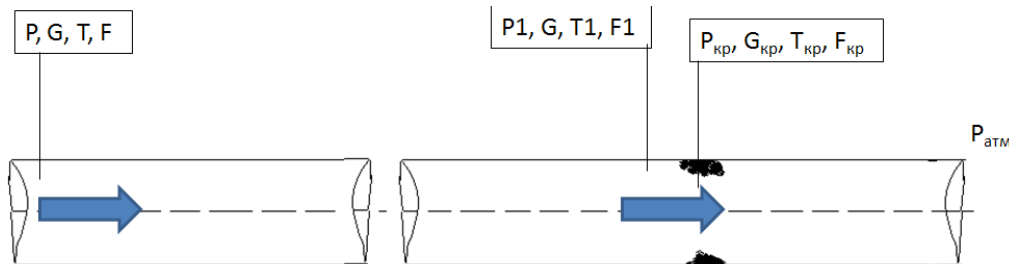
Для определения минимальной условной проходной площади узлов (топливных каналов, топливных трубок) были взяты режимы критического истечения воздуха через них. Было принято, что минимальная условная площадь в этом случае будет равна критической ( $F_{\text{кр}}$ ).

Ниже приведены уравнения, справедливые для критического истечения газа через узел. Для примера можно рассматривать узел подводящей топливной трубки к горелке, схематично изображенный на рисунке 4.

Поток воздуха под давлением  $P$  и температурой  $T$  поступает в топливную трубку с расходом  $G$ . Проходная площадь сечения в месте вдува воздуха равна  $F$ . Далее воздух движется по трубке, которая имеет места перегибов и соединений. Известно, что наименьшее сечение трубки приходится на места засоров (топливный канал) или сварного шва (топливная трубка),

<sup>5</sup> Техническая термодинамика под. ред. д.т.н. проф. В.И. Крутова, издательство "Высшая школа", Москва 1971 г.

находящегося на некотором удалении от места вдува воздуха и установленных замеров. Пусть перед сварным швом (минимальным сечением) параметры потока будут следующие: давление потока  $P1$ , температура потока  $T1$ , площадь сечения трубки  $F1$ . Массовый расход, следуя уравнению неразрывности<sup>6</sup>, сохранится неизменным и равным  $G$ .



**Рисунок 4.** Качественная схема подводящей топливной трубки к горелке (разработано автором)

Потери на участке от входного сечения до сечения 1 равны  $dP$ :

$$dP = \frac{P - P1}{P} \quad (2)$$

тогда давление в сечении 1 будет равно:

$$P1 = P \cdot (1 - dP). \quad (3)$$

При достижении критического отношения давлений воздуха будет выполняться следующее соотношение:

$$\frac{P_{кр}}{P1} = \beta_{кр}. \quad (4)$$

Для воздуха  $\beta_{кр} = 0,528$ .

Плотность газа в сечении 1:

$$\rho_1 = 1,293 \cdot \frac{273}{T1} \cdot \frac{P1}{101312}. \quad (5)$$

Удельный объем в сечении 1:

$$v = \frac{1}{\rho_1}. \quad (6)$$

Критическая скорость будет:

$$w = \sqrt{2 \cdot \frac{k}{k-1} \cdot P1 \cdot v1 \left(1 - \beta_{кр}^{\frac{k-1}{k}}\right)}. \quad (7)$$

$$\varphi = \sqrt{2 \cdot \frac{k}{k-1} \cdot \left(\beta_{кр}^{\frac{2}{k}} - \beta_{кр}^{\frac{k+1}{k}}\right)}. \quad (8)$$

Условная проходная площадь, равная критической  $F$ :

$$F = \frac{G}{\left(\varphi \cdot \sqrt{\frac{P1}{v1}}\right)}. \quad (9)$$

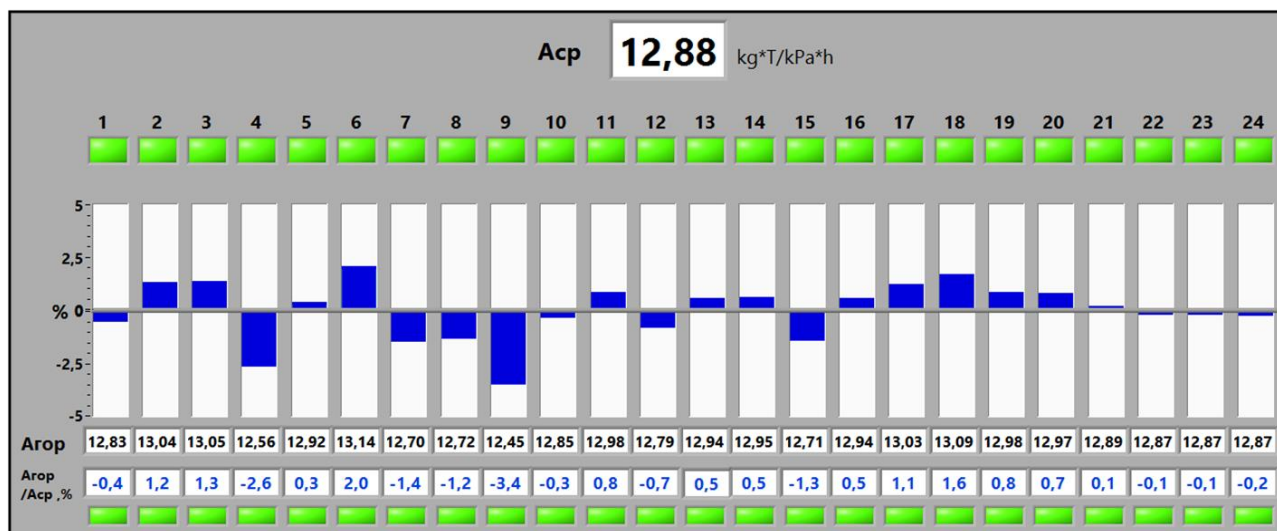
Потери давления  $dP$  от сечения вдува до сечения минимальной площади определяются из эксперимента.

<sup>6</sup> Абрамович, Г.Н. Прикладная газовая динамика / Г.Н. Абрамович; М.: Наука, 1976 г.



Для анализа равномерности подачи топлива через ГУ проводится расчет отклонений приведенных расходов, полученных для каждого канала горелки от среднего значения приведенного расхода по комплекту. Пример диаграммы отклонений приведенных расходов от среднего значения для каналов предварительного перемешивания (премикс) показан на рисунке 5. Из рисунка хорошо видно, что максимальные отклонения расходов от среднего по комплекту составляют плюс 2 % (горелка поз. № 6) и минус 3,4 % (горелка поз. 9).

Для каналов с предварительным перемешиванием топлива и воздуха, данный разброс является опасным и может привести к увеличению  $\text{NO}_x$ , сужению диапазона устойчивой беспульсационной работы, а также, к неравномерности поля температуры перед турбиной, что плохо скажется на температурном состоянии 1СА.



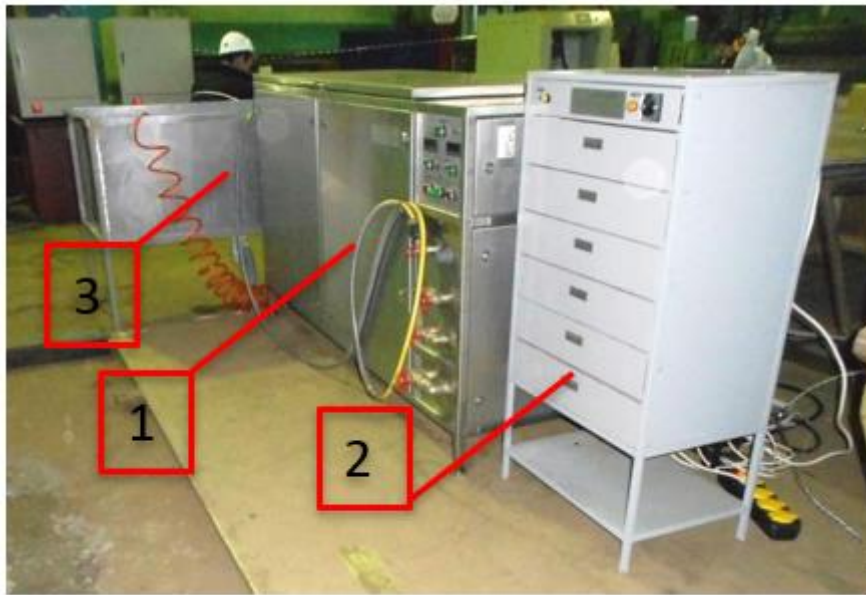
*Рисунок 5. Отклонения приведенных расходов комплекта горелок от среднего (разработано автором)*

Таким образом, для данного комплекта горелок необходимо провести мероприятия по восстановлению расходных характеристик топливных каналов и снижению значений отклонений.

Проанализировав различные способы очистки внутренних полостей ГУ, их топливных каналов и топливораздающих отверстий, специалистами ООО «ЭНПРОС» был выбран, как наиболее эффективный и щадящий — способ ультразвуковой очистки в специальных растворах. Данный способ не наносит ущерб очищаемым поверхностям в отличие от механической очистки, осуществляемой тем или иным способом. Кроме того, механическая чистка затруднительна из-за ограничения доступа к отверстиям в межлопаточном пространстве завихрителя; ультразвуковая очистка является эффективным методом восстановительного ремонта — очистки топливного канала горелки до начального производственного состояния, что позволяет продолжить ее эксплуатацию.

Для подбора моющих растворов необходимо определить состав отложений. Проводимые специалистами ООО «ЭНПРОС» исследования составов отложений в топливных каналах горелок показали, что элементы, характерные для углеводородного сырья и наиболее вероятные для присутствия в составе магистрального газа в качестве загрязнений, составляют не более 7–14 массовых % от других элементов. Таким образом, причина зашлакованности отверстий и каналов в горелочных устройствах может заключаться также в продуктах взаимодействия природного газа и кислорода атмосферного воздуха, поступающего в смесь за счет эжекции, с материалом корпуса и пилонов при высоких температурах длительного нагрева. Выполненный анализ составов отложений позволил подобрать моющие средства.

На рисунке 6 показан комплекс ультразвуковой очистки ООО «ЭНПОС» для сервиса ГУ малого и среднего габаритных размеров.

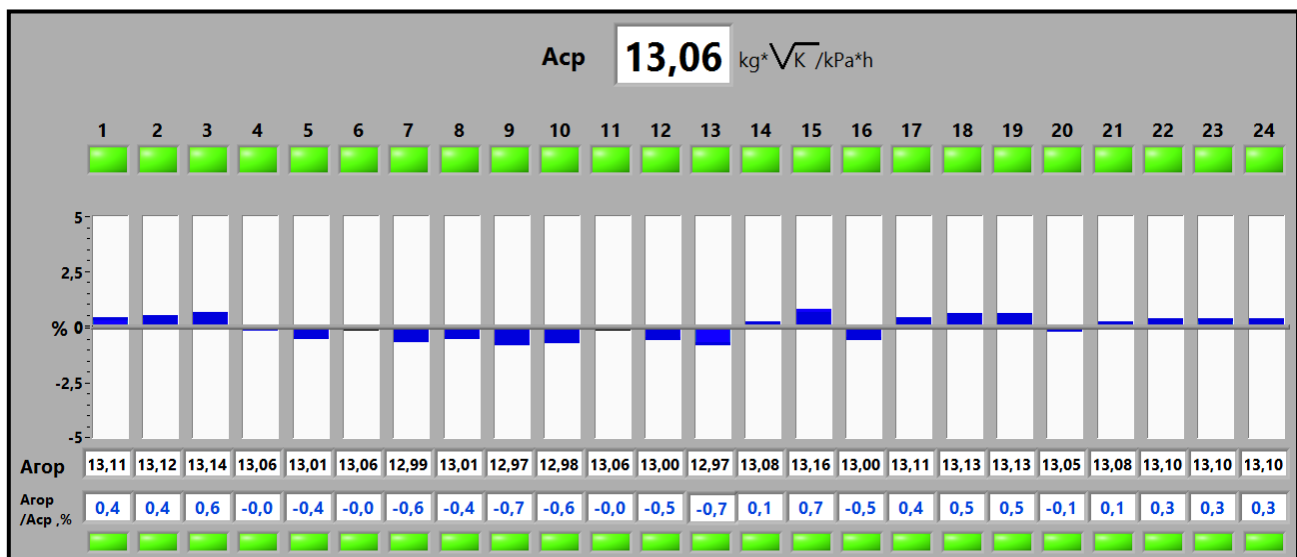


1 — ультразвуковая ванна; 2 — стойка генераторная; 3 — ванна промывочная

**Рисунок 6.** Внешний вид ультразвуковой установки (разработано автором)

Работы по восстановлению расходных характеристик топливных каналов горелок, включают в себя целый комплекс работ: предварительную термическую обработку в печах для удаления органических остатков, особенно изнутри изделий; продувку сжатым воздухом для удаления отслоившихся частиц, поэтапную очистку в УЗ-ванне со специальными моющими растворами, пассивацию и, вновь, продувку сжатым воздухом и высыхание.

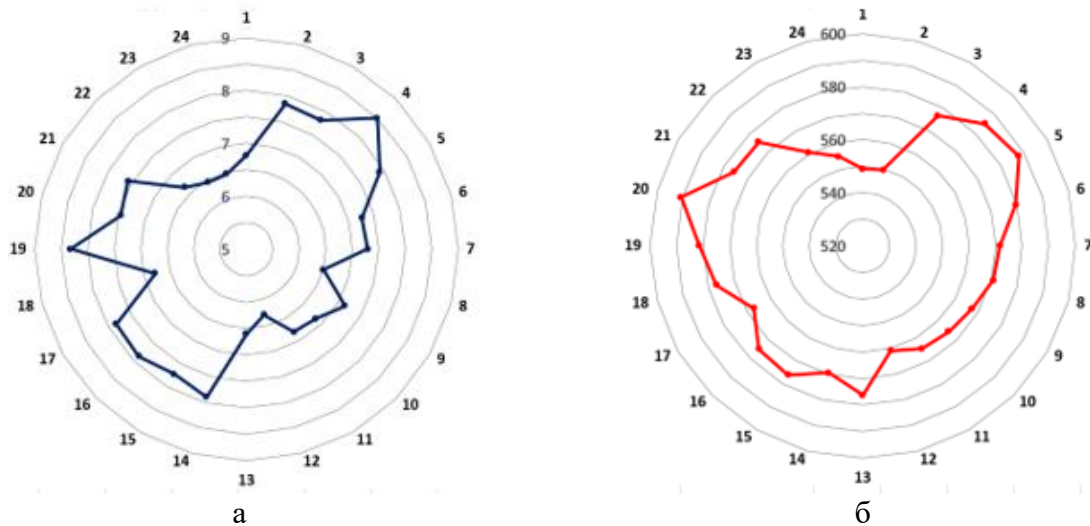
На рисунке 7 показаны результаты испытаний каналов премикс комплекта горелок после очистки.



**Рисунок 7.** Отклонения приведенных расходов от среднего значения для каналов предварительного перемешивания (премикс) (разработано автором)

Сравнивая результаты испытаний, представленных на рисунках 5 и 7, можно заметить, что средний приведенный расход по комплекту после мероприятий по очистке вырос с 12,88

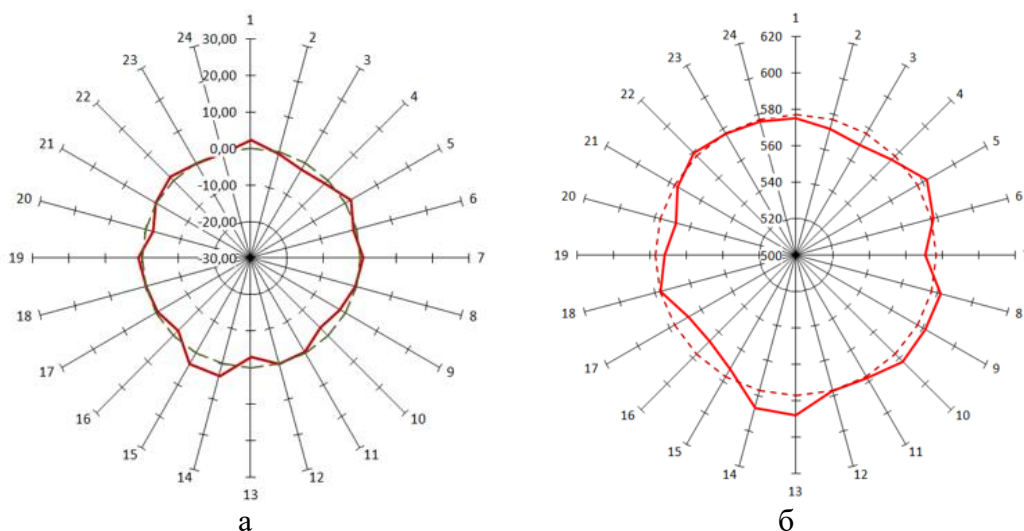




**Рисунок 9.** Графики зависимости: а — приведенного расхода воздуха через каналы премикс ГТУ; б — температуры газов за турбиной (разработано автором)

Необходимо заметить, что существующая неравномерность поступления топлива влияет на распределение воздуха между горелок. В жаровой трубе напротив горелок с большим расходом топлива формируется более интенсивное пламя с большей температурой горения, что приводит к большему термическому сопротивлению потоку поступающего на горелку воздуха. Таким образом, в горелку с большим расходом топлива поступает меньше воздуха для горения, а в горелку с меньшим расходом топлива (забитую) поступает больше воздуха для горения, т. е. температурная неравномерность усиливается, что приводит к еще большим градиентам температуры горения в объеме жаровой трубы камеры сгорания, появлению локальных зон с высокими температурами. Это, в свою очередь приводит к росту эмиссий  $NO_x$ , изменению мест стабилизации пламени, наличию бедных и богатых пламен, что может вызвать виброгорение и привести к аварийному останову ГТУ.

На рисунке 10 показано сравнение диаграмм отклонений приведенного расхода через каналы премикс, замеренных после проведения комплекса работ по ультразвуковой очистке и температуры уходящих газов за турбиной после проведения инспекции, полученные на номинальном режиме работы ГТУ при подаче всего топлива в каналы премикс ГУ.



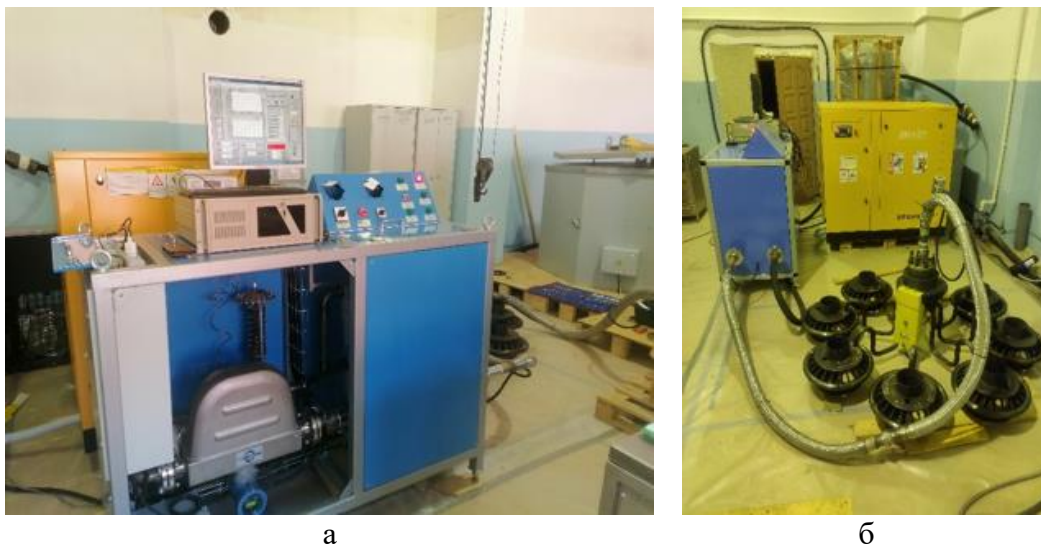
**Рисунок 10.** Графики зависимости: а – отклонений приведенного расхода воздуха через каналы премикс ГТУ; б — температуры газов за турбиной (разработано автором)



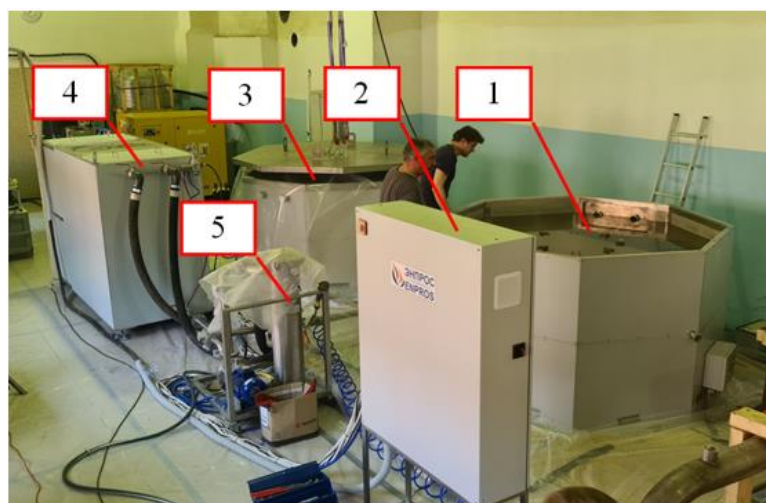
Видно, что при равномерном поступлении топлива через каналы премикс ГУ, поле температуры на выходе из турбины равномерно. Это наглядно демонстрирует эффективность выполненного восстановления расходных характеристик топливных каналов ГУ. Аналогичные результаты получены и для других топливных каналов горелки.

Компания ООО «ЭНПРОС» проводит работы и с большими, неразборными ГУ, такими как камеры сгорания ГТЭ-160 (компания-разработчик Сименс SGT5-2000E). Камера сгорания данной ГТУ выносная, состоит из двух секций, каждая из которых имеет 8 горелок в одной сборочной единице. Габаритные размеры одной сборочной единицы: ~2 метра в диаметре и 1 метр в высоту.

Специалисты нашей компании разработали автоматизированный стенд для снятия расходных характеристик топливных каналов горелок больших габаритных размеров (рис. 11), а также спроектировали и изготовили ультразвуковой комплекс для проведения очисток крупногабаритных деталей, в том числе камеры сгорания ГТЭ-160 (рис. 12).



**Рисунок 11.** Фотографии автоматизированного стенда для диагностики крупногабаритных горелок: а — диагностическая установка; б — процесс замера расходных характеристик с КС ГТЭ-160 (разработано автором)

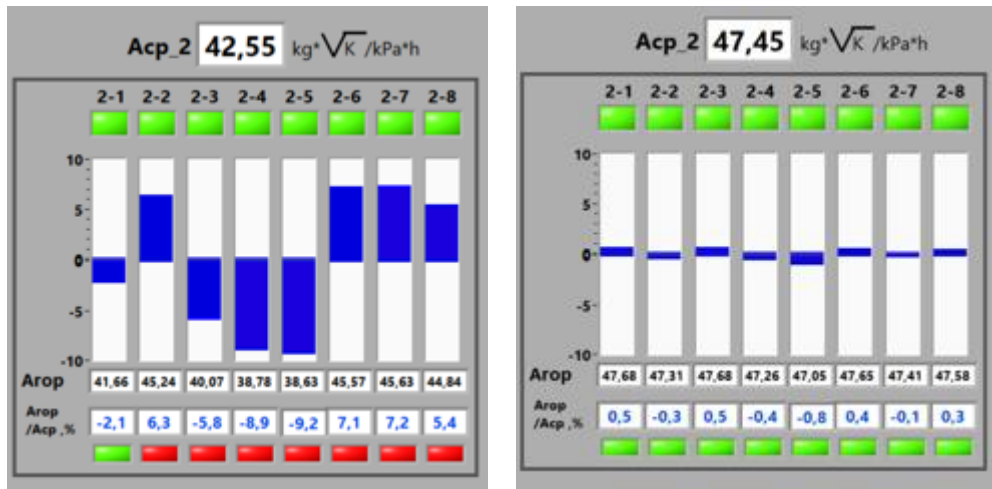


1 — ультразвуковая ванна; 2 — шкаф управления; 3 — ванна промывочная; 4 — бак подготовки моющего раствора; 5 — стойка фильтрации

**Рисунок 12.** Комплекс по ультразвуковой очистке крупногабаритных деталей (разработано автором)



На рисунке 13 показаны диаграммы отклонений приведенных расходов от среднего значения по комплексу диагональных завихрителей нижних газораспределителей левой камеры сгорания до и после комплекса мероприятий по ультразвуковой очистке. А на рисунке 14 их фотографии.



а б  
**Рисунок 13.** Отклонения приведенных расходов диагональных завихрителей нижних газораспределителей левой камеры сгорания: а — до очистки; б — после очистки (разработано автором)



**Рисунок 14.** Фото газораспределителей ГТЭ-160 до и после ультразвуковой очистки (разработано автором)

По результату осмотра внутренних полостей горелок бороскопом до и после ультразвуковой очистки, получено, что в исходном состоянии на наружных поверхностях и во внутренних топливных каналах видны загрязнения — окалина, ржавчина, нагар и хлопья/комки кристаллического вещества серо-белого цвета, в том числе в ряде топливо-раздающих отверстиях газораспределителя в виде плотных засоров.

После проведенной ультразвуковой очистки загрязнения на наружных поверхностях и в топливных каналах горелок отсутствуют. Пропускная способность газораспределителя левой камеры сгорания увеличилась на 10,3 %. Отклонения приведенных расходов по диагональным заверителям снижены с  $\pm 7 \dots 10$  % до допустимых  $\pm 1$  %.

Однако, следует помнить, что отклонение расходной характеристики горелок от среднего значения по комплекту является лишь одним из критериев пригодности ГУ [10]. Использовать только этот критерий неверно. Например, описана ситуация, когда при проверке расходных характеристик 2-х комплектов ГУ 7E был получен одинаковый разброс максимального и минимального значения — 4 %.<sup>7</sup> В первом комплекте отклонения составили: +2,1 % и -1,9 %, во втором — +0,6 % и -3,4 %. Оба комплекта формально проходили по критерию разброса значений отклонений расходных характеристик, но фактически разброс значений во втором комплекте не был приемлем, т. к. все топливные каналы были частично засорены, и их средняя расходная характеристика была существенно занижена относительно проектного значения. Получается, что в этой камере сгорания одна жаровая труба из 14 будет работать при более бедных коэффициентах избытка воздуха, и, соответственно «гаснуть» раньше остальных. Также, отличие давлений в топливных линиях этих камер может привести к развитию неустойчивого процесса горения.

Аналогичные результаты были получены специалистами фирмы Зульцер<sup>8</sup>, когда при испытаниях комплекта из 10 горелок, все горелки имели небольшое отклонение от среднего значения расходной характеристики (не более 0,6 %).<sup>9</sup> Но оценка по отклонению от проектного значения расхода через горелку (и перепада давления через нее) показала, что 9 из 10 горелок не соответствуют проектным параметрам.

Из сказанного выше, следует, что необходимо знать проектные значения расходных характеристик топливных каналов горелок, перепады давления на топливных каналах и при выполнении сервисных работ обязательно сопоставлять результаты диагностических испытаний с исходными значениями. Необходимо выполнять мониторинг изменения расходных характеристик ГУ от инспекции к инспекции для отслеживания ситуации, когда станет не возможным уже выполнить восстановление комплекта, а потребуются его замена на новый.

### Заключение

Для успешного развития импортозамещения в современных условиях необходимо сотрудничество с научно-исследовательскими учреждениями и университетами для поддержки инноваций в энергетической отрасли. Инвестиции в исследования и разработки помогут создать конкурентоспособные продукты и технологии.

Одновременно необходимо налаживать взаимодействие с местными поставщиками и производителями аналогов импортной продукции, чтобы укрепить местную экономику и создать надежные партнерские отношения. Это поможет увеличить доступность и качество местных компонентов и материалов.

Создание собственных производственных мощностей и технологий позволит контролировать качество продукции и улучшить гибкость в отношении изменений спроса и качества оказываемых услуг.

<sup>7</sup> <https://www.ccj-online.com/4q-2013/7f-users-group-workshops-critical-to-professional-development/>

<sup>8</sup> GE Power Systems \_ GER-3957B \_ (04/01).

<sup>9</sup> Richard Vogel, Flow test data and combustion optimization SULZER September, webinar September, 2017.

Сотрудники с высоким уровнем знаний и навыков помогут успешно осуществлять импортозамещение и оказывать услуги на достаточно высоком техническом уровне.

Компания ООО «ЭНПРОС» под руководством технического директора Васильева Василия Дмитриевича успешно развивается и перенимает, и дополняет опыт передовых сервисных компаний зарубежных производителей ГТУ. Наличие высококвалифицированного персонала нашей компании под руководством руководителя направления Гутника Михаила Михайловича позволяет разрабатывать и внедрять в свой сервис оборудование как по диагностике, так и по ультразвуковой очистке. В своих установках мы используем собственное программное обеспечение по сбору и обработки информации в реальном времени.

ООО «ЭНПРОС» внимательно подходит к проблемам своих Заказчиков, готов к гибким не стандартным решениям и индивидуальному подходу.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Gas Turbine Operating Experience With Low BTU Fuels, Ansaldo Energia, ASME Turbo Expo 2004: Power for Land, Sea, and Air, June 14–17, 2004, Vienna, Austria.
2. Song, Y.X. Research on Aeroengine Performance Parameters Forecast Based on Multiple Linear Regression Forecasting Method / Y.X. Song, K.X. Zhang, Y.S. Shi; J. Aerosp. Power 2009, 24, 427–431.
3. Tarassenko, L. Novelty detection for the identification of abnormalities / L. Tarassenko, A. Nairac, N. Townsend, I. Buxton, P. Cowley; Int. J. Syst. Sci. 2000, 31, 1427–1439.
4. Yan, W. Detecting Gas Turbine Combustor Anomalies Using Semi-supervised Anomaly Detection with Deep Representation Learning / W. Yan; Cognit Comput 2020, 12, 398–411.
5. Basseville, M. Monitoring the Combustion Set of a Gas Turbine / M. Basseville, A. Benveniste, G. Mathis, Q. Zhang; IFAC Proc. Vol. 1994, 27, 375–380.
6. Improvement of exhaust temperature distribution during commissioning of gas turbine, International Journal on “Technical and Physical Problems of Engineering” (IJTPE), 2021, Issue 47 Volume 13 Number 2.
7. Extension of Fuel Flexibility by Combining Intelligent Control Methods for Siemens SGT-400 Dry Low Emission Combustion System, Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, Received June 21, 2018.
8. Гутник, М.М. Разработка методики ремонта горелок энергетических ГТУ иностранных производителей в условиях ограниченных поставок узлов / М.М. Гутник, В.Д. Васильев, Л.А. Булысова; Научно-практический журнал «Научно-исследовательские публикации», г. Воронеж, № 3 — 2023 г., стр. 50.
9. Гутник, М.М. Проблемы и возможности в использовании отечественных материалов для теплозащитных покрытий элементов горячего тракта энергетических газовых турбин / М.М. Гутник, В.Д. Васильев, Л.А. Булысова; Научно-практический журнал «Нано-технологии. Наука и производство», № 3, 2023 г.
10. Zhang, Q. Early warning of slight changes in systems / Q. Zhang, M. Basseville, A. Benveniste; Automatica, 1994, 30, 95–113.

**Gutnik Mikhail Mikhailovich**

LLC «ENPROS», Dmitrov, Russia  
E-mail: m.m.gutnik@mail.ru

**Vasiliev Vasily Dmitrievich**

LLC «ENPROS», Dmitrov, Russia  
E-mail: basbas@mail.ru

RSCI: [https://elibrary.ru/author\\_profile.asp?id=646716](https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=646716)

**Bulysova Lyudmila Aleksandrovna**

LLC «ENPROS», Dmitrov, Russia  
E-mail: bulysov@mail.ru

RSCI: [https://elibrary.ru/author\\_profile.asp?id=742875](https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=742875)

SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=35204754200>

**Belograd Igor Nikolaevich**

Financial University under the Government of the Russian Federation, Moscow, Russia  
E-mail: Kalista00@mail.ru

RSCI: [https://elibrary.ru/author\\_profile.asp?id=708463](https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=708463)

## **Necessary experimental studies of burners of low-emission combustion chambers of power gas turbine units (GTU) to ensure their reliable operation**

**Abstract.** In the article, the authors analyzed the risks faced by Russian operating energy companies in the light of the sanctions policy and the withdrawal of all large foreign service organizations from the Russian market. The ways of development of the energy industry in the absence of supplies of imported parts for repair and replacement are shown. The needs for cooperation between Russian service companies and scientific institutes in the industry are identified to improve the competencies and quality of repair work on foreign gas turbine units.

The authors analyzed the approach to servicing burner devices (BD) of low-emission combustion chambers (MEC) of foreign service companies of leading manufacturers of power gas turbine units (GTU) actively operating in Russia. The stages of service maintenance of burner devices are considered, including reading the flow characteristics of fuel channels, ultrasonic cleaning, non-destructive testing, etc. to extend the service life and ensure reliability. The most probable causes of defects that arise during the operation of burner devices (BD) and methods for their elimination are shown. A connection has been demonstrated between the reliable, trouble-free operation of the gas turbine unit and the quality of the burner maintenance performed.

The authors, using the example of research work carried out by the domestic service company ENPROS LLC, show ways to assess the degree of degradation of burner devices, for example, by monitoring the flow characteristics of fuel channels and the temperature field behind the turbine.

The most complex problems arising due to low accessibility to a large number of nodes/components are demonstrated. It is noted that the main components of a gas turbine have a limited service life compared to the service life of the installation, which leads to the need for operating organizations to make decisions regarding the replacement of components or their repair. It has been demonstrated that technologies for restoring gas turbine components during maintenance can minimize the costs of operating organizations.

**Keywords:** import substitution; power gas turbines; low-emission combustion chambers; fuel channels; uniformity of fuel supply; temperature field; instability of the combustion process; after-sales service