РЕСУРСЫ ПОВЫШЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ И ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ТЕПЛОВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

В. А. Пинчук¹, А. В. Пинчук²

¹Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

²Научно-исследовательский центр «ПРОТЕЙ», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

В работе обращается внимание на существование новых, традиционно не учитываемых (в том числе и ранее неизвестных) ресурсов повышения эксплуатационных и технико-экономических показателей тепловых двигателей.

Отмечается, что эксплуатационная надёжность тепловых двигателей могла бы быть увеличена повышением эффективности процессов диагностирования качества рабочего процесса и состояния материальной части двигателя, обеспечиваемыми в том числе включением в состав диагностической информации, отображающей рабочий процесс двигателя электрофизической информации и регистрируемой в первую очередь измерениями в потоке продуктов сгорания за срезом сопла.

В рамках изыскания дополнительных ресурсов для повышения технико-экономических показателей тепловых двигателей обращается внимание на принципиальную возможность дополнительного энергообеспечения рабочего цикла двигателей энергией внутриядерного происхождения. Прогнозируемая результативность и практическая целесообразность использования отмечаемых возможностей обосновываются в том числе и результатами эксперимента.

Практическое использование отмеченных ресурсов требует, однако, дополнительных исследований и может быть обеспечено лишь на базе необходимого организационного, финансового, материального и технического обеспечения.

Ключевые слова: технико-экономические показатели, энергетическая эффективность, эксплуатационная надёжность, техническая диагностика двигателей.

Введение

Уже в настоящее время потребности в расширении народно-хозяйственных задач, решаемых на базе тепловых двигателей (ТД), не могут быть удовлетворены в должной мере из-за несоответствия потребностям их эксплуатационных и технико-экономических показателей (ТЭП). Важно, что факторы, сдерживающие в настоящее время совершенствование ТД, носят в большинстве своем принципиальный характер и не могут быть устранены традиционными способами. Последнее и предопределило собой, по существу, целевое назначение, форму и содержание настоящей работы.

Статья базируется на материалах работ авторов и представляет собой их продолжение и дальнейшее логическое развитие.

1. Эксплуатационная надёжность Тепловых двигателей

1.1. Специфика ситуации

В первую очередь обратим внимание на то, что эксплуатационная надёжность ТД определяется в том числе надёжностью формируемого диагноза о качестве рабочего процесса (РП) и состоянии агрегатов двигателя и обеспечивается, прежде всего, содержательностью используемой в этих целях диагностической информации.

Отметим, к сожалению, что сбор диагностической информации контактными измерительными методами уже изначально предопределяет необходимость нарушения целостности агрегатов и понижение, таким образом, их физической надёжности. Отмеченное же приводит к тому, что диагностирование камер до настоящего времени, например, осуществляют, по сути, в условиях «информационного голода».

Известны материалы, в общем указывающие, что работа двигателя сопровождается формированием электрофизических отображений (ЭФО) его рабочего процесса, регистрируемых в том числе и в потоке продуктов сгорания (ПС) за срезом сопла [1–5]. Слабая изученность механизмов формирования и, прежде всего, содержательности ЭФО до сих пор сдерживает их использование в целях диагностики. Более того, даже успешные попытки подтверждения содержательности ЭФО экспериментальными результатами [6, 7] так и не изменили сдержанное отношение к их использованию.

Таким образом, формируемый [6, 7] подход требует и в настоящий момент дополнительного разъяснения, а возможно, и уточнения.

1.2. Модель механизма формирования ЭФО на стадии истечения

Будем полагать, что содержательность ЭФО, регистрируемых в потоках ПС на стадии истечения из камер, могла бы быть обоснована их обусловленностью внутрикамерными нестационарностями.

Учтём, что продукты сгорания в камере представляют собой термодинамически открытую плазменную систему – смесь взаимодействующих друг с другом нейтральных (a), а также положительно (i) и отрицательно (e) заряженных частиц (трёхжидкостная плазменная модель [6]). Состав плазмы совокупно определим степенью ионизации

$$\alpha = \frac{p_i}{p_a} = \frac{n_i kT}{n_a^0 kT} = \frac{n_i}{n_a^0} \quad (1)$$

и относительным содержанием электронов в её составе

$$\eta = \alpha \cdot (1 + \psi), \quad \psi = (n_e - n_i) / n_i. \quad (2)$$

Систему уравнений в одномерном представлении и в пренебрежении электрическим взаимодействием потока ПС с соплом:

$$m_e n_e \left(\frac{\partial U_e}{\partial t} + U_e \frac{\partial U_e}{\partial x} \right) + \frac{en_e}{\mu_e} (U_e - U_a) + \frac{\partial p_e}{\partial x} - en_e E = 0 \quad (3)$$

$$m_i n_i \left(\frac{\partial U_i}{\partial t} + U_i \frac{\partial U_i}{\partial x} \right) + \frac{en_i}{\mu_i} (U_i - U_a) + \frac{\partial p_i}{\partial x} + en_i E = 0 \quad (4)$$

$$U_\Sigma \left(\eta + \frac{m_i}{m_e} \alpha + \frac{m_a}{m_e} (1 - \alpha) \right) - U_e \eta - \frac{m_i}{m_e} U_i \alpha - \frac{m_a}{m_e} U_a (1 - \alpha) = 0 \quad (5)$$

$$\rho_\Sigma (1 + \eta) - (m_e \eta + m_i \alpha + m_a (1 - \alpha)) \frac{P_\Sigma}{kT} = 0 \quad (6)$$

$$\bar{f} \frac{\partial \rho_\Sigma}{\partial t} + \rho_\Sigma U_\Sigma \frac{\partial \bar{f}}{\partial x} + \rho_\Sigma \bar{f} \frac{\partial U_\Sigma}{\partial x} + U_\Sigma \bar{f} \frac{\partial \rho_\Sigma}{\partial x} = 0 \quad (7)$$

$$\frac{\alpha \eta}{(1 - \alpha)(1 + \eta)} - 6,666799_{10^{-2}} \frac{T^{5/2}}{P_\Sigma} \exp \left(-\frac{eV}{kT} \right) = 0 \quad (8)$$

$$\bar{f} \frac{\partial q}{\partial t} + j_k \frac{\partial \bar{f}}{\partial x} + \bar{f} \frac{\partial j_k}{\partial x} = 0 \quad (9)$$

$$\frac{\partial E}{\partial x} - \frac{e}{\epsilon_0} \frac{\alpha - \eta}{1 + \eta} \frac{P_\Sigma}{kT} = 0 \quad (10)$$

представим уравнения движения электронной (3) и ионной (4) компонент, выражениями для среднемассовой скорости (5) и плотности (6) потока среды, уравнением неразрывности потока (7), аналогом уравнения Саха (8) в представлениях трёхжидкостной модели [6], законом сохранения заряда (9) и уравнением Пуассона (10) для электрической составляющей поля. Связь давления и температуры при изоэнтальпическом истечении учтём как

$$T = T_0 (p/p_0)^{(n-1)/n}. \quad (11)$$

Зависимость для уширения сопла как функции относительного давления в потоке и показателя процесса n определим выражением

$$\bar{f} = \left(\frac{2}{n+1} \right)^{1/(n-1)} \left(\frac{n-1}{n+1} \right)^{0.5} \left[\left(\frac{p}{p_0} \right)^{2/n} - \left(\frac{p}{p_0} \right)^{(n+1)/n} \right]^{-0.5}. \quad (12)$$

Совокупным учётом зависимостей система (3)–(12) приводилась к десяти линейно-независимым уравнениям относительно одиннадцати неизвестных $U_e, U_i, U_a, \rho_\Sigma, U_\Sigma, \alpha, \eta, E, p, f, T$.

1.3. Численный эксперимент

Оценки параметров в невозмущенном внутрикамерными нестационарностями потоке («*»), когда

$$p^*(x) = p_{кр} \left(\frac{p_a}{p_{кр}} \right)^{\frac{x}{L_a}}$$

принимались в качестве начальных условий для расчета:

$$t=0: U_e(x) = U_e^*(x); U_i(x) = U_i^*(x); U_a(x) = U_a^*(x);$$

$$\rho_\Sigma(x) = \rho_\Sigma^*(x); U_\Sigma(x) = U_\Sigma^*(x),$$

$$\alpha(x) = \alpha^*(x); \eta(x) = \eta^*(x); E(x) = E^*(x),$$

где $x \in [0, L_a]$ – линейная координата.

Предположением, что пространственно-временное распределение давления ПС в сверхзвуковой части сопла с учетом возмущающего воздействия камеры отвечает уравнению

$$p(x, t) = \begin{cases} f_1(x, t), & \text{если } t - \int_0^x \frac{dx}{a^*(x) + U_{\Sigma}^*(x)} \geq 0 \\ p^*(x), & \text{если } t - \int_0^x \frac{dx}{a^*(x) + U_{\Sigma}^*(x)} < 0 \end{cases}, \quad (13)$$

а связь между температурой и давлением в потоке – зависимости

$$T(x, t) = T_0 \left(\frac{p(x, t)}{P_0} \right)^{\frac{n-1}{n}}, \quad (14)$$

обеспечивалось замыкание системы.

Здесь

$$f_1(x, t) = p^*(x) \left[1 + c \sin \left(2\pi n_1 f_0 \left(t - \int_0^x \frac{dx}{a^*(x) + U_{\Sigma}^*(x)} \right) \right) \right];$$

$a^*(x)$ – местная скорость звука в сверхзвуковом потоке ПС с невозмущенными характеристиками, оценивалась зависимостью [8]

$$\frac{T_0 - T^*(x)}{T^*(x)} = \left(\frac{U_{\Sigma}^*(x)}{a^*(x)} \right)^2 \cdot \frac{n-1}{2}. \quad (15)$$

Задача сводилась к рассмотрению результатов интегрирования в области $x \in [0, x_a]$, $t \in [0, mt]$ ($x_a = L_a$, $\tau = 1/(n_1 f_0)$, $m = 1, 2, \dots$). Начало функционирования источника возмущений отвечает времени $t = 0$.

Условия расчета определялись заданием давлений p_0, p_a в камере и на срезе сопла; температуры T_0 продуктов сгорания в камере; показателя n процесса истечения; потенциала ионизации V условной среды; длины сопла L_a ; относительной частоты n_1 и амплитуды пульсаций c ($f_0 = 1000$ Гц).

Входные параметры при расчетах широко варьировались:

$p_0 \in (6; 0,25)$ МПа; $p_a \in (1; 0,05)$ МПа; $T_0 \in (1500; 3500)$ К; $n \in (1,1; 1,4)$; $L_a \in (0,5; 1,5)$ м; $V \in (6; 16)$ В; $n_1 \in (1; 16)$; $c \in (0,01; 0,1)$. Обеспечивалось, однако, соотношение $p_0/p_a \leq 10$.

На рис. 1 представлены характерные для исследований пространственно-временные распределения по длине сопла пульсационных составляющих (давления), на рис. 2 – обуславливаемые воздействиями внутрикамерных нестационарностей на поток изменения его определенных – $E, j = f(x, t)$ – электрофизических характеристик по отношению к их фоновым («*») значениям. Результаты рис. 2 отвечают составам ПС с потенциалами ионизации $V = 8, 10, 14,5$ В – а, б, с – и условиям, когда $p_0 = 0,4$ МПа; $p_a = 0,1$ МПа; $T_0 = 3000$ К; $n = 1,3$; $n_1 = 2$; $c = 0,05$. Графики отвечают времени: $0,625 \cdot 10^{-4}$ с, $0,125 \cdot 10^{-3}$ с, $0,188 \cdot 10^{-3}$ с, $0,250 \cdot 10^{-3}$ с, $0,313 \cdot 10^{-3}$ с, $0,375 \cdot 10^{-3}$ с, $0,438 \cdot 10^{-3}$ с, $0,5 \cdot 10^{-3}$ с ($t/\tau = 0,125, 0,250, 0,375, 0,5, 0,625, 0,75, 0,875, 1$) – кривые 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 соответственно.

Зависимости, представленные на рис. 1, 2, отражают общий характер исследований. Устанавливается, что нестационарные воздействия на поток со стороны камеры ТД действи-

тельно отображаются изменениями электрофизических характеристик среды ПС в потоке, в том числе и за срезом сопла. При этом, если передача акустических возмущений из камеры к срезу сопла предполагает необходимое временное запаздывание, то электрофизический отклик на камерную нестационарность в потоке генерируется практически мгновенно. Наблюдается лишь некоторая «затяжка» его стабилизации.

Подтверждается, что конкретно формируемая в потоке электрофизическая информация совокупно определяется сложным комплексом факторов, отражающих в том числе как особенности режима (P_0, p_a, T_0) и состав среды ПС (n, V), так и спектральные характеристики и относительный уровень нестационарных воздействий (n_1, f_0, c).

Зависимость отмеченных признаков от состояний и качества работы сложного комплекса агрегатов и систем ТД позволяет считать, что электрофизические характеристики потоков ПС отображают особенности как рабочего процесса, так и состояний отдельных агрегатов и ТД в целом. Последнее находится в согласии и с известными наблюдениями [1–5].

1.4. Инструментальный эксперимент

Исследования проводились на базе лабораторного двигателя – камеры сгорания (рис. 3), работающей на газообразном кислороде и водном растворе этилового спирта и состоящей из форсуночной головки 1, средней 2 и сопловой 3 частей. Сопло камеры (материал – бронза) выполнялось толстостенным и дополнялось системой, обеспечивающей омывание наружной поверхности сопла водой.

Рис. 1. Распределение $p = f(x, t)$ по длине сопла – возмущающее воздействие

Рис. 2. Пространственно-временные распределения по длине сопла электрофизических отображений (E, j) внутрикамерных возмущающих воздействий в средах различного состава

Рис. 3. Схемы регистрации (а) и анализа (б) информации

Для моделирования различных состояний, в том числе ориентированных на реализацию аварийных и предаварийных ситуаций, предусматривалась возможность уменьшения расхода воды до значений, не обеспечивающих работоспособность сопла в установившемся тепловом режиме.

При реализации ориентированных на аварию испытаний режимные параметры варьировались в следующих диапазонах: давление в камере $P_0 = 3,5-4,2$ МПа, коэффициент избытка окислителя $\alpha = 0,8-1,1$, суммарный расход топливных компонентов в камеру $m' = 0,35-0,45$ кг/с.

Время нормальной работы двигателя в этих условиях ограничивалось периодом установления

недопустимого, с точки зрения работоспособности, теплового режима сопла (15–20 с), сопровождающегося его разгаром.

Характерная длительность разгара – от момента возникновения эрозии до сквозного прогара стенки сопла – составляла 2–5 с. Отключение двигателя могло производиться как на предаварийной стадии развития эрозии сопла, так и в момент (после) наступления аварии (его прогара).

Камера оснащалась датчиками измерения давления – МД-40 4 и ДДИ-21 5 и электростатическими зондами 6 и 7. Зонды – датчики электростатического потенциала – выполнялись из вольфрамовой проволоки диаметром 3 мм и вводились

в объем камеры 6 и поток ПС за срезом сопла 7 на глубину 10 мм. Охлаждаемый датчик давления ДДИ-21 5 и зонд 6 устанавливались в камере на расстоянии 50 мм от огневого днища головки под взаимным углом 135° . Отбор давления на датчик осуществлялся через акустический канал с размерами 2,5 и 3,0 мм (диаметр и длина соответственно). Методика предполагала получение в процессе работы двигателя безынерционной информации о режимных и электрофизических характеристиках процесса, их регистрацию и совместное рассмотрение с целью анализа.

На рис. 3 отражены конкретные составы используемых систем регистрации (а) и анализа информации (б). При регистрации запись информации о статической составляющей давления и расхода топливных компонентов производилась шлейфным осциллографом Н-117/1. Сигналы датчика ДДИ-21 и зондов регистрировали измерительным магнитофоном НО-67 в режиме частотной модуляции. При этом сигнал датчика с помощью измерительного преобразователя ИВП-2 предварительно усиливался и разделялся на основную (0–0,2 кГц) и пульсационную (0–10 кГц) составляющие. Предварительное усиление по мощности сигнала с зондов обеспечивалось выносным катодным повторителем (КП), а по амплитуде – усилителем ИШВ-1, питаемым от аккумулятора.

Система обработки и анализа информации (рис. 3, б) позволяла с помощью измерительного магнитофона НО-67 и анализатора спектров СК-72/2 многократно воспроизводить результаты записей сигналов и исследовать их амплитудно-частотный состав.

Одновременная обработка двух сигналов (с помощью узкополосного избирательного усилителя Ф-582, микровольтметра ВЗ-57, использовавшегося в качестве детектора среднеквадратичных значений, электронного двухлучевого осцилло-

графа С1-83 и фотоприставки) позволяла совместно оценивать их уровни и характер временных изменений. При выявлении характера изменений общего уровня сигналов во времени последние с выхода магнитофона НО-67 подавались непосредственно на входы милливольтметра ВЗ-57.

1.5. Результаты и их обсуждение

Характерные значения среднеквадратичной сигнала зонда (на входе катодного повторителя КП) и пульсационной составляющей давления в камере на стационарном режиме теплового лабораторного двигателя представлены на рис. 4.

Наблюдалось, что при прочих равных условиях уровни сигналов зондов характерно откликаются на изменения давления p_0 , состава α и температуры ПС в камере. При этом сигналы зонда, установленного в камере, отвечали промежутку 25–35 мВ, тогда как сигналы зонда, вводимого в поток ПС за срезом сопла, достигали 1В.

Представляют интерес результаты узкополосного анализа сигналов по каналам пульсационных составляющих давления и потенциала зондов (p'_k , ϕ'_z). Их рассмотрение показывает, что наиболее интересными с точки зрения задач диагностики состояний ТД являются зоны высоких частот, где сигналы зондов при нормальной работе двигателя практически не фиксируются (зоны «молчания»), но появляются и достигают существенных по величине уровней при переходе режима в стадию разгара сопла (переход ТД в предаварийное состояние).

Момент нарастания сигнала, по меньшей мере в части спектральных зон, предваряет на практически значимый временной промежуток аналогичное увеличение пульсационной составляющей давления в камере. Переход ТД в предаварийное состояние надежно отображается и характерными изменениями сигналов зонда за срезом сопла.

Рис. 4. Зависимости пульсационной составляющей давления и зондового сигнала в полосах 1,3 и 3,0 кГц (время испытания ~20 сек.)

Более того, испытаниями **полномасштабного ТД** выявлено, что зондом за срезом сопла надёжно отображаются все практически значимые изменения стационарных характеристик двигателя, в том числе и не регистрируемые общепринятыми средствами измерений.

Особенно важно, что даже не фиксируемая штатной системой диагностики кинетика перехода натурного двигателя в предаварийное состояние отображается сигналом с зонда за срезом сопла.

Таким образом, совокупные результаты убедительно свидетельствуют в пользу целесообразности включения ЭФО (прежде всего регистрируемой в потоках ПС за срезом сопла) в состав диагностической информации.

2. Техничко-экономические показатели тепловых двигателей

2.1. Состояние проблемы

Согласно общепринятым представлениям, максимальные уровни удельных энергетических показателей «химических» ТД, например, принципиальным образом ограничиваются сверху энергосодержанием топлива. Сопоставление же предельно достижимых показателей ТД с уровнями удельных показателей, обеспечиваемых известными к настоящему времени разработками двигателей, показывает, что возможности улучшения энергетических характеристик ТД за счёт освоения новых топлив, по существу, исчерпаны.

Проблема повышения удельных энергетических показателей ТД тем не менее могла бы быть решена изысканием возможностей дополнительного энергообеспечения рабочего цикла двигателей.

Именно на эти возможности и ориентирован *способ повышения удельных энергетических характеристик ТД за счёт дополнительного энергообеспечения рабочего цикла двигателя, при прочих равных условиях, энергией внутриядерного происхождения [9].*

Способ учитывает особенности условий внутреннего энергетического равновесия (УВЭР – между различными по физической природе энергетическими состояниями) в составе материальных образований с избыточным (некомпенсированным) электрическим зарядом (аквазинейтральных или АК-образований), впервые установленных авторами в рамках инициативных исследований по обоснованию природы аномалий и, прежде всего, шаровой молнии [10–12].

Сведения о предложенном способе до сих пор, однако, недостаточно распространены, вследствие чего он остаётся, по существу, не востребованным и требует дополнительного разъяснения.

2.2. Формирование подхода

УВЭР, положенные в основу предложенного способа, в числе прочих выражений могут быть представлены зависимостью

$$\prod_j p_j^{c_j} = \prod_j K(T)^{c_j} \exp\left(-\frac{\varepsilon_{act} - e\psi\Omega}{kT}\right), \quad (16)$$

от общеизвестных аналогичных по смыслу зависимостей отличающейся лишь наличием в показателе экспоненты дополнительного члена $e\psi\Omega$. При этом, так как работа, выполняемая средой по введению в её состав заряда, есть $-L = q\Omega$, то $\text{sign}(\Omega) = -\text{sign}(q) = \text{sign}(\psi)$ и $\text{sign}(\psi\Omega) > 0$.

Конкретный характер (16) указывает, что применительно к образованиям с некомпенсированным зарядом температура T как параметр непосредственно определяет равновесные заселённости лишь «механической» природы энергетических состояний (поступательных, колебательных, вращательных).

Если в рамках традиционного описания и с учётом УВЭР ввести в рассмотрение температуры T_{exc}^* – возбуждения заселённостей химических связей и электронных энергетических состояний уровня ε_j в составе среды с некомпенсированным зарядом, то отвечающее равновесию её соотношение с T – температурой возбуждения «механических» энергетических состояний (поступательной) определится выражением

$$T_{exc}^* = T \frac{\varepsilon_j}{\varepsilon_j - e\psi\Omega}, \quad (17)$$

а равновесная функция распределения заселённостей химических связей и электронных энергетических состояний – зависимостью

$$N_{\varepsilon_j}^* \approx \exp\left(-\frac{\varepsilon_j - e\psi\Omega}{kT}\right). \quad (18)$$

Отметим, что выражения (17), (18) указывают на допустимость соотношений $T_{exc}^* \gg T$ при $e\psi\Omega \leq \varepsilon_j$ или даже, напротив, $T_{exc}^* < T$, при $\psi\Omega i \geq \varepsilon_j$.

УВЭР в выявленной форме указывают, таким образом, *на существование традиционно не учитываемого (ранее неизвестного) канала управления состояниями сред, роль фактора управления в котором играет электрический заряд, – «зарядового».*

Согласно УВЭР непосредственно с момента формирования АК-образований функция распределения заселённостей химических связей и электронных энергетических состояний в их составе необходимо преобразуется (испытывает деформацию) к виду (18).

При этом функция $T_{exc}^* = f(e\psi\Omega)$ на стадии релаксации к УВЭР (при формировании АК-образований) или, напротив, к традиционно учитываемым условиям равновесия (при деградации

образований) может претерпевать разрыв типа $(+\infty, -\infty)$ или $(-\infty, +\infty)$, отвечающий наиболее благоприятным условиям для развития неустойчивостей атомно-молекулярной структуры в составе АК-среды.

Обоснованно ожидать, что в среде АК-образований в этих условиях могут наблюдаться нарушения химических связей, потеря устойчивости электронов на орбитах, падения электронов с орбит, их поглощения ядрами и образование нейтронов – аналог явлений K - или e -захвата, совокупно приводящие как к изменению состава среды, так и вбросу энергии внутриядерного происхождения в её состав.

Применительно к ТД представляется возможным таким образом обеспечить дополнительное энергообеспечение рабочего процесса и повышение его удельных энергетических показателей. Высказанное предположение требует, однако, экспериментального подтверждения.

2.3. УВЭР как объект экспериментальных исследований

Оценим, в первую очередь, возможность формирования АК-образований. Обратим внимание, что в соответствии с зависимостью

$$q_{sur} = \int_0^t dq = e \cdot f_a \int_0^t [\Phi_i^{a \rightarrow env} + \Phi_e^{env \rightarrow a}] dt - e \cdot f_c \int_0^t [\Phi_e^{c \rightarrow env} + \Phi_i^{env \rightarrow c}] dt \neq 0 \quad (19)$$

избыточный заряд в среде реактора может быть сформирован, например, импульсным разрядом конденсатора за счёт различий между количеством **внесённого** в реактор электричества за время t по участку цепи «положительно заряженная обкладка конденсатора – электрод «анод» в реакторе» и **вынесённого** из реактора за это же время по участку цепи «электрод «катод» в реакторе – отрицательно заряженная обкладка конденсатора.

В (19) $\Phi_j = f(t)$, ($j = e, i$) – удельный поток носителей зарядов (электронов и ионов) на участках цепи по границам раздела среда $\Leftrightarrow env$, $c \Leftrightarrow env$ (анод $\Leftrightarrow$ среда, катод $\Leftrightarrow$ среда соответственно), f – эффективная площадь, a, env, c – анод, среда, катод.

2.4. Облик установки, методика исследований

Отмеченное и определило, по существу, облик экспериментальной установки, блок-схема которой представлена на рис. 5.

В её составе: реактор 1 – сосуд из кварцевого стекла с устройствами ввода/вывода в/из его объема(а) рабочей среды, оснащаемый основными («А» и «С») электродами, выделяющими рабочую зону реактора и используемыми для формиро-

вания управляющих воздействий на среду, и вспомогательными («SE» – необязательно) – для регистрации и вывода сигналов, отображающих электрофизическую ситуацию в реакционной зоне; система 2 хранения и подготовки рабочей среды необходимого состава; система 3 ввода/вывода и подготовки среды, обеспечивающая в том числе контроль и непрерывное регулирование барометрических характеристик среды в объёме реактора; система 4 энергообеспечения процесса управляющих воздействий и запуск установки; система 5 регистрации и измерений радиационных и параметров электромагнитного и нейтронного излучения.

Отдельные варианты конструктивных решений реактора представлены на рис. 6.

При создании установки предполагалось, что необходимая для формирования в рабочей зоне реактора избыточного заряда асимметрия может быть совокупно обеспечена мерами, реализуемыми как на стадии изготовления установки (конструктивное решение реактора, геометрия и материал электродов, соотношение эффективных площадей анода и катода и т.д.), так и на стадии её эксплуатации (регулирование параметров источника с учётом состава и давления рабочей среды в реакторе при допустимых напряжённых источнике энергообеспечения и т.п.).

Источником зарядовых воздействий являлся конденсатор ёмкостью 2,0–2,5 мкФ, который через токоограничивающее сопротивление мог разряжаться через среду в реакторе. Разность потенциалов на обкладках конденсатора варьировалась в диапазоне 0,8–2,5 кВ.

Отдельные агрегаты и приборы, введённые в состав установки для реализации отмечаемых мер, а также регистрации электрофизических отображений процессов релаксации к УВЭР, изменившимся в связи с возникновением избыточного заряда в составе среды, представлены на рис. 7.

Рис. 5. Блок-схема установки

Рис. 6. Отдельные варианты конструктивных решений реактора

а

б

в

Рис. 7. Отдельные приборы и агрегаты установки

На рис. 7, а представлена фотография детекторного блока системы регистрации давления в реакторе и осциллографа «TETRONIX», используемого для регистрации и измерений характеристик разряда и электрофизических отображений его воздействий на среду. Дозиметром – радиометром ДКС-96 с блоком детектирования ДКС-96Н (рис. 7, б) в режиме счёта событий в процессе импульсного воздействия на среду в реакторе предусматривалась регистрация нейтронного излучения.

На рис. 7, в представлена капсула, выполненная из листовой нержавеющей стали, полыми стенками которой выделялся замкнутый объём пространства – отсек – для размещения реактора при испытаниях.

Каждая из шести стенок капсулы, выделяющих рабочее пространство реакторного отсека, представляла полую конструкцию. Отстояние листов стенок один от другого – около 250 мм. Полости стенок по желанию экспериментатора могли заполняться той или иной средой либо же оставаться незаполненными.

2.5. Общие результаты

На рис. 8 представлены типичные осциллограммы напряжения и тока на разрядном промежутке между А- и С-электродами, отвечающие условиям воздействия на среду таким образом. Ток – нижняя кривая, 227 А/div, напряжение на разрядном узле – верхняя кривая, 500 В/div.

Осциллограммы характерны для условий формирования зарядовых воздействий на среду выбранным способом. Состав сред варьировался. Использовались водород, азот, воздух, гелий, смеси азот-водород (при мольном соотношении ~1/1).

В качестве материала А- и С-электродов использовались Мо, W и/или сплав ковар (Fe, Ni, Co). Выбор материала в данном случае определялся, по существу, лишь технологическими ограничениями, связанными с остекловыванием боковых поверхностей электродов.

Источником энергообеспечения импульсных воздействий на среду в условиях эксперимента являлся конденсатор 2,2 мкФ, который при обеспечении пробойного напряжения между обкладками мог разряжаться через среду в реакторе. В разрядной цепи устанавливалось токоограничивающее сопротивление 2,5 Ом. Давление в разрядной зоне реактора поддерживалось в диапазоне 0,5–2,0 торр и определялось условиями пробоя разрядного промежутка в реакторе при ограничении разности потенциалов на обкладках питающего конденсатора диапазоном 0,8–1,5 кВ. Дозиметром – радиометром ДКС-96 с блоком детектирования ДКС-96Н измерялся поток нейтронов. Прибор переводился в режим счёта событий. Мерой мощности потока служило число событий за импульс разряда емкостного накопителя.

Применительно к условиям получения осциллограмм рис. 8 наложение поля конденсатора на электроды и запуск осциллографа для регистра-

а

б

Рис. 8. Разряд при давлениях: а – (H₂, He) при 0,5–1,5 торр; б – (N₂, воздух, N₂ + H₂) при 1,0–2,0 торр. Развёртка: 1 мкс/div (а); 4 мкс/div (б)

ции характеристик разряда осуществлялись одновременно с помощью электронного ключа, вводимого в цепь питания разрядной зоны реактора. При этом начальный уровень напряжений на обкладках конденсатора (к моменту наложения поля на разрядный промежуток реактора) вне зависимости от состава среды (в рамках указанной номенклатуры) оставался одинаковым (не варьировался).

Для всех из указанной выше номенклатуры сред в характерных для рис. 8 условиях вблизи реактора (на расстоянии 0,5 м) за один импульс фиксировалось 100–200 событий (нейтронное излучение можно было фиксировать на расстоянии до 10 м от разрядного узла). Какой-либо принципиальной зависимости результатов от состава среды (в рамках используемой номенклатуры) не выявлено.

Для верификации природы излучения и исключения возможностей искажения результатов были проведены следующие эксперименты. Рядом с блоком детектирования устанавливался аналогичный блок с удалённой сцинтилляционной мишенью. Этот блок не регистрировал событий во время разрядов. Кроме того, использовался поглотитель нейтронов – насыщенный раствор борной кислоты, заливаемый в полости стенок реакторного отсека с глубиной ~250 мм. Наличие поглотителя между реактором и детектором приводило к резкому ослаблению регистрируемого потока (на порядок). При проведении же контрольных экспериментов с незаполненными полостями стенок или даже наполненными водопроводной водой ослабления потока практически не наблюдалось.

Отметим, что регистрация нейтронного излучения надёжно свидетельствует как в пользу реальных возможностей возбуждения зарядовыми воздействиями в составе материальных сред энергопродуцирующих реакций внутриядерного происхождения, так и одновременно в пользу достоверности УВЭР в целом.

Представленные на рис. 8 результаты являются характерными для всей серии исследований и в рамках используемой номенклатуры сред не обнаруживают каких-либо зависимостей от их состава.

2.6. Об обоснованности способа согласно [9]

Подтверждением УВЭР принципиально обосновывается и существование принципиально доступного для освоения, неизвестного ранее источника энергии внутриядерного происхождения, указывающего на возможность улучшения ТЭП двигателей за счёт его возбуждения, в том числе в составе хотя бы одного из компонентов топлива, на предваряющей его ввод в камеру стадии. Способы, на возможность использования которого для повышения характеристик ТД указывают, в частности, и результаты лабораторного эксперимента [9].

При оценке возможностей дополнительного энергообеспечения двигателей обращалось особое внимание на работы [10–12] и прогнозируемую с их учётом возможность возбуждения в составе топлива на предваряющей его ввод в камеру стадии, процессов переработки его состава, обеспечиваемой, например, реакциями типа

Возможно возникающие сомнения в принципиальной реализуемости способа в характерных для ТД условиях ограничим лишь обращением к результатам лабораторного эксперимента (рис. 9), где представлены масс-спектрограммы исходной (а) и модифицированной (б) при атмосферном давлении смеси CH₄ + CO₂ (~0,5 + 0,5, vol) [9].

Смесь CH₄ + CO₂ модифицирована в потоке, без предварительного подогрева и без использова-

Рис. 9. Масс-спектрограмма исходного (а) и модифицированного (б) составов смеси $\text{CH}_4 + \text{CO}_2$

ния катализатора и, что особенно важно, с меньшими по отношению к оцениваемым, исходя из характеристик эндотермичности процесса, удельными энергетическими затратами на его возбуждение.

Заключение

Совокупными результатами исследований сформулирован и обосновывается комплекс концептуальных представлений о традиционно не

учитываемых (обеспечиваемых в том числе и новыми, ранее неизвестными способами) ресурсах совершенствования (повышения) технико-экономических показателей тепловых двигателей. Дальнейшее развитие результатов работы требует, однако, дополнительных исследований разнопланового характера и может быть обеспечено лишь на базе необходимого организационного, финансового, материального и научно-технического обеспечения.

Список литературы

1. Shaeffer J. F., Peng T. C. High-Potential clouds in jet-engine exhausts. AIAAPaper, 1976, no. 76-397, pp. 1-8.
2. Шкаликов В. А. Исследование выхлопных устройств генераторного газа // Тепловые процессы и свойства рабочих тел двигателей летательных аппаратов. Казань : КАИ, 1980. С. 41–47.
3. Потапов Г.П. Электризация реактивных сопел // Известия вузов, Авиационная техника. 1978. № 4. С. 112–117.
4. Шкаликов В. А., Лебедев А. А., Кульжанов Ж. К. Тепловые процессы и свойства рабочих тел двигателей летательных аппаратов / под ред. В. Е. Алемасова. Казань : КАИ, 1982. С. 79–83.
5. Ватажин А. Б. [и др.] Электродинамика. М. : Физматлит, 1983. 344 с.
6. Пинчук В.А. Низкотемпературная плазма в условиях внешних акустических воздействий // ИФЖ. 1994. Т. 67, № 1–2. С. 112–118.
7. Пинчук В. А., Пинчук А. В. Физика реальных процессов с аномальными проявлениями: введение в проблему. СПб. : БГТУ, 2016. 165 с.
8. Абрамович Г. Н. Прикладная газовая динамика. М. : Наука, Главная редакция физико-математической литературы, 1976. 888 с.
9. Пинчук А. В., Пинчук В. А. Эксплуатационные характеристики тепловых энергопреобразователей: ресурсы обеспечения // Доклады пленарного заседания Всерос. науч.-техн. конф. «Проблемы и перспективы развития авиации, наземного транспорта и энергетики», Казань, 12–13 октября 2009. Казань : Казан. гос. техн. ун-т, 2009. С. 65–85.
10. Pinchuk A. V., Pinchuk V. A. The Formations with Surplus Charge: Nature and influence upon Burning process Stability// 6th Int. Seminar on Flame Structure. Book of Abstracts (Ed. A. Konnov). Brussels: Belgium, 2008. p. 60.
11. Pinchuk A. V., Pinchuk V. A. Ball Lightning: Physics Base & Conceptual Views Complex. Eurasian Chemico-Technological Journal, 2009, vol. 11, no. 3, pp. 169–186.
12. Pinchuk A. V., Pinchuk V. A. Physics Base & Conceptual Views Complex of Ball Lightning. Journal of Modern Physics (JMP), 2010, vol. 1, no. 4, pp. 251–275.

История статьи

Поступила в редакцию 29 мая 2017 г.

Принята к публикации 27 июня 2017 г.

RESOURCES OF INCREASE OPERATIONAL AND TECHNICAL-ECONOMIC INDICES OF HEAT-ENGINES

¹V. A. Pinchuk, ²A. V. Pinchuk

¹Baltic State Technical University «VOENMEH» named after D. F. Ustinov,
Saint Petersburg, Russian Federation

²R&D Center «Protei», Saint Petersburg, Russian Federation

In the work the attention is paid to existence of new, traditionally not accounted (earlier not known in that number) resources for increase of both operational and technical-economic indices of heat-engines is substantiated.

It's noted that operational performances of heat-engines could be raised by diagnostics efficiency increasing of both quality of working process of the engine and states of the one's material part. The noted, in the one's turn, could be substantiated with including of electro-physical information being registered in the flows of combustion products behind nozzle exit section into structure of diagnostics information.

In the frame of additional resources finding for increasing of technical-economic indices of heat-engines it's paid attention onto principal possibilities of additional energy-supplying of the engine's working cycle with energy of intra-nuclear origin.

Being forecasted productivity and practical expediency of using of the noted so possibilities for improvement of technical-economic and operational indices of heat-engines are substantiated in that number with experiment results. Practical using of being noted so resources demands however an additional investigations and can be substantiated only on the base of needed organizing, financial, material and technical investments.

Keywords: technical and economic indices, power efficiency, operational reliability, engines technical diagnostics.

References

1. Shaeffer J. F., Peng T. C. High-Potential clouds in jet-engine exhausts. AIAA Paper, 1976, no. 76-397, pp. 1–8.
2. Shkalikov V. A. *Issledovanie vyhlopnnykh ustroystv generatornogo gaza* [Investigation of exhaust devices of generator gas] / In collection of papers: Heat Processes and working media characteristics of flying vehicles engines. Kazan, Kazan Aviation Institute (KAI), 1980, pp. 41–47 (In Russian)
3. Potapov G. P. *Elektrizatsiya reaktivnykh сопел* [Electrization of exhaust nozzles]. News of High Educational Institutions. Aviation Technics. 1978, no. 4, pp. 112–117. (In Russian)
4. Shkalikov V. A., Lebedev A. A., Kuldganov G. K. *Teplovye processy i svoystva rabochnykh tel dvigatelej letatel'nykh apparatov* [Heat processes & Properties of flying vehicles engines working media]. Kazan, Kazan Aviation Institute, 1982, pp. 79–83 (In Russian)
5. Vatadgin A. B. *Elektrodinamika* [Electrodynamics]. Moscow, Publishing House of Phisico-mathematical Literature Publ., 1983, 344 p. (In Russian)
6. Pinchuk V. A. *Nizkotemperaturnaya plazma v usloviyakh vneshnykh akusticheskikh vozdeystviy* [Low Temperature Plasma to External Acoustic Disturbances]. Journal of Engineering Physics and Thermophysics (JEPTER). 1994, vol. 67, no. 1–2, pp. 781–784. (In Russian)
7. Pinchuk V. A., Pinchuk A. V. *Fizika real'nykh processov s anomal'nymi proyavleniyami: vvedenie v problemu* [Physics of Real Processes with Anomalous Manifestations: introduction in the problem]. Saint-Peterburg, BSTU Publ., 2016, 165 p. (In Russian)
8. Abramovich G. N. *Prikladnaya gazovaya dinamika* [Applied Gas-dynamics]. Moscow, Chief Publishing House of Phisico-mathematical Literature Publ., 1976, 888 p. (In Russian)
9. Pinchuk A. V., Pinchuk V. A. *Ekspluatatsionnye harakteristiki teplovykh ehnergopreobrazovatelej: resursy obespecheniya* [A Applied characteristics of heat converters: ensuring resources]. Plenary papers of All-Russian scientific and technical conference «Problems & Progress Perspectives of Aviation, ground transport and power engineering». Kazan, Publishing House of KSTU, 2009, pp. 65–85. (In Russian)
10. Pinchuk A. V., Pinchuk V. A. The Formations with Surplus Charge: Nature and influence upon Burning process Stability. 6th Int. Seminar on Flame Structure. Book of Abstracts (Ed. A. Konnov). Brussels, Belgium, 2008, p. 60.
11. Pinchuk A. V., Pinchuk V. A. Ball Lightning: Physics Base & Conceptual Views Complex. Eurasian Chemico-Technological Journal, 2009, vol. 11, no. 3, pp. 169–186.
12. Pinchuk A. V., Pinchuk V. A. Physics Base & Conceptual Views Complex of Ball Lightning. Journal of Modern Physics (JMP), 2010, vol. 1, no. 4, pp. 251–275.

Article history

Received 29 May 2017

Accepted 27 June 2017