

Опыт и перспективы использования криогенных и газокompозитных топлив

Федорченко Д.Г., Цыбизов Ю.И., Воротынцев И.Е.

АО «Металлист-Самара», г. Самара

e-mail: dgfedorchenko@metallist-s.ru

Описаны преимущества и недостатки криогенных и газокompозитных топлив по сравнению с углеводородными. Представлен опыт использования криогенных топлив в авиационных ГТД и наземных ГТУ отечественными и зарубежными предприятиями. Освещены особенности конструкций летательных аппаратов и силовых установок, работающих на криогенном топливе, которые необходимо учитывать при их проектировании и эксплуатации. Показаны перспективы и положительные эффекты от поэтапного перехода энергетики на водородное топливо в будущем.

Ключевые слова: газотурбинный двигатель, криогенное топливо, метановодородная смесь, эмиссия

Experience and prospects of using cryogenic and gas-composite fuels

Fedorchenko D.G., Tsybizov Yu.I., Vorotyntsev I.E.

JSC “Metallist-Samara”, Samara

The paper describes advantages and disadvantages of cryogenic and gas-composite fuels compared to hydrocarbon fuels. The experience of using cryogenic fuels in aviation GTEs and ground-based GTUs by domestic and foreign enterprises is presented. Design features of aircraft and propulsion systems operating on cryogenic fuel are highlighted, which must be taken into account during their design and operation. Future prospects and beneficial effects of the gradual transition to hydrogen fuel are illustrated.

Keywords: gas turbine engine, cryogenic fuel, methane-hydrogen mixture, exhaust emissions

Введение

Деятельность человека обеспечивается использованием невозобновляемых источников энергии, значительную часть которых составляют различные виды углеводородного топлива, и снижение их запасов требует поиска альтернативы. Кроме того, бурное развитие промышленности и транспорта, в том числе авиации, приводит к росту загрязнения атмосферы и существенно влияет на климат, являясь главной причиной парникового эффекта. Особую роль здесь играет загрязнение верхних слоев атмосферы, где эксплуатируется основная доля дозвуковой (9...13 км) и сверхзвуковой (18...25 км) авиации. При этом оксиды азота в продуктах сгорания углеводородного топлива в верхних слоях атмосферы – главный озоноразрушитель, поэтому к авиации предъявляют особые требования [1]. Снижение выбросов вредных веществ, в особенности NO_x , является одной из основных задач, решаемых конструкторами при созда-

нии и модернизации авиационных и наземных газотурбинных двигателей (ГТД).

В качестве наиболее перспективной замены углеводородным топливам рассматривают криогенные – жидкий водород (LH_2) и сжиженный природный газ (СПГ). Переход на использование водорода исключает выбросы большого объема загрязняющих атмосферу веществ: углекислого и угарного газа, несгоревших углеводородов (НС) и сажи, – которые являются одними из основных нормируемых показателей экологической безопасности. Также исключаются выбросы токсичного бензопирена, входящего в группу канцерогенных полициклических ароматических углеводородов. Все это в сочетании с организацией процесса горения с минимально возможными выбросами NO_x в малоэмиссионной камере сгорания позволяет создать экологически чистые авиационные и наземные ГТД. Кроме того, использование криогенных топлив позволяет добиться экономического эффекта: удовлетворяя Парижскому

соглашению по климату в части сокращения выбросов углекислого газа, оно приведет к существенному сокращению штрафов за эмиссию CO₂. Авторы работы [2] предсказывали большие перспективы применению LН₂ в авиации как одной из самых высокотехнологичных отраслей машиностроения. В настоящее время необходимо отметить и рост интереса к водородсодержащим (газокомпонитным) топливам, не только применительно к авиационным и наземным ГТД, но и к поршневым ДВС. Таким образом, большую практическую значимость сегодня имеют результаты исследований по освоению сжигания криогенных и газокомпонитных топлив для обеспечения высокой эффективности и, что особенно важно, экологической безопасности.

В настоящей статье представлен уже имеющийся опыт использования криогенного топлива в авиационных и наземных ГТД, который можно рассматривать как основу для дальнейшего развития технологий сжигания топлива. Эти результаты, по нашему мнению, являются примером для эволюционного (поэтапного) перехода к промышленному использованию водорода вместо углеводородных топлив, где в качестве начального этапа возможно использование метановодородных смесей при эксплуатации авиационных и наземных ГТД.

Отечественный и зарубежный опыт использования криогенных топлив в ГТД

Возможность использования криогенного топлива в авиации рассматривала фирма Lockheed уже в середине прошлого века [3]. В России основным исполнителем работ по определению возможности применения криогенного топлива в авиационных ГТД было ОКБ генерального конструктора, академика Н.Д. Кузнецова. По результатам исследований различных видов топлива (метанол, аммиак, ацетилен, гидразин, монометиламин, пропан-бутановая смесь) предпочтение отдали криогенным топливам, а именно LН₂ и СПГ [4–6]. Первоначально исследовалось горение газообразного водорода в форсажной камере двигателя НК-144В, а затем в его основной камере сгорания. Такое решение обусловлено тем, что форсажная камера в составе этого двигателя – автономный очаг горения, не влияющий на работоспособность турбины и позволяющий использовать отработанную систему регулирования газогенератора. В результате выполненных исследований и работ по доводке создан экспериментальный ГТД НК-88, работающий на LН₂ [7]. Установлено, что применительно к камерам сгорания авиационных ГТД и наземных газотурбинных установок (ГТУ) горение водорода, по сравнению с горением природного газа и авиакеросина, – легко организуемый и управляемый рабочий процесс с более высокой полнотой сгорания при большом коэффициенте избытка воздуха.

В отработке использовали пять двигателей типа НК-88, работающих на LН₂, и НК-89 на СПГ. Всего провели 1035 стендовых испытаний. Общая наработка двигателей составила 1050 ч. Нарботка двигателей в составе летающей лаборатории составила 145 ч. Одновременно проводили автономные стендовые испытания разработанного турбонасосного агрегата системы подачи криогенного топлива. ОКБ располагало собственной уникальной криогенной инфраструктурой, позволяющей вырабатывать жидкий кислород, жидкий азот, LН₂ и СПГ. Криогенный комплекс, созданный для обеспечения испытаний ракетных двигателей, использовали при испытаниях ГТД НК-88, НК-89, а позднее при испытаниях и доводке двигателя НК-361 для газотурбовоза, камера сгорания которого работает на СПГ [6]. Имелись специальные стенды для испытаний ГТД с тремя криогенными емкостями (топливохранилищами) ЖВЦ-100 (100 м³), шестью криогенными емкостями 8Г514 (30 м³) и одной емкостью 11Г729 (10 м³).

Самолеты Ту-155 с ГТД НК-88 и Ту-156 с ГТД НК-89 впервые поднялись в воздух в 1988 и 1989 годах, и уже к 1990 году наша страна имела мировой приоритет в использовании криогенного топлива. Большой интерес к полету самолета Ту-155 проявляли зарубежные специалисты. Например, англичане, по воспоминаниям одного из разработчиков ГТД НК-88 И.П. Косицына, проверили чистоту выхлопа авиационного двигателя следующим способом: на съемках документального фильма о самолете женщина в белом костюме после пребывания в выхлопном сопле показала на камеру, что на руках и костюме нет сажи.

Таким образом, в ОКБ Кузнецова было опробовано и обосновано новое направление дальнейшего совершенствования авиационных и наземных ГТД. Известный американский авиационный инженер К. Бревер сравнил достижения советских ученых в авиации с запуском первого искусственного спутника Земли [6].

Актуальность использования альтернативных керосину топлив подтвердилась позднее. В начале 2008 года фирма Boeing провела летные испытания с использованием 50%-й смеси керосина и СПГ, а в январе 2011 года самолет А340 фирмы Airbus совершил полет на 100%-м СПГ. Исходя из факта проведения данных испытаний, большие надежды возлагают на авиационное сконденсированное топливо, исследования свойств которого, в частности, выполняют в ЦИАМ. Таким образом, ведутся исследования по замене углеводородов на альтернативные синтетические жидкие топлива (в дальнейшей перспективе на LН₂) и, что особенно выгодно для России, на топлива из природного газа.

Рост авиаперевозок и увеличение объемов сжигаемого углеводородного топлива обуславливают постоянное ужесточение требований к выбросам вредных ве-

ществ за взлетно-посадочный цикл. Кроме контроля эмиссии в зоне аэропортов Международная организация гражданской авиации готовится к нормированию выбросов оксидов азота в верхних слоях атмосферы.

С использованием опыта отработки и эксплуатации ГТД НК-88 и НК-89 в ОКБ Кузнецова выполнена проработка конструкции камеры сгорания двигателя НК-93 для работы на СПГ. Сравнительная оценка эмиссионных характеристик НК-93 представлена в табл. 1 ($\tau_{к0}$ – степень повышения полного давления в компрессоре на режиме взлета). Освоение в качестве топлива СПГ позволяет выполнить перспективные (целевые) нормы ИКАО и специальные требования аэропортов Европы [8].

На современном этапе развития авиадвигателестроения большое значение в снижении выбросов NO_x придает использованию водорода в качестве топлива в перспективном гибридном ГТД, у которого тяга образуется при совместной работе газогенератора и электродвигателя [9].

Основным потребителем углеводородного топлива является наземный транспорт. Поэтому в России повышенное внимание уделяют, например, созданию локомотивов на альтернативных видах топлива. При этом в расчеты вводят эколого-экономический коэффициент (ЭЭК, г/(кВт·ч)), учитывающий как энергетический, так и экологический аспект использования альтернативного топлива:

$$\text{ЭЭК} = E/g,$$

где E – удельный нормируемый выброс токсичного вещества в продуктах сгорания, г/кг топлива; g – удельный расход топлива ДВС, кг/(кВт·ч).

ЭЭК – своеобразный аналог параметра эмиссии ИКАО для железнодорожного транспорта. Сравнив с его помощью использование газообразных и жидких альтернативных топлив в тепловозных ДВС и наиболее распространенном дизеле 10Д100 (номинальный режим работы, табл. 2), можно сделать вывод, что наиболее энергетически эффективным и экологичным топливом является водород.

В 2010-х годах был разработан силовой блок на основе газотурбинного двигателя НК-361 для магистрального локомотива – газотурбовоза ГТ1 (последняя разработка СНТК им. Н.Д. Кузнецова) [10]. Эксплуатируемый сегодня ГТД НК-361 является уникальным и в настоящее время единственным в России полностью криогенным однотопливным ГТД, работающим без специального пускового топлива.

По данным доклада генерального директора АО «ВНИКТИ» д.т.н., профессора В.М. Коссова на заседании научно-технического совета ОАО «РЖД» 25 апреля 2017 года, у газотурбовоза более чем в пять раз ниже эмиссия NO_x , чем у тепловоза ТЭЗ3А с дизелем CEVO12.

Табл. 1. Экологические характеристики ГТД (параметр эмиссии, г/кН)

Параметр эмиссии	NO_x	СО	НС
НК-93 (керосин)	45,76	11,13	2,85
НК-93 (СПГ)	31,88	13,68	2,7
Целевые нормы ИКАО ($\tau_{к0} = 30 \dots 35$)	$\leq 30 \dots 50$	$\leq 50 \dots 118$	≤ 10

Табл. 2. Сравнение водорода с другими топливами для ДВС

Топливо	E , г/кг топлива				g , кг/(кВт·ч)	ЭЭК (NO_x), г/(кВт·ч)
	СО	NO_x	НС	Сажа		
Водород (газ)	0	34,1	0	0	0,0928	3,16
Метан (газ)	47,4	63,9	6,2	1,7	0,1857	11,87
Этанол	32,3	62,4	3,23	1,05	0,3577	22,32
Биогаз	35,1	68,7	3,73	1,17	0,309	21,23
Дизел. топливо	65,3	103,2	5,07	2,66	0,2207	22,78

Полностью решены вопросы хранения и транспортировки СПГ. Изготовителем криогенной емкости и оборудования для заправки, подготовки и передачи СПГ к силовому блоку тяговой секции, включая межсекционные соединения и аварийные отсечные клапаны тяговой и бустерной секций, является предприятие «Уралкриомаш».

Опыт использования криогенного топлива в камерах сгорания авиационных ГТД и наземных ГТУ показал возможность повышения эффективности горения и кардинального снижения эмиссии, удовлетворяющего перспективным требованиям ИКАО и европейских аэропортов.

Оценка затрат на промышленное производство водородного топлива

В работе [11] представлена оценка энергетических затрат на производство LH_2 и СПГ в сравнении с производством авиационного керосина на основании российских цен 2020 года, т.е. без учета полного цикла производства. При этом энергозатраты на производство СПГ ниже, чем на производство LH_2 , только на 30%. Сделан малообоснованный, по-нашему мнению, вывод о том, что при современном уровне производства водорода в энергетической эффективности он почти в два раза уступает керосину и «на сегодняшний день и на ближайшую перспективу переход на водородное топливо крайне энергозатратен и его широкое применение необходимо считать преждевременным». Такой вывод может приостановить исследования по использованию водорода в качестве топлива и обесценивает накопленный предыдущим поколением авиационных инженеров научно-практический задел.

Несмотря на указанные автором публикации [11] недостатки и сложности использования водорода в настоящий момент, необходимо отметить, что его применение в энергетике обладает двумя существенными преимуществами. Во-первых, запасы водорода практически безграничны и его можно использовать там же, где он производится. В отличие от аккумуляторных батарей, имеющих ограничения по объему и времени хранения запасов электроэнергии, водород можно производить и хранить в больших количествах продолжительное время. А во-вторых, водород имеет высокую энергоэффективность, так как является газом с самой высокой удельной теплотой сгорания, 120...140 МДж/кг, в три раза большей, чем у природного газа. Следовательно, для протекания работы цикла требуется гораздо меньше водорода, чем любого другого альтернативного топлива.

В мировой практике наиболее развито получение водорода самым простым, но и самым энергозатратным способом – электролизом воды. В связи с этим в ведущих странах работают над совершенствованием этого метода путем повышения давления при электролизе до 50 МПа, что способствует снижению расхода электроэнергии на получение единицы массы водорода и повышению КПД электролиза до 80%. Высокое давление при электролизе определяет и высокое давление в системе хранения. Мировая практика показывает, что хранение водорода при давлении до 115 МПа в специальных емкостях из композиционных материалов уже освоено. Разрабатывают технологию, основанную на новой концепции водородного комплекса – комбинировании с атомными станциями [12] с использованием дешевой электроэнергии, вырабатываемой в ночные часы. Стоит заметить, что в атомной энергетике Россия находится на передовых позициях, ее доля на рынке ядерных технологий составляет около 17%. Причиной тому служит не только задел советских времен, но и современные достижения.

Ближайшие перспективы использования метановодородных смесей в газотурбинной технике

Установлено, что использование водорода в качестве топлива или его добавление в традиционные топлива будет иметь огромное значение для экономики. Очевидно, что скачкообразный переход на использование в качестве энергоносителя водорода вместо углеводородных топлив произвести невозможно ввиду больших затрат на производство, хранение и транспортировку. Но это отнюдь не значит, что от водорода сегодня нужно отказаться. Напротив, необходимо искать возможности постепенного перехода на водородную энергетику. Одним из переходных этапов может служить использование ме-

тановодородной смеси, получаемой посредством адiabатической конверсии метана [13]. Рассматриваются и другие перспективные способы получения водородсодержащих газов с целью их применения в энергетических газотурбинных и парогазовых установках большой мощности. Так, перспективной является возможность создания топливных систем с бескаталитическим преобразованием воды и углеводородного топлива в водородсодержащий газ в огневой среде и ступенчатым повышением температуры горения с 1100...1300 до 2100°C. Этот принцип был реализован в водородных турбогенераторных установках ВТГУ-1 и ВТГУ-2, применяемых в строительной технике для огневой обработки бетонных изделий [14].

Наблюдается резкий рост интереса к применению водородсодержащих топлив в авиационных ГТД и наземных ГТУ, а также в поршневых ДВС. В качестве основного источника водорода рассматривается синтез-газ. Производимый путем каталитической конверсии метана, он в несколько раз дешевле чистого водорода [15]. Исследования, выполненные во Всероссийском научно-исследовательском институте экспериментальной физики применительно к поршневым ДВС, продемонстрировали, что добавки синтез-газа дают тот же эффект, что и добавки чистого водорода, а именно повышение полноты сгорания за счет перехода с неэкономичного горения стехиометрических смесей с коэффициентом избытка воздуха равным 1,0 на обедненные составы. Основная идея заключается в применении водородсодержащего топлива, получаемого на борту транспортного средства самым простым и дешевым способом – каталитическим парциальным окислением природного газа.

Метод сжигания синтез-газа несколько десятилетий активно используется, развивается и внедряется в различных областях промышленности (добывающая, энергетическая, теплоснабжение, химическая, перерабатывающая, автомобильная и т.д.). Различные смеси синтез-газа применяются как в поршневых, так и в газотурбинных двигателях.

Выполненные в ОАО «Кузнецов» совместно с РФЯЦ-ВНИИЭФ (г. Саров) исследования по снижению токсичности выхлопных газов газотурбинных приводов с использованием продуктов термохимической конверсии природного газа показали возможность осуществления риформинга топлива в автономном каталитическом риформере (генераторе) при отсутствии потребности в воде для получения синтез-газа (парциальное окисление природного газа). При этом преобразование природного газа в синтез-газ с составом $H_2 = 30\%$, $CO = 15\%$, $N_2 = 55\%$ и добавка его в основное топливо (природный газ) позволило снизить выбросы NO_x со 150 до 20 mg/m^3 и выбросы CO с 300 до 60 mg/m^3 с одновременным повышением КПД на 2,5...3,0% [15].

Применительно к малоэмиссионной камере сгорания с двухконтурной горелкой ГТУ семейства НК предложена технология, в которой синтез-газ подается только в дежурную (диффузионную) часть горелки (основной источник образования NO_x), а природный газ – в основную зону горения, что не требует коренных изменений камеры сгорания и использования генератора синтез-газа большой производительности, так как доля топлива в дежурной зоне горения составляет менее 5% общего расхода топлива на номинальном режиме. На рис. 1 показана схема организации горения с использованием генератора, разработанного в РФЯЦ-ВНИИЭФ.

Выполненные исследования одногорелочного отсека (рис. 2) с двухконтурной горелкой при подаче 60% CH_4 и 40% H_2 с моделированием режимов малой мощности ГТУ показали возможность значительного расширения диапазона устойчивого горения бедной смеси, что приводит к снижению выбросов вредных веществ. При этом добавка в природный газ синтез-газа имеет такой же эффект, как добавка чистого водорода.

Аналогичные работы по совершенствованию экологических характеристик камеры сгорания двигателя АЛ-31СТ с применением технологии получения синтез-газа на основе катализатора сотовой конструкции

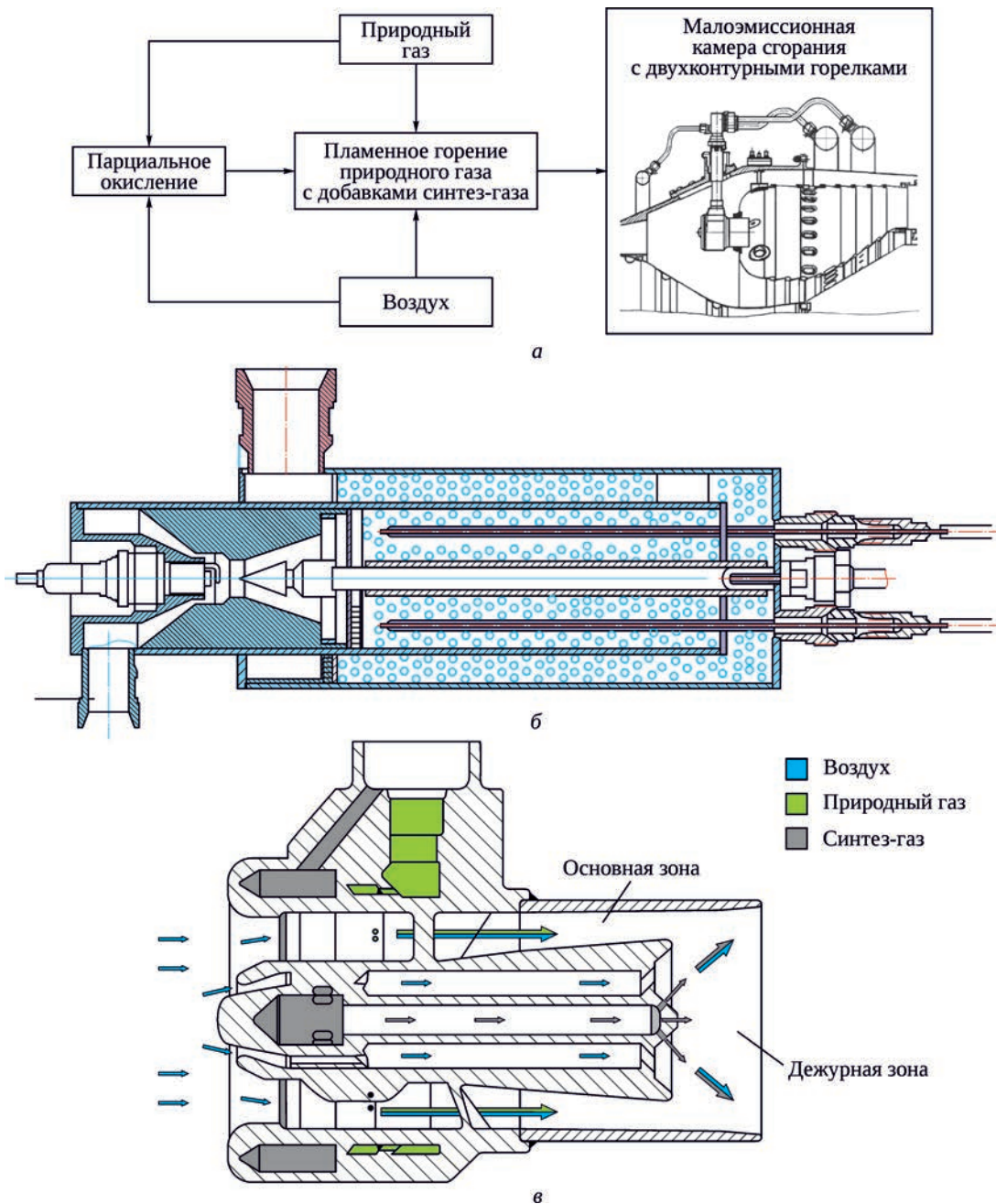


Рис. 1. Организация горения в малоэмиссионной камере сгорания с генератором синтез-газа: а – схема процесса; б – генератор синтез-газа конструкции РФЯЦ-ВНИИЭФ; в – двухконтурная горелка

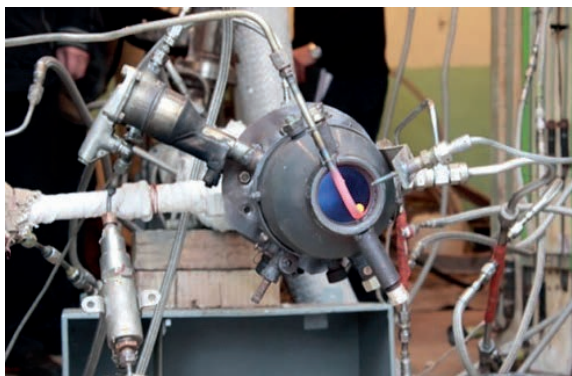


Рис. 2. Испытания одногорелочного отсека с двухконтурной горелкой при подаче водорода в природный газ

проводили в 2001...2002 годах в ОКБ им. А. Льюльки. В Самарском университете продолжаются исследования принципиально нового направления конструирования малоэмиссионной камеры сгорания ГТУ, работающей на топливе с добавками синтез-газа, в которой горелочное устройство содержит миниатюрный каталитический реактор для получения смеси природного газа с синтез-газом в параллельных компланарно-пересекающихся каналах [16].

Таким образом, исследование малоэмиссионного сжигания природного газа с добавками синтез-газа или водорода представляется полностью оправданным. На основании вышесказанного можно сделать вывод, что постепенный переход на водородную энергетику

Литература

1. Необходимость разработки методик летных исследований условий образования и существования конденсационных следов самолетов с ГТД в крейсерских полетах / Дедеш В.Т., Теньшев Р.Х., Леут А.П., Данковцев Н.А., Попов В.В., Киосе С.Н., Павлова Э.Г., Григорьев М.А., Невзоров А.Н. // Научно-технический конгресс по двигателестроению (9-й Международный салон «Двигатели-2006») : сб. докл. М., 2006.
2. Шпильрайн Э.Э., Малышенко С.П., Кулешов Г.Г. Введение в водородную энергетику / под ред. В.А. Легасова. М. : Энергоатомиздат, 1984. 264 с.
3. Иванов А.И., Косицын И.П., Цыбизов Ю.И. Экспериментальная отработка двигателя НК-144 на жидком водороде // Проблемы и перспективы развития двигателестроения : Международная научно-техническая конференция, 23–25 июня 2021 года : сб. докл. : в 2 т. Самара : Изд-во Самар. ун-та, 2021. Т. 2. С. 51–55.
4. Кузнецов Н.Д. Использование водорода в качестве топлива в авиации // Атомно-водородная энергетика и технология / гл. ред. В.А. Легасов. Вып. 3. М. : Энергоиздат, 1980. С. 161–171.
5. Внимание: газы. Криогенное топливо для авиации : справочник-воспоминание для всех / Андреев В., Борисов В., Климов В., Малышев В., Орлов В. ; науч. ред. В.Т. Климов. М. : Московский рабочий, 2001. 223 с.
6. Газ в моторах / В.В. Бирюк, С.В. Лукачев, Д.А. Угланов, Ю.И. Цыбизов. Самара : Изд-во Самар. ун-та, 2021. 296 с.
7. Владимиров А.В., Свердлов Е.Д., Дубовицкий А.Н. Новые технологии снижения вредных выбросов и CO₂ в продуктах сгорания ГТУ и ГТД путем подмешивания и постепенного перехода к водородному топливу // Авиационные двигатели. 2022. № 2 (15). С. 83–103.
8. Федорченко Д.Г., Цыбизов Ю.И., Лавров В.Н. Пути снижения эмиссии вредных веществ двигателя НК-93 со сверхвысокой степенью двухконтурности // Научно-технический конгресс по двигателестроению (9-й Международный салон «Двигатели-2006») : сб. докл. М., 2006.

не является преждевременным. Целесообразно применять эволюционный подход с промежуточными этапами. На сегодняшний день таким этапом может быть развитие технологии получения метановодородных смесей, которая обеспечивает эффективность горения и выполнение жестких требований по эмиссии и является менее энергозатратной, чем использование чистого водорода как энергоносителя.

Заключение

Для решения вопроса о целесообразности и перспективности работ по освоению производства криогенных видов топлива вместо углеводородных необходимо:

- дать комплексную оценку всех стадий жизненного цикла криотоплив, от добычи и переработки до утилизации;
- оценить в полном объеме экологическую безопасность и последствия человеческой деятельности для окружающей среды;
- рассмотреть современную концепцию водородного комплекса в комбинации с атомными станциями.

Представленные в статье результаты исследований сжигания криогенных и водородсодержащих смесей являются практическим заделом и стимулом для дальнейших работ, а также способствуют преодолению мнения о «презумпции бесперспективности» российских разработок.

-
9. Васильев А.Ю., Строкин В.Н., Шилова Т.В. Об особенностях керосино-водородной камеры сгорания гибридного газотурбинного двигателя // *Авиационные двигатели*. 2022. № 3 (16). С. 43–50.
 10. Федорченко Д.Г., Цыбизов Ю.И., Андрончев И.К. Вехи СамГУПС: гибридная газотурбинная тяга поездов / Самар. гос. ун-т путей сообщения. Самара : Изд-во СамГУПС, 2020. 130 с.
 11. Шлякотин В.Е. Оценка энергетических затрат на производство водородного топлива // *Авиационные двигатели*. 2022. № 4 (17). С. 49–52.
 12. Байрамов А.И., Вдовин Я.А. Разработка новой концепции водородного комплекса при комбинировании с атомными станциями // *Проблемы совершенствования энергетических систем и топливно-энергетического комплекса*. Вып. 11: Материалы XVI Международной научно-технической конференции «Проблемы совершенствования теплоэнергетических комплексов», 11–13 октября 2022 г., г. Саратов. Саратов : Саратов. гос. техн. ун-т, 2022. С. 13–20.
 13. Столяревский А.Я. Метановодородный этап в развитии водородной энергетики // *Проблемы совершенствования топливно-энергетического комплекса*. Вып. 10: Материалы XV Международной научно-технической конференции «Проблемы совершенствования теплоэнергетических комплексов», 6–9 октября 2020 г., г. Саратов. Саратов : Саратов. гос. техн. ун-т, 2020. С. 144–148.
 14. Перспективы применения метановодородного топлива для повышения эффективности энергетических установок / Бирюк В.В., Цыбизов Ю.И., Шелудько Л.П., Лившиц М.Ю. // *Проблемы совершенствования топливно-энергетического комплекса*. Вып. 10: Материалы XV Международной научно-технической конференции «Проблемы совершенствования теплоэнергетических комплексов», 6–9 октября 2020 г., г. Саратов. Саратов : Саратов. гос. техн. ун-т, 2020. С. 174–178.
 15. Использование синтез-газа для обеспечения экологической безопасности ГТУ / Ю.И. Цыбизов, Ю.С. Елисеев, Д.Г. Федорченко, Ю.А. Кныш // *Авиадвигатели XXI века : всерос. науч.-техн. конф. : сб. тез. докл.*, Москва, ЦИАМ им. П.И. Баранова, 24–27 ноября 2015 г. М. : ЦИАМ, 2015. С. 461–462.
 16. Формирование микровихревых потоков газа в каналах блочного катализатора с компланарными каналами / Ю.А. Кныш, Ю.И. Цыбизов, Д.Н. Дмитриев, А.А. Горшкалев // *Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С.П. Королева (национального исследовательского университета)*. 2013. Т. 12, № 3-1 (41). С. 113–117.

References

1. Dedesh V.T., Tenyshev R.H., Leut A.P., Dankovtsev N.A., Popov V.V., Kiose S.N., Pavlova E.G., Grigoriev M.A., Nevzorov A.N. Neobkhodimost' razrabotki metodik letnykh issledovaniy uslovii obrazovaniia i sushchestvovaniia kondensatsionnykh sledov samoletov s GTD v kreiserskikh poletakh [Necessity of establishing flight research methods to study formation and existence of condensation trails in cruise flight for aircraft with GTEs]. Scientific and Technological Congress on Engine Development (9th International Show “Engines-2006”): proceedings of the Congress. Moscow, 2006.
2. Shpilrain E.E., Malysheko S.P., Kuleshov G.G. Vvedenie v vodorodnuiu energetiku [Introduction to hydrogen energy] edited by V.A. Legasov. Moscow: Energoatomizdat, 1984. 264 p.
3. Ivanov A.I., Kositsyn I.P., Tsybizov Yu.I. Eksperimental'naia otrabotka dvigatel'ia NK-144 na zhidkom vodorode [Experimental testing of the NK-144 engine on liquid hydrogen]. Problems and prospects of engine development: International Scientific and Technological Conference, June 23-25, 2021: reports in 2 volumes. Samara University Publishing House, 2021. Volume 2. P. 51–55.
4. Kuznetsov N.D. Ispol'zovanie vodoroda v kachestve topliva v aviatsii [Using of hydrogen as aviation fuel]. Atomno-vodorodnaia energetika i tekhnologiiia [Nuclear-hydrogen energy and technology]. Editor-in-Chief V.A. Legasov. Iss. 3. Moscow: Energoizdat, 1980. P. 161–171.
5. Andreev V., Borisov V., Klimov V., Malyshev V., Orlov V. Vnimanie: gazy. Kriogennoe toplivo dlia aviatsii: spravochnik-vospominanie dlia vsekh [Attention: gases. Cryogenic fuel for aviation: a retrospective handbook for everyone]. Scientific editor V.T. Klimov. Moscow: Moskovskii rabochii [The Moscow Worker], 2001. 223 p.
6. Biriuk V.V., Lukachev S.V., Uglanov D.A., Tsybizov Yu.I. Gaz v motorakh [Gas in motors]. Samara: Samara University Publishing House, 2021. 296 p.
7. Vladimirov A.V., Sverdlov E.D., Dubovitsky A.N. Novye tekhnologii snizheniia vrednykh vybrosov i CO₂ v produktakh sgoraniia GTU i GTD putem podmeshivaniia i postepenno go perekhoda k vodorodnomu toplivu [New technologies

-
- for reducing harmful emissions and CO₂ in combustion products of GTU and GTE through mixing and gradual transition to hydrogen fuel]. *Aviatsionnye dvigateli [Aviation Engines]*. 2022. No. 2 (15). P. 83–103.
8. Fedorchenko D.G., Tsybizov Yu.I., Lavrov V.N. Puti snizheniia emissii vrednykh veshchestv dvigatel'ia NK-93 so sverkhvysokoi stepen'iu dvukhkoturnosti [Ways to reduce harmful emissions of NK-93 engine with ultra-high bypass ratio]. Scientific and Technical Congress on Engine Development (9th International Show “Engines-2006”): proceedings of the Congress. Moscow, 2006.
 9. Vasiliev A.Yu., Strokin V.N., Shilova T.V. Ob osobennostiakh kerosino-vodorodnoi kamery sgoraniia gibridnogo gazo-turbinnogo dvigatel'ia [On the features of a kerosene-hydrogen combustion chamber of a hybrid gas turbine engine]. *Aviatsionnye dvigateli [Aviation Engines]*. 2022. No. 3 (16). P. 43–50.
 10. Fedorchenko D.G., Tsybizov Yu.I., Andronchev I.K. Vekhi SamGUPS: gibridnaia gazoturbinnaiia tiaga poezdov [Milestones of Samara State Transport University: hybrid gas turbine propulsion of trains]. Samarskii gosudarstvennyi universitet putei soobshcheniia [Samara State Transport University]. Samara: SamGUPS Publishing House, 2020. 130 p.
 11. Shlyakotin V.E. Otsenka energeticheskikh zatrat na proizvodstvo vodorodnogo topliva [An estimate of energy costs involved in the hydrogen fuel production]. *Aviatsionnye dvigateli [Aviation Engines]*. 2022. No. 4 (17). P. 49–52.
 12. Bayramov A.I., Vdovin Ya.A. Razrabotka novoi kontseptsii vodorodnogo kompleksa pri kombinirovanii s atomnymi stantsiiami [Development of a novel concept of a hydrogen complex combined with nuclear power plants]. *Problemy sovershenstvovaniia energeticheskikh sistem i toplivno-energeticheskogo kompleksa [Problems of improving energy and fuel systems]*. Issue 11: Proceedings of the XVI International Scientific and Technical Conference “Problems of Energy Systems and Thermal Power Complexes”, October 11–13, 2022, Saratov. Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, 2022. P. 13–20.
 13. Stolyarevskiy A.Ya. Metanovodorodnyi etap v razvitiu vodorodnoi energetiki [The methane-hydrogen stage in the development of hydrogen energy]. *Problemy sovershenstvovaniia toplivno-energeticheskogo kompleksa [Problems of improving energy and fuel systems]*. Issue 10: Proceedings of the XV International Scientific and Technical Conference “Problems of Energy Systems and Thermal Power Complexes”, October 6–9, 2020, Saratov. Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, 2020. P. 144–148.
 14. Biriuk V.V., Tsybizov Yu.I., Shelud'ko L.P., Livshits M.Yu. Perspektivy primeneniia metanovodorodnogo topliva dlia povysheniia effektivnosti enegreticheskikh ustanovok [Prospects of using methane-hydrogen fuel to improve the efficiency of power plants]. *Problemy sovershenstvovaniia toplivno-energeticheskogo kompleksa [Problems of improving energy and fuel systems]*. Issue 10: Proceedings of the XV International Scientific and Technical Conference “Problems of Energy Systems and Thermal Power Complexes”, October 6–9, 2020, Saratov. Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, 2020. P. 174–178.
 15. Tsybizov Yu.I., Eliseev Yu.S., Fedorchenko D.G., Knysh Yu.A. Ispol'zovanie sintez-gaza dlia obespecheniia ekologicheskoi bezopasnosti GTU [Using synthesis gas to ensure the environmental safety of GTU]. *Aviadvigateli XXI veka [Aircraft engines of the XXI century]: all-Russian scientific and technical conference: book of abstracts*, Moscow, Central Institute of Aviation Motors, November 24–27, 2015. Moscow: CIAM, 2015. P. 461–462.
 16. Knysh Y.A., Tsibizov Y.I., Dmitriev D.N., Gorshkalev A.A. Formirovanie mikrovikhrevykh potokov gaza v kanalakh blochnogo katalizatora s komplanarnymi kanalami [Formation of microvortex gas flows in channels of a block catalyst with coplanar channels]. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta im. akademika S.P. Koroleva (natsional'nogo issledovatel'skogo universiteta) [VESTNIK of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering]*. 2013. Vol. 12, no. 3. P. 113–117.

Материалы получены редакцией 27.03.2023