

УДК 536.24: 665.642: 662.6

ОСОБЕННОСТИ ИССЛЕДОВАНИЙ, СВЯЗАННЫХ С ВНЕДРЕНИЕМ ГАЗОМОТОРНЫХ ТОПЛИВ В АВИАЦИОННУЮ ТЕХНИКУ

В. В. Архипов¹, В. П. Зайцев², И. Ю. Затямин², Н. Б. Костерев³, Л. С. Яновский⁴

Клуб Героев г. Жуковского¹, АО «Интерaviaгаз»²,
АО «НИИ Экономики авиационной промышленности»³, ФАУ «ЦИАМ им. П.И. Баранова»⁴

Сведения об авторах

Архипов Валерий Владимирович, к.э.н., сопредседатель Клуба Героев г. Жуковского

Зайцев Вячеслав Петрович, действительный член Российской академии космонавтики им. К. Э. Циолковского, генеральный директор АО «Интерaviaгаз»

Затямин Игорь Юрьевич, заместитель генерального директора АО «Интерaviaгаз»

Костерев Николай Борисович, заместитель генерального директора АО «НИИ Экономики авиационной промышленности»

Яновский Леонид Самойлович, д.т.н., профессор, заслуженный деятель науки РФ, начальник отдела двигателей и химмотологии ФАУ «ЦИАМ им. П.И. Баранова»

Развитие потребностей человечества приводит к необходимости создания воздушных судов (ВС) с большими сверхзвуковыми и даже гиперзвуковыми скоростями полета. В связи с этим в авиационной технике возникает необходимость поиска новых сырьевых ресурсов для создания более экологически чистых и более энергоемких топлив, имеющих в то же время достаточно большой хладоресурс. Такими качествами в полной мере обладают альтернативные газомоторные топлива (ГМТ): низкокипящие углеводородные газы (метан, пропан, бутан и т. д.) и водород. В данной статье предложена стратегия проведения исследований и внедрения таких топлив в авиационную технику в условиях ограниченного финансирования.

Ключевые слова: газомоторная авиация; авиагаз; газомоторное топливо; АСКТ; СПГ; ГМТ; экологический авиатранспорт; газолет.

В настоящее время нарастающие потребности в региональных и мировых перевозках и обусловленное этим увеличение парка автомобильного, железнодорожного, водного и авиационного транспорта требуют все больших энергетических затрат. Накладывает ограничения на эту тенденцию ожидаемое в будущем истощение традиционного энергетического ресурса жидких топлив — нефти, падение ее добычи, связанное с этим уменьшение производства вырабатываемых из нее продуктов и рост их цен. С другой стороны, экологические проблемы привлекают все большее внимание специалистов и мировой общественности в связи с опасно возрастающим загрязнением окружающей природной среды от сжигания в качестве топлива продуктов переработки нефти. Естественный процесс ассимиляции вредных веществ в природе уже не успевает за их поступлением. В результате происходит их накопление в атмосфере, водоемах и почве.

Определенный «вклад» в усугубление этих проблем вносит авиация и космонавтика.

В поисках новых ресурсов

Развитие потребностей человечества в авиаперевозках будет идти в основном по двум направлениям. С одной стороны, бу-

дут развиваться и совершенствоваться дозвуковые воздушные суда (ВС) в части улучшения экологичности и уменьшения стоимости авиаперевозок, а также повышения безопасности и комфорта. С другой стороны, учитывая нарождающийся спрос на дальние и сверхдальние перевозки, в том числе и в нашей стране, протяженность которой в широтном направлении составляет более 10 тыс. км, необходимо создание определенного класса пассажирских ВС с большими сверхзвуковыми и даже гиперзвуковыми скоростями полета. В этом случае авиастроители могут столкнуться с рядом проблем, одной из которых является необходимость использования новых, более энергоемких и экологически чистых, чем авиакеросин, топлив. Кроме того, организация охлаждения теплонапряженных элементов планера ВС, двигателя, бортового оборудования, кабины и пассажирских салонов уже не может быть реализована за счет теплофизических свойств авиакеросина. Уже при скорости полета $M = 4$ требуются топлива с хладоресурсом более 1600 кДж/кг (у керосина — 250–350).

Таким образом, у авиастроителей возникает объективная необходимость поиска новых сырьевых ресурсов для создания более экологически чистых и более энергоемких топлив, имеющих в то же время достаточно большой хладоресурс. Такими качествами в полной мере обладают газомоторные топлива (ГМТ): низкокипящие углеводородные газы (метан, пропан, бутан и т. д.), получаемые из природных и нефтяных газов, и водород.

В идеале авиационная техника за счет более высокой теплоты сгорания и повышенного хладоресурса, а также дру-

гих специфических характеристик указанных ГМТ может в той или иной мере получить следующие преимущества:

- уменьшить запас топлива на борту ВС;
- снизить стоимость авиаперевозок;
- осуществить эффективное охлаждение двигателя, увеличить температуру газа перед турбиной и повысить тем самым КПД силовой установки;
- создать комфортные температурные условия для жилых отсеков и бортового оборудования, способствуя повышению его надежности и снижению массы;
- значительно снизить расход забортного воздуха, ухудшающий аэродинамические характеристики ВС, и расход воздуха, отбираемого от двигателей, для систем кондиционирования кабины экипажа и салона пассажиров, систем теплоотвода из отсеков бортового оборудования и других теплонапряженных частей ВС, что дает возможность уменьшить массу этих систем, сократить затраты топлива на обеспечение их работоспособности и уменьшить лобовое сопротивление ВС за счет уменьшения площади воздухозаборников;
- увеличить протяженность ламинарного пограничного слоя за счет охлаждения омываемой поверхности ВС, что дает возможность повысить его аэродинамическое качество;
- упростить использование явления сверхпроводимости;
- уменьшить загрязнение окружающей среды, особенно в зоне аэропортов: в продуктах сгорания значительно сократится содержание углерода, исчезнут сернистые соединения и тяжелые углеводороды, склонные к образованию канцерогенных и мутагенных продуктов, и т. д.

Указанные выше ГМТ имеют много общего, особенно в части обращения с ними, но отличаются друг от друга по своим теплофизическим свойствам (табл. 1). Использование каждого из них может существенным образом, но по-разному повлиять на внешний облик, конструк-

цию, энергетику, эксплуатационные особенности и коммерческую эффективность использования ВС. Причем чем ниже температура кипения и меньше температурный диапазон жидкого состояния рассматриваемого ГМТ, тем большее количество проблем придется решать при проведении соответствующих НИОКР и тем дороже будет обходиться его практическое внедрение. Отсутствие же явных интегральных преимуществ между альтернативными ГМТ требует проведения обширных комплексных исследований, что весьма затруднительно в условиях ограниченного финансирования. С другой стороны, проведенное без комплексного сравнительного анализа внедрение в авиацию какого-либо из этих ГМТ или их смесей может привести к неоптимальным решениям и дополнительным потерям времени и средств. Немаловажным фактором, создающим определенные трудности при внедрении практически всех ГМТ, является отсутствие в гражданской авиации соответственно подготовленных кадров (разработчиков и эксплуатантов), а также наличие традиционного авиационного консерватизма (частично объясняемого предубежденностью в чрезвычайной взрыво- и пожароопасности ГМТ) и т. п.

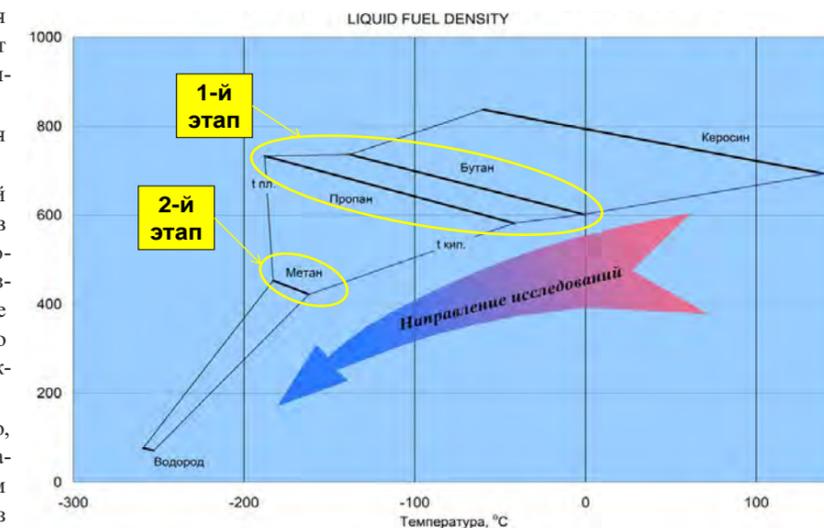


Рис. 1. Плотность топлива в жидком состоянии (кг/м³). Этапы внедрения ГМТ на региональных авиатранспортных средствах

Таблица 1. Теплофизические свойства газовых топлив и авиакеросина ТС-1

Топливо	Керосин ТС-1	Водород	Метан	Этан	Пропан	Бутан	Пентан	Гексан
Хим.формула		H ₂	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	C ₄ H ₁₀	C ₅ H ₁₂	C ₆ H ₁₄
Температура плавления при нормальном давлении, °C	ниже -60	-259,2	-182,5	-183,3	-187,7	-138,3	-129,7	-95,3
Температура кипения при нормальном давлении, °C	136 - 227	-252,8	-161,7	-88,6	-42,1	-0,5	36,1	68,7
Критические:								
температура, °C	374	-239,9	-82,6	32,28	96,74	152	196,6	234,7
давление, МПа	2,42	1,3	4,64	4,91	4,26	3,8	3,37	3,03
Плотность топлива, кг/м ³ при температуре:								
кипения	775 - 785	71,07	424,4	546,4	582	601,5	610,1	664
плавления	835 (-60°C)	77,15	453,4	650,7	733,1	736,4	761,2	756,9
Теплота сгорания при 20°C и нормальном давлении,								
кДж/кг: высшая	46470	135380	56290	51910	50380	49535	49045	48710
низшая	43290	114485	49930	47515	46390	45745	45380	45130

¹ Клуб Героев г. Жуковского, 140180, г. Жуковский М. О., ул. Фрунзе, д. 23
² АО «Интерaviaгаз», 105005, г. Москва, ул. Радио, д. 17, ЦАГИ
³ АО «НИИ Экономики авиационной промышленности», 111024, г. Москва, пр. Энтузиастов, д. 15, к. 1
⁴ ФАУ «ЦИАМ им. П.И. Баранова», 111116, г. Москва, ул. Авиамоторная, д. 2

Решением проблемы, особенно в условиях ограниченного финансирования, является последовательный анализ различных аспектов использования этих ГМТ, начиная с исследований и внедрения в авиацию более простых в техническом и эксплуатационном отношении ГМТ, с которыми можно работать на принятом в авиации температурном уровне (от $\pm 50^{\circ}\text{C}$), с поэтапным переходом к ГМТ с более низким температурным уровнем нахождения в жидкой фазе (рис. 1).

Водород: перспективы и сложности

Среди вышеуказанных альтернативных газовых топлив наилучшие энергетические и хладоресурсные характеристики имеет водород (H_2). Его теплота сгорания на единицу массы в 2,7 раза больше, чем у авиакеросина (рис. 2). Он обладает уникальными характеристиками горения по скорости распространения пламени, концентрационным пределам воспламенения и другим показателям. При сгорании водорода образуется экологически чистый продукт — вода, применение водорода не нарушает круговорота вещества в природе, так как цикл его получения и использования является замкнутым, а ресурсы сырья для его производства неограниченны. По хладоресурсу на единицу массы водород превосходит авиакеросин в несколько раз (рис. 3).

В общем, водород — это уникальное топливо для всех видов транспортных средств, а его массовое использование может не только изменить их облик и технические характеристики, но и, возможно, всю техногенную структуру человеческого общества. Необходимость проведения работ, направленных на увеличение производства и расширение сферы применения водорода в качестве экологически чистого энергоносителя, подтверждается принятием распоряжения правительства Российской Федерации от 12 октября 2020 года № 2634-р, в котором утвержден план мероприятий («дорожная карта») по

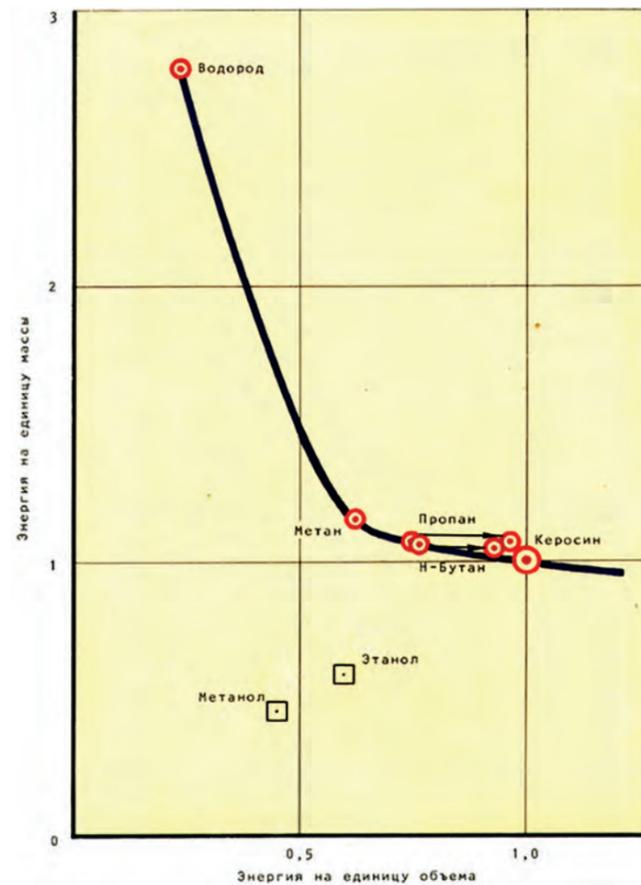
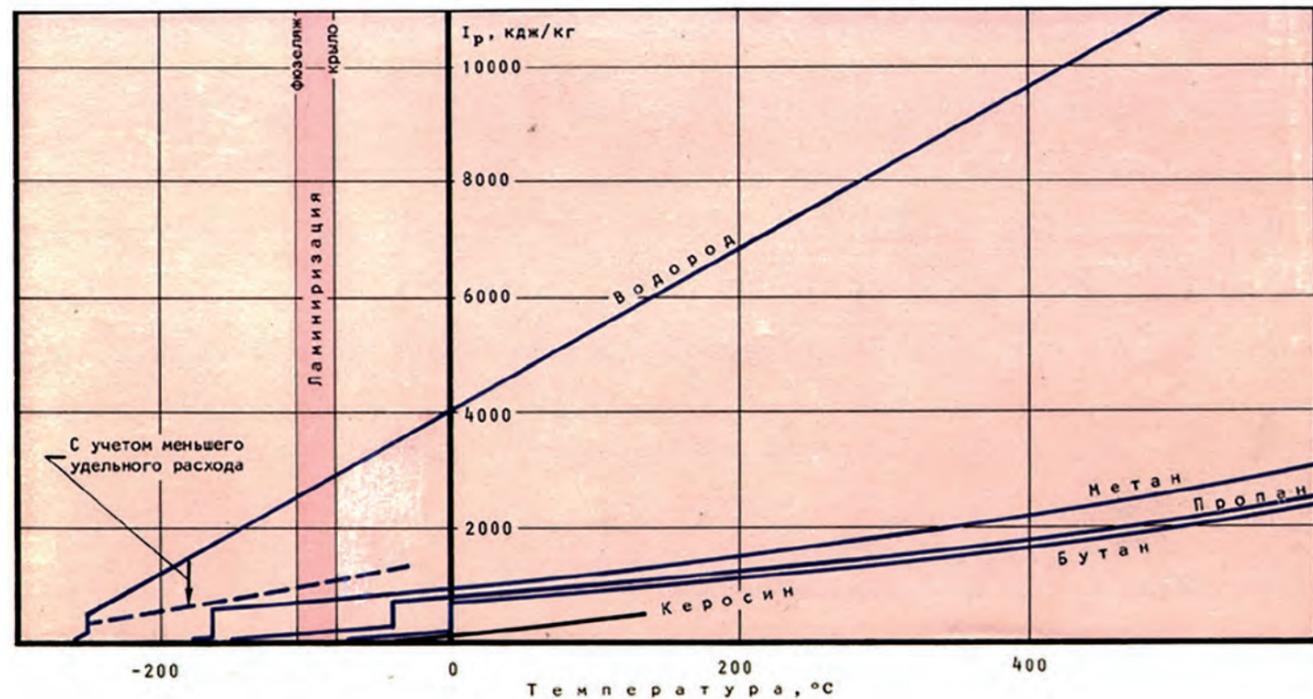


Рис. 2. Энергосодержание топлив

Рис. 3. Хладоресурс топлив



развитию водородной энергетики в РФ до 2024 года. Поэтому исследования, направленные на поиск рациональных путей использования водорода в качестве авиатоплива, должны быть одним из важных направлений работ институтов и организаций авиапрома.

Однако водород обладает некоторыми особенностями, которые в настоящее время, на современном уровне развития технологии ограничивают возможность его широкого применения — и не только в авиации. В первую очередь это связано с тем, что водород, являясь в конечном итоге жидким аккумулятором энергии (в свободном виде его в природе мало), требует определенных затрат для своего получения.

Массовое производство жидкого водорода путем электролиза воды или из природного газа по известным технологиям сопряжено со значительным расходом электроэнергии, вырабатываемой большей частью на тепловых электростанциях за счет сжигания других теплоносителей, таких как нефть, уголь и т.п. Последнее связано с выбросом в атмосферу большого количества экологически грязных продуктов сгорания и с расходом крайне дефицитного невозобновляемого органического сырья. Поэтому производство водорода в настоящее время нельзя считать экологически чистым, а его цена за тепловую единицу еще долго будет превышать аналогичную цену других топлив. Широкого использования водородного топлива следует, видимо, ожидать только при наличии большого избытка экологически чистой энергии, такой как возобновляемая, атомная и т.п.

Крупномасштабное использование водорода будет также ограничиваться необходимостью создания принципиально новой наземной инфраструктуры. В нее входят строительство большого количества заводов по получению жидкого водорода, средства его транспортирования и хранения, обеспечения пожарной безопасности при выполнении различных технологических операций и т. д. Все это связано со значительными капитальными вложениями.

До сих пор водород в качестве топлива применялся только в космической ракетной технике и на экспериментальных ВС (водородные топливные элементы — это отдельное направление). Их полеты достаточно редки и тщательно готовятся. Кроме того, условия подготовки и пуска ракет в рамках стационарного базирования значительно отличаются от условий эксплуатации самолетов. Стартовые комплексы для запуска космических ракет являются немногочисленными сложными инженерными сооружениями, которые обслуживает высококвалифицированный узкоспециализированный персонал. Такие комплексы мало похожи на аэродромные. Авиация же характеризуется массовостью и многообразием типов ВС, используемых достаточно интенсивно в течение длительного срока службы, а также большим количеством точек базирования и многочисленностью обслуживающего персонала. Кроме того, в прошлом при разработке космической техники экономические параметры считались второстепенными. В этих условиях опыт, имеющийся в космической технике, сложно использовать в авиации.

Большую эксплуатационную проблему при использовании водорода в авиации может также создать его низкая температура кипения при нормальном давлении, узкий (6°C) температурный диапазон жидкого состояния, низкая плотность и др. (рис. 1). Это вызывает необходимость значительного увеличения размеров топливных баков ВС, использования высокоэф-

фективной и высоконадежной теплоизоляции для их защиты, а также решения сложных конструкционных и прочностных вопросов, связанных с большим перепадом температур, температурными напряжениями, температурными мостами и т. п.

Это подтверждается и проводимыми исследованиями. В частности, в 60-х годах прошлого столетия в ЦАГИ с участием ЦИАМ и других научных организаций под руководством В.М. Мясищева был разработан аванпроект сверхзвукового дальнего самолета с водородными двигателями. Жидкий водород заполнял практически весь фюзеляж. Экрановакуумная теплоизоляция крепилась снаружи. Внешне такой самолет напоминал собой большую дирижабль длиной около 100 и диаметром 7–8 метров. Результаты работы подтвердили выводы ученых и показали, что уровень технологического развития, расходных характеристик двигателей, материаловедения, эксплуатационных требований и т.п. середины прошлого столетия не позволяет реализовать подобные проекты.

Стратегия планомерных исследований

С аналогичными или близкими к ним проблемами могут столкнуться исследователи и конструкторы при разработке ВС на метане (CH_4), так как он также имеет криогенную температуру кипения, узкий диапазон нахождения в жидкой фазе (21°C) и относительно низкую плотность.

Поэтому в настоящее время даже частичный перевод авиации на криогенное топливо (водород и метан) представляет сложную научно-техническую и организационную задачу. Все это может потребовать довольно больших затрат, которые необходимо будет произвести для решения прочностных, материаловедческих, конструктивных, температурных, аэродинамических, схемных, эксплуатационных, аэродромных, транспортных, кадровых и других проблем, с учетом их реализации на низком (криогенном) температурном уровне.

Может быть, поэтому даже такая богатая страна, какой являются США, которая начала исследовать проблему использования водорода в авиационной технике где-то с середины 1960-х годов, так и не построила даже летающей лаборатории. В Советском Союзе приблизительно в это же время был создан и летал экспериментальный самолет Ту-154ЛЛ (Ту-155), один из двигателей которого работал на криогенных метане и водороде, а в городах Самаре и Жуковском были построены специализированные наземные комплексы. Тогда мы могли себе позволить тратить на эту проблему больше, чем Америка.

В настоящее время, в условиях ограниченных финансовых ресурсов, нашей стране необходима особая поэтапная стратегия проведения исследований и внедрения газотопливной технологии на ВС — этого нового направления в развитии авиации. Она должна позволить сохранить и развить научно-технические достижения и заделы прошлого, подготовить разнопрофильных специалистов, а также соразмерить затраты и эффект, в том числе коммерческий, который может быть получен на каждом этапе от реализации достигнутых результатов.

Таким образом, принимая во внимание существующее соотношение цен на жидкое и газовое топливо, а также достигнутый уровень развития криогенной техники, включая и подготовку кадров, разрабатывающих и эксплуатирующих авиационную технику и наземную инфраструктуру, представляется более целесообразным проведение поэтапных (рис. 1),

Таблица 2. Последовательность проведения исследований особенностей использования сжиженных газов в качестве авиатоплива

Этапы		1	2	3	4
Топливо		Нормальное	Криогенное		
		Бутан (C ₄)	Пропан (C ₃)	Метан (C ₁)	Водород (H ₂)
Рабочие температуры, t °C		+ 45 ÷ - 90	- 40 ÷ - 180	- 160 ÷ - 180	- 253 ÷ - 259
Диапазон жидкого состояния, t °C		135	145	21	6
Относительная цена тепловой единицы *)		0,5 ÷ 0,6	0,6 ÷ 0,8	1,2 ÷ 1,6	4–7
Отн. затраты на сооружение аэропорта *)		1,2	2	2–3	5–8
Материалы	Конструкционные	100%	50%	50%	10%
	Уплотнительные	100%	20%	20%	0%
	Теплоизоляционные	50%	50%	50%	10%
Сиповые установки	Двигатели	Незначительная модернизация	Модернизация	Глубокая модернизация	
	Топливные баки	Создан образец	Имеются прототипы	Новая разработка	
	Топливная система	Некоторая доработка	Доработка	Новая разработка	
Система кондиционирования воздуха		Доказана высокая эффективность		Требуются исследования	
Наземная инфраструктура		Имеется серийная техника	Требуются исследования		
Заводы по производству топлива		Имеются	Дооборудование существующих	Новые заводы	
Практическая реализация вида топлива		АСКТ, АСКТ-Б	АСКТ-К	АСКТ-М	АСКТ-В
Основные задачи этапа		Приобретение опыта работы		Работа на криотопливах с узким диапазоном жидкого состояния	
		с газовым топливом	с криотопливом		

*) Относительно штатных топлив

исследований, направленных на внедрение альтернативных газовых топлив, с постепенным понижением уровня осваиваемых температур (табл. 2). При этом многие эксплуатационные особенности использования газовых топлив, связанные с хранением, охлаждением перед заправкой, захлаживанием бортовых емкостей, заправкой, элементами техники безопасности при обращении и т. п., проще, легче и дешевле исследовать на газах с более высоким температурным уровнем нахождения в жидкой фазе, используя затем полученные результаты для исследования топлив с более низкой температурой кипения.

Это даст возможность быстрее, с меньшими затратами и на более высоком температурном уровне выявлять, исследовать и решать технологические, конструкционные, эксплуатационные и другие проблемы, обусловленные использованием тех или иных газовых топлив в авиационной технике, оценить эффективность различных технических решений, определить область рационального применения таких топлив и, главное, создать научный и экспериментальный задел, приобрести необходимый опыт и подготовить кадры для решения аналогичных задач с более низкотемпературными газами.

В этой же температурной последовательности на различных образцах и даже экспериментальных ВС могут быть испытаны и отработаны отдельные конструктивные элементы планера, силовых установок и оборудования (бортового и наземного), а также исследованы вопросы предотвращения аварийных ситуаций (разгерметизации баков, повреждения теплоизоляции и т.п.) и разработки способов их локализации, технологические приемы заправки и слива и т.п.

Как видно из табл. 2, исследования по внедрению сжиженных газовых топлив условно можно разделить на четыре этапа. Это позволяет на каждом этапе учитывать эксплуатационные особенности указанных газовых топлив, состояние смежных областей науки и техники и уровень развития технологии, а также решать научные задачи и вопросы практической реализации на каждом этапе внедрения. Следует заметить, что ис-

следовательские работы, видимо, более целесообразно проводить на моногазах. Это обойдется дешевле, так как они более доступны, а их свойства достаточно хорошо изучены. Практическая же реализация результатов исследований более целесообразна при использовании различных композиций состава углеводородных газов, так как в ряде случаев технология их получения оказывается значительно дешевле.

Бутан и смесь АСКТ

Исследования первого этапа в настоящее время практически закончены. Бутан (C₄H₁₀) — газ, использование которого возможно во всем температурном диапазоне, в котором в настоящее время эксплуатируется вся авиационная техника. По своим теплофизическим свойствам он наиболее близок к авиабензину и авиакеросину. Его температура кипения при нормальном давлении — около 0°С. При плюсовых температурах его можно хранить на земле и на борту ВС в баках под небольшим избыточным давлением (при температуре +50°С давление насыщенных паров — 0,5 МПа). По сравнению с авиакеросинами бутан обладает более высокой термостабильностью и менее агрессивен по отношению к конструкционным и уплотнительным материалам. В смеси с пропаном бутан уже много лет используется в качестве топлива в автомобильных двигателях и бытовых приборах (газовых плитах).

В плане практической реализации результатов исследований по первому этапу экономически целесообразнее использовать в качестве топлива на ВС не бутан, а смесь нескольких газов. Эта смесь, разработанная авиационными и нефтегазовыми институтами и получившая название «авиационное сконденсированное топливо» — АСКТ (ТУ 39-1547-91), представляет собой композицию высококипящих углеводородных газов: пропана, бутана, пентана, гексана и др. Главным критерием выбора композиции была минимальная себестоимость ее производства. АСКТ можно получать на любых газо- и нефтеперерабатывающих устройствах, имеющих газодифракци-

Рис. 4. Газолет – вертолет на газовом топливе



онные установки (их в стране сотни), в пунктах осушки природного газа и т.д. И даже непосредственно на нефтегазопромислах или в специально оборудованных точках по трассе трубопровода, используя в необходимых случаях МГБУ (мобильные малогабаритные блочные установки).

Теплотворная способность АСКТ на ~5% выше, чем у авиакеросина. По ряду эксплуатационных показателей оно превосходит авиакеросин. Кроме того, его использование позволит увеличить ресурс двигателей, а при низких температурах окружающей среды оно будет значительно лучше обеспечивать их пусковые свойства. Новое топливо экологически чище и менее агрессивно, так как в нем практически отсутствуют сернистые соединения, ароматические и непредельные углеводороды, смолы и другие вредные вещества, имеющиеся во многих жидких топливах, вырабатываемых из нефти. По мнению специалистов АО «Климов», создавших двухтопливную (АСКТ/ТС-1) модификацию вертолетного двигателя ТВ2-117ТГ, АСКТ более безопасно, чем авиакеросин, так как за весь период работ с этим топливом (около трех лет) не было никаких нестандартных ситуаций.

Характерной особенностью АСКТ является возможность его хранения на борту ВС в диапазоне температур от +50 до -60°С под небольшим давлением в жидком виде в нетеплоизолированных баках. Для работы с АСКТ имеется большой выбор конструкционных и уплотнительных материалов, а также возможность использования практически всех существующих средств для транспортировки, хранения и перелива газов пропан-бутанового ряда. Для работы на АСКТ газотурбинные и поршневые двигатели требуют лишь незначительной доработки. Топливные баки могут быть разработаны с использованием ракетной технологии, имеющей опыт создания цилиндрических корпусов с обмоткой стекловолокном. Топливная система АСКТ по типу применяемых агрегатов мало отличается от керосиновой и т.д. Не будет проблем и с наземным топливозаправочным комплексом (ТЗК), при создании которого могут использоваться арматура, агрегаты и другие устройства, применяемые в автомобильном хозяйстве и нефтегазовой промышленности.

Поэтому внедрение АСКТ в авиационную технику может пройти без больших проблем и затрат. Реальным подтверждением этому являются разработка и летные испытания экспериментального вертолета Ми-8ТГ, проведенные еще в 1987 году на техническом бутане. Позже в ОАО «Московский вертолетный завод им. М.Л. Миля» при участии ОАО «Интеравиатопливо» был создан и прошел начальный этап испытаний первый

промышленный образец двухтопливного вертолета Ми-8ТГ с двигателями, работающими как на АСКТ, так и на авиакеросине, а также на их смесях (рис. 4). Вертолет в 1995 году был показан в полете на Международном авиакосмическом салоне в городе Жуковском и привлек внимание отечественных и зарубежных специалистов. Кроме того, в 2015 году в ЦИАМ на имитаторе АСКТ были проведены успешные испытания четырехцилиндрового авиационного оппозитного поршневого двигателя ПД-1400 воздушного охлаждения с редуктором (рис. 5). Таким образом, можно считать, что АСКТ вполне может являться дополнением или, в определенных ситуациях,

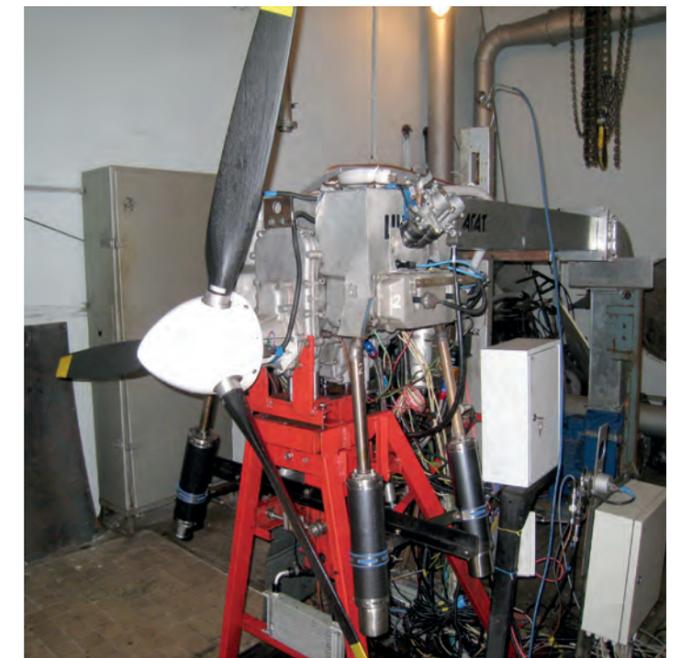


Рис. 5

альтернативой штатным авиатопливам как для газотурбинных, так и для поршневых двигателей.

Последние исследования институтов авиационной и нефтегазовой промышленности показали, что при получении АСКТ из широкой фракции легких углеводородов (ШФЛУ), которая вырабатывается на всех ГПЗ, можно реализовать безотходное производство, получая в остатке соизмеримое количество автомобильного пропана марки ПА, ПБА или СПБТ и снабжая дополнительно наземный транспорт и бытовое топливо дешевым, экологически чистым топливом. Кроме того, была доказана коммерческая эффективность использования АСКТ в нефте- и газодобывающих регионах, в которых имеется в избытке сырье (попутный газ) для его получения. В то же время в эти регионы жидкое топливо завозится из промышленно развитых районов России по железной дороге или в короткий период навигации, что приводит к значительному увеличению его стоимости. Поэтому разница в ценах на АСКТ и авиатопливо там может достигать значительных величин (3–5 раз).

Наиболее эффективно использование двухтопливных вертолетов при освоении новых, удаленных от дорожной инфраструктуры месторождений нефти и газа. Расчеты показывают, что в этом случае достигается максимальный коммерческий эффект, так как вертолеты, а также наземный транспорт, стационарные энергоагрегаты (дизель-генераторы и т.п.) и бытовое оборудование, используемые на месторождениях, будут заправляться непосредственно от быстро монтируемой там же малогабаритной блочной установки (МГБУ) высокой заводской готовности. Внедрив газотопливную технологию непосредственно на месторождении, можно частично или полностью исключить его зависимость от поставок жидких топлив и электроэнергии. Экономия же в этом случае обеспечивается не только за счет дешевизны газового топлива, вырабатываемого из практически бросового сырья — сепарируемого газа, который в противном случае сгорел бы в факелах, но и за счет уменьшения затрат на транспортировку жидких топлив (авиакеросина, бензина, дизтоплива и т.п.), значительное количество которого для авиации и других потребителей на эти месторождения иногда завозится и вертолетами.

Результаты работы вертолетостроителей, а также исследования, проведенные в ЦАГИ, ЦИАМ, ГосНИИ ГА, НИПИ-газпереработке и самолетостроительных ОКБ им. А.Н. Туполева, С.В. Ильюшина и А.С. Яковлева, показали возможность и, главное, эффективность перевода на газ не только вертолетов, но и самолетов. Причем такую разновидность жидкого газового топлива, как АСКТ-Б (обеспропаненное АСКТ), можно заливать непосредственно в плоские крыльевые топливные баки самолетов местных авиалиний типа Ил-114, Як-40, Ан-2 и т.п. до температуры окружающей среды на земле +5°C и ниже (такие температуры в некоторых районах Сибири и Севера бывают до 10 месяцев в году). Причем увеличение массы за счет дополнительных агрегатов газо-керосиновой топливной системы, например, для самолета Ил-114 не превысит 20–25 кг.

Реализацию данного проекта при благоприятных условиях можно начать в середине 2020-х годов. В эксплуатирующихся и вновь осваиваемых нефте- и газодобывающих регионах это позволит частично или полностью решить топливно-транспортную проблему, так как даст возможность обеспечить воздушный и наземный транспорт более дешевым топливом. Транспорт, особенно воздушный, станет более доступным для жителей, организаций и местного бюджета, так как стоимость

топлива составляет сейчас значительную долю в стоимости летного часа. Это должно вызвать цепную реакцию возврата ряда упраздненных и уже, наверно, начинающих многими забываться очень важных для добывающих регионов социальных достижений прошлого, значительную часть которых традиционно обеспечивал «Аэрофлот»: таких как скорая медицинская помощь, обслуживание оленеводов, доставка почты и продуктов в дальние поселки и геологические экспедиции и т.п. Увеличение вертолетных работ будет также способствовать развитию производительных сил регионов и увеличению рабочих мест.

Таким образом, использование результатов только первого этапа исследований по внедрению углеводородных газов и водорода в народное хозяйство позволит комплексно решить ряд энергетических, экономических, экологических, социальных и других проблем, имеющих важное значение как для регионов внедрения, так и в целом для России. Коммерческие результаты внедрения АСКТ дадут возможность получить прибыль и, следовательно, дополнительные средства для продолжения исследовательских работ.

Главным же итогом использования результатов первого этапа предлагаемых исследований является приобретение опыта массовой эксплуатации ВС на газовых топливах в штатных условиях.

Пропан и криогенное АСКТ

Следующим объектом исследований по внедрению в авиационную технику альтернативных газовых топлив предполагается пропан, обладающий весьма благоприятными эксплуатационными характеристиками. В частности, большой температурный диапазон жидкого состояния допускает его использование как при нормальных температурах, так и при криогенных. Это уникальное свойство пропана позволяет, постепенно понижая температуру, плавно перейти к исследованию проблем, обусловленных криогенным уровнем использования остальных газовых топлив. Пропан (C_3H_8) входит в состав природного и нефтяного газов, а также газов нефтепереработки, из которых он может быть выделен в количествах, достаточных для массового применения в авиационной технике. Теплота сгорания пропана на ~7% выше, чем у авиакеросина. Температура его кипения при нормальном давлении составляет -42°C, температура замерзания ниже, чем у метана (-188°C), а температурный диапазон жидкого состояния близок к авиакеросину (145°C). Хладоресурс пропана, приходящийся на единицу массы, соизмерим с хладоресурсом метана (рис. 3). Причем значительная часть его хладоресурса приходится на жидкую фазу, что дает возможность создавать компактные бортовые охлаждающие системы. Плотность сжиженного пропана в зависимости от температуры варьируется в пределах от 585 до 730 кг/м³.

Для размещения пропана на борту ВС по сравнению с авиакеросином потребуется незначительное (примерно на 4–8%) увеличение объема топливных баков при равной энергоемкости. Таким образом, имеется потенциальная возможность модифицировать существующие ВС для работы на пропане. Для этого, так же как и для АСКТ, потребуется лишь несложная модификация двигателей. Пропановая топливная система ВС также будет мало отличаться от штатной (керосиновой).

Широкий температурный диапазон жидкого состояния значительно облегчает решение проблем с транспортировкой

и хранением пропана в наземных условиях и использованием его на борту ВС. Он может храниться в жидком виде практически без потерь в теплоизолированных емкостях при нормальном давлении или в нетеплоизолированных при небольшом избыточном давлении, достигающем 1,6 МПа при +40°C.

По сравнению с авиакеросином пропан, так же как и бутан, обладает достаточно высокой термостабильностью. Он менее агрессивен, чем авиакеросин, по отношению к конструкционным, резинотехническим и уплотнительным материалам.

Пропан обладает еще одним серьезным преимуществом перед чисто криогенными топливами — метаном и водородом. Как указывалось выше, его необходимые запасы можно хранить на аэродромах и стартовых площадках практически без потерь. И охлаждать по мере необходимости до криогенных температур только то количество топлива, которое необходимо для заправки очередного ВС. При такой технологии отпадает необходимость иметь в аэропорту большие криогенные емкости и мощные системы поддержания топлива в криогенном состоянии. Все это упрощает и удешевляет технологические операции при использовании пропана в качестве топлива.

Более низкая, чем у метана, температура плавления и широкий температурный диапазон жидкого состояния делают пропан поистине уникальным веществом для всесторонних исследований, связанных с поиском оптимальных конструкторских, технологических и эксплуатационных решений при создании ВС с криогенными топливами. В частности, при проведении исследований широкий температурный диапазон жидкого состояния пропана позволяет постепенно понижать его температуру, что даст возможность своевременно

выявлять и предотвращать развитие нежелательных явлений в процессе испытаний. Например, опасность возникновения аварийной ситуации (при нарушении теплоизоляции) из-за перегрева пропана маловероятна, в то время как для метана и тем более для водорода такая опасность весьма реальна и чревата самыми серьезными последствиями. Это же свойство пропана позволяет более безопасно производить доводку новой авиационной техники, рассчитанной на использование криогенного топлива, начиная с умеренно низких температур.

В плане практической реализации результатов исследований этого этапа экономически целесообразнее, видимо, будет использовать в качестве топлива на ВС не чистый пропан, а так же, как и в предыдущем этапе, смесь пропана, бутана, этана и других углеводородов с низкой температурой кристаллизации. Эта смесь, которую условно можно назвать АСКТ-К (криогенное АСКТ), обладает практически теми же свойствами, включая криогенные, что и пропан, но будет иметь меньшую стоимость за счет более простой технологии производства и широкой сырьевой базы. Такие показатели делают криогенное топливо из смеси легких парафиновых углеводородов весьма привлекательным в техническом, эксплуатационном и коммерческом отношениях.

Таким образом, при внедрении в авиационную технику результатов второго этапа исследований можно модифицировать существующие и создать новые ВС с улучшенными летно-техническими и экологическими характеристиками. Коммерческие результаты от внедрения пропана и АСКТ-К также дадут возможность получить прибыль и дополнительные средства для продолжения исследовательских работ.

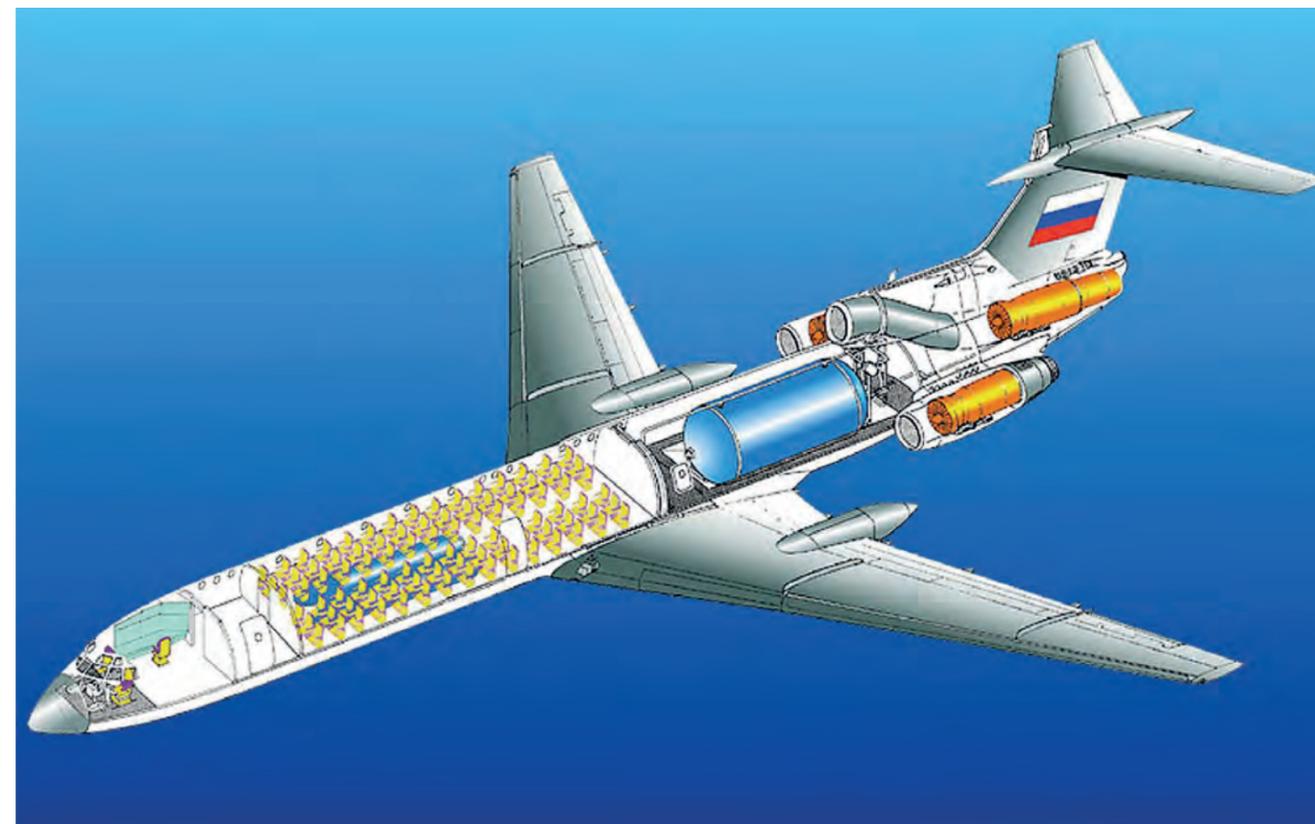


Рис. 6. Грузопассажирский самолет ТУ-156 с двигателями НК-89

Результатом внедрения второго этапа предлагаемых исследований является приобретение опыта эксплуатации ВС на криогенных топливах в штатных условиях с использованием пропана — относительно более дешевого и безопасного в эксплуатационном отношении газа, чем метан и водород.

СПГ, сжиженный метан

Следующим объектом исследований внедрения в авиационную технику сжиженных углеводородных газов и водорода является сжиженный метан (СПГ). Он более сложен в эксплуатационном отношении, чем АСКТ и АСКТ-К. Поэтому начало его использования на ВС можно отнести к 2026–2030 годам.

Теплота сгорания метана (CH₄) на ~15% выше, чем у авиакеросина. Температура его кипения при нормальном давлении составляет –162°C, температура замерзания находится на уровне –183°C, а температурный диапазон жидкого состояния — 21°C. Хладоресурс метана, приходящийся на единицу массы, близок к хладоресурсу пропана. Системы кондиционирования воздуха на метане по объему и массе будут значительно больше пропановых, так как основная доля хладоресурса метана находится в газовой фазе. Плотность сжиженного метана в зависимости от температуры варьируется в пределах от 425 до 450 кг/м³. По теплоте сгорания, приходящегося на единицу объема, метан уступает пропану примерно в 1,5 раза, по хладоресурсу — в 1,3 раза, по плотности — в 1,5–1,6 раза.

Для размещения на борту ВС метанового топлива по сравнению с авиакеросином потребуется, при равной энергоемкости, увеличить примерно в 1,5–1,6 раза объем топливных баков (рис. 6). Кроме того, они должны быть рассчитаны на небольшое избыточное давление и хорошо теплоизолированы. Таким образом, в отличие от АСКТ, возможность несложной модификации существующих ВС для работы на сжиженном метане весьма проблематична. Двигатели и планер потребуют значительных переделок. Метановая топливная система ВС также будет значительно сложнее штатной. Могут возникнуть проблемы (если они не будут решены на предыдущих этапах) с конструктивными, уплотнительными и теплоизоляционными материалами, а также с наземной инфраструктурой.

Широкое использование на ВС метанового топлива в газообразном виде (сжатого метана) вряд ли будет иметь реальную перспективу из-за значительной потери коммерческой нагрузки, обусловленной весом топливных баков — баллонов высокого давления. Хотя за рубежом такие исследования проводятся и имеются летающие образцы — например, легкий самолет «Хаски» с поршневым двигателем фирмы «Авиат».

У метанового топлива есть лишь одно серьезное преимущество перед АСКТ — достаточно большие ресурсы сырья в составе природного и нефтяного газов, газов нефтепереработки и других источников. Хотя, с другой стороны, следует заметить, что имеющихся ресурсов пропана и бутана в попутном нефтяном газе вполне достаточно для удовлетворения потребностей не только перспективных уникальных сверхзвуковых и гиперзвуковых ВС, количество которых вряд ли будет велико, но и другой авиационной техники. Расходы пропана и бутана для таких ВС не повлияют на других потребителей сырьевых ресурсов пропана. Кроме того, при осушке природного

газа высвобождается довольно большое количество сырья для получения АСКТ в количествах, достаточных для более широкого его применения в авиации и космонавтике.

Проведенный анализ показал, что использование метанового топлива связано с решением фактически тех же сложных температурных, прочностных, конструктивных, аэродинамических, схемных, эксплуатационных, аэродромных, транспортных, кадровых и других проблем, что и при использовании сжиженного водорода. Это лишний раз подтверждает правомерность предлагаемого этапного подхода в исследовании и внедрении газотопливной технологии в авиационную технику. Не имея опыта эксплуатации ВС вначале на АСКТ, а затем и на пропане, вряд ли удастся в случае необходимости в сжатые сроки и с относительно малыми затратами внедрить в массовом порядке в авиационную технику криогенное метановое, а затем и водородное топливо.

Как вариант практической реализации результатов исследований использования метана в качестве топлива можно предложить смесь, состоящую в основном из метана и пропана. Оптимальное соотношение составляющих этой смеси необходимо исследовать. Эта смесь, которую условно можно назвать АСКТ-М, будет иметь более высокую плотность, более широкий диапазон жидкого состояния и, вероятно, меньшую стоимость.

От исследований к внедрению

Таким образом, в условиях ограниченности экономических ресурсов страны и необходимости при внедрении газотопливной технологии в авиационную технику решать многочисленные сложные и дорогостоящие научные и технические проблемы, обусловленные теплофизическими и эксплуатационными особенностями газовых топлив, четко просматривается логическая последовательность выполнения исследований в виде четырех этапов:

БУТАН→ПРОПАН→МЕТАН→ВОДОРОД.

В табл. 2 в обобщенном виде представлена характеристика каждого этапа и уровень готовности основных элементов внедрения различных ГМТ, а также сформулированы основные задачи каждого этапа внедрения. Данные таблицы подтверждают целесообразность предложенной этапности внедрения газовых топлив в авиационную технику. Предлагаемая очередность исследований и внедрения газовых топлив, исходя из приведенного выше анализа, представляется технически и экономически весьма обоснованной.

В этом случае будет обеспечена возможность более быстрого внедрения в промышленность России результатов научных достижений, приобретенных на каждом этапе исследований, и получения от этого дополнительных средств для проведения дальнейших работ. Кроме того, это позволит постепенно, при значительно меньших затратах изучить особенности и приобрести опыт эксплуатации газотопливных ВС на относительно высоком уровне температур, который можно затем использовать при создании авиационной техники, использующей топлива на следующем, более низком температурном уровне, вплоть до применения жидкого водорода (если наука к тому времени не откроет более эффективный или более приемлемый в эксплуатационном отношении аккумулятор энергии).

В конечном итоге целесообразность и перспективы широкого использования в каком-либо качестве какого-либо из газов или их смесей в авиационной и других видах техники должна определить экономическая эффективность их применения. Для этого необходимы последовательное комплексное изучение и анализ всех технико-экономических аспектов применения рассматриваемых газов, начиная с разработки и производства ВС и самого газового топлива и кончая особенностями эксплуатации ВС, которые будут их

использовать. Эти исследования должны также включать анализ специфики создания наземной инфраструктуры обслуживания, учет возможной динамики изменения цен этих газовых топлив относительно цены авиакеросина и т. п. Поэтому каждое из рассматриваемых газовых топлив может иметь свою нишу (потребителя) в системе хозяйственного оборота, если при определенных требованиях обеспечит необходимый эффект при меньших удельных затратах.

Литература

1. Яновский Л. С., Зайцев В. П. Преимущества газового топлива АСКТ перед реактивным топливом ТС-1 // Авиаглобус. — 2010. — № 2 (130). — С. 26–29.
2. Аджиев А. Ю., Зайцев В. П., Маврицкий В. И., Постоев С. К., Шмаль Г. И., Яновский Л. С. Внедрение газотопливной технологии на воздушном транспорте — путь к удешевлению перевозок в Арктическом и Дальневосточном макрорегионах // АРКТИКА. Экология и экономика. — 2012. — № 2 (6). — С. 94–101.
3. Бащенко Н. С., Пуртов П. А., Аджиев А. Ю., Зайцев В. П. Получение нового авиационного топлива АСКТ на газоперерабатывающих заводах // Недропользование XXI век. — 2011. — № 6 (31). — С. 34–38.
4. Самохин А. Газолет: приоритет, который мы упускаем // Нефтегазовая вертикаль. — 2011. — № 2. — С. 38–42.
5. Зайцев В. П. Газовая альтернатива авиакеросину // Газовый бизнес. — 2011. — № 6. — С. 40–45.
6. Зубков В. А., Зайцев В. П., Куликов А. С. Газомоторное топливо: проблемы и эффективность // Газовая промышленность. — 2013. — № 9 (695). — С. 64–67.
7. Дубовкин Н. Ф., Брещенко Е. М. Легкие моторные топлива и их компоненты. Справочник. — М.: «Химия», 1999. — С. 480.
8. Шмаль Г., Зайцев В. Пригодится на земле и в небе // Нефть России. — 2008. — № 7. — С. 76.
9. Шмаль Г. И., Зайцев В. П., Аджиев А. Ю. Проблемы рационального использования попутного нефтяного газа в северных регионах России // Экологический вестник России (ЭВР). — 2009. — № 7. — С. 10–14.
10. Аджиев А. Ю., Зайцев В. П., Маврицкий В. И., Постоев С. К., Фаворский О. Н., Шмаль Г. И. Дополнительные возможности рационального использования попутного нефтяного газа // Газохимия. — 2010. — № 4–5. — С. 40–43.
11. Бакулин В. Н., Брещенко Е. М., Дубовкин Н. Ф., Фаворский О. Н. Газовые топлива и их компоненты: свойства, получение, применение, экология: Справочник. — М.: МЭИ, 2009. — С. 614.
12. Карпов С. А., Капустин В. М., Старков А. К. Автомобильные топлива с биоэтанолом. — М.: «КолосС», 2007. — 216 с.
13. Аджиев А. Ю., Пуртов П. А. Подготовка и переработка попутного нефтяного газа в России. В двух частях. — Краснодар: ЭДВИ, 2014. — Ч. 1. — 776 с. — Ч. 2. — 508 с.
14. Дубовкин Н. Ф., Яновский Л. С., Галимов Ф. М., Иванов В. Ф., Сагидуллин Р. Н. Авиационные криогенные углеводородные топлива. — Казань: «АБАК», 1998. — 255 с.
15. Рачевский Б. С. Сжиженные углеводородные газы. — М.: «Нефть и газ», 2009. — 640 с.

UDC 536.24: 665.642: 662.6

SPECIFICS OF GAS ENGINE FUELS INTRODUCTION IN AVIATION EQUIPMENT

V.V. Arkhipov¹, V.P. Zaitsev², I.Yu. Zatyamin², N.B. Kosterev³, L.S. Yanovsky⁴

Heroes' Club of town Zhukovsky¹, «Interaviagaz», JSC², Research Institute of the Economy of the Aircraft Industry JSC³, Federal State Budgetary Institution «Central Institute of Aviation Motors»⁴

About the authors

Valery Vladimirovich Arkhipov, PhD in Economics, co-chairman of the Heroes' Club of town Zhukovsky;

Vyacheslav Petrovich Zaitsev, full member of the Russian Academy of Cosmonautics named after K.E. Tsiolkovsky, General Director, JSC «Interaviagaz»;

Igor Yurievich Zatyamin, Deputy General Director of JSC «Interaviagaz»;

Nikolay Borisovich Kosterev, Deputy General Director, JSC «Research Institute of the Economy of the Aircraft Industry»;

Leonid Samoilovich Yanovsky, Doctor of Technical Sciences, Professor, Honored Scientist of the Russian Federation, Head of the Department of Engines and Chemotology of CIAM.

The development of humanity needs requires the creating of aircraft with high supersonic and even hypersonic flight speeds. In this regard, there is a need to search for new resources to create the environmentally safe and more energy-intensive fuels, having at the same time long lasting cold resource. These qualities are characteristic of alternative gas fuels: low-boiling hydrocarbon gases (methane, propane, butane, etc.) and hydrogen. A strategy is proposed in this paper for investigating and introducing such fuels in aircraft under limited funding.

Key words: gas engine aviation; aviation gas; gas fuel; gas engine fuel; alternative condensed fuel; ASKT; LNG; GMF; ecological air transport; gas-let.

References

1. L.S. Yanovsky, V.P.Zaitsev, Advantages of ASKT gas fuel over jet fuel TS-1. // Aviaglobus magazine - 2010 - №2 (130) - pp. 26-29.
2. A.Yu. Adzhiev, V.P Zaitsev, V.I. Mavritskiy, S.K. Postoev, G.I. Shmal, L.S. Yanovskiy The adaption of gas-fuel technology in air transport is a way to reduce the cost of transportation in the Arctic and Far Eastern macro-regions. // Journal «ARCTIC. Ecology and Economics» - 2012 - No. 2 (6), pp. 94-101. Moscow.
3. N.S. Baschenko, P.A. Purtov, A.Yu. Adzhiev, V.P. Zaitsev Obtaining new ASKT aviation fuel at gas processing plants. // magazine «Subsoil use - XXI century», No. 6 (31), 2011. Pages 34-38.
4. A. Samokhin, Gasolet: a priority that we are missing. // Journal «Oil and Gas Vertical», No. 2, 2011. Pages 38-42.
5. V.P. Zaitsev, Gas alternative to aviation kerosene. // «Gas business» magazine No. 6, November-December 2011. Pages 40-45.
6. V.A. Zubkov, V.P. Zaitsev, A.S. Kulikov, Gaseous motor fuel: problems and efficiency. // Journal «Gas Industry» No. 9 (695), 2013. pp. 64-67.
7. N.F. Dubovkin, E.M. Breshchenko, Light motor fuels and their components. // Handbook. M. ed. «Chemistry» 1999.S. 480.
8. G.Shmal, Zaitsev V. It will come in handy on earth and in the sky. // Journal «Oil of Russia» . No. 7, July 2008 P.76.
9. G.I.Shmal, V.P. Zaitsev, A.Yu. Adzhiev, Problems of the rational use of associated petroleum gas in the northern regions of Russia // Journal « Russian Ecological Bulletin » (REB) No. 7, 2009. Pages 10-14.
10. A.Yu.Adzhiev, V.P.Zaitsev, V.I. Mavritsky, S.K. Postoev, O.N. Favorsky, G.I. Shmal, Additional opportunities for the rational use of associated petroleum gas. // Journal «Gas chemistry», October-November, No. 4-5 (14-15), 2010. Pages 40-43.
11. V.N. Bakulin, E.M. Breshchenko, N.F. Dubovkin, O.N. Favorsky Gas fuels and their components: properties, production, application, ecology. // Handbook. M. «Publishing house of Moscow Power Engineering Institute». 2009. S. 614.
12. S.A. Karpov, V.M. Kapustin, A.K. Starkov Automobile fuels with bioethanol. // M. «KolosS», 2007.-216 p.
13. A.Yu. Adzhiev, P.A. Purtov Preparation and processing of associated petroleum gas in Russia. (2 hours) // Krasnodar: EDVI, 2014.- Ch. 1 - 776 s., Part 2 - 508 s.
14. N.F. Dubovkin, L.S. Yanovskiy, F.M. Galimov, V.F. Ivanov, R.N. Sagidullin Aviation cryogenic hydrocarbon fuels. // Kazan. Publishing house «ABAK» 1998. - 255 p.
15. B.S. Rachevsky Liquefied hydrocarbon gases. // M. Publishing House «Oil and Gas», 2009. - 640 p.

¹ Heroes' Club of town Zhukovsky, 140180, town Zhukovsky, Moscow Region, st. Frunze, 23;

² JSC «Interaviagaz», 105005, Moscow, st. Radio, 17, Central Aerohydrodynamic Institute named after Professor N.E. Zhukovsky;

³ Research Institute of the Economy of the Aircraft Industry JSC, 111024, Moscow, Entuziastov passage, 15, building 1;

⁴ Federal State Budgetary Institution «Central Institute of Aviation Motors» (CIAM), 111116, Moscow, Aviamotornaya, 2.