

УДК 621.45

# К ВОПРОСУ О МОДЕЛИРОВАНИИ ОБЛИКА ПЕРСПЕКТИВНЫХ САМОЛЕТОВ НА ГАЗОВЫХ ТОПЛИВАХ НА БАЗЕ СЕМЕЙСТВА САМОЛЕТА SUKHOI SUPERJET 100: ИННОВАЦИОННОЕ РАЗВИТИЕ ГРАЖДАНСКОЙ АВИАЦИИ

**А.Г. Братухин**<sup>1</sup>, д-р техн. наук, профессор, Заслуженный деятель науки РФ, International Expert in Aerospace and CALS (USA, ABI — 2006); Distinguished Chair of Aeronautics (USA, World Academy of Letters — 2009), награжден Американской Медалью Чести в области образования, Советник РГУИТП по вопросам CALS-технологий

**Л.С. Яновский**<sup>2</sup>, д-р техн. наук, профессор, начальник отдела «Двигатели и химмотология», Заслуженный деятель науки РФ yanovskiy@ciam.ru

**А.В. Луковников**<sup>2</sup>, д-р техн. наук, доцент, ведущий научный сотрудник отдела «Силовые установки», Lukovnikof@mail.ru

**В.В. Разносчиков**<sup>2</sup>, старший научный сотрудник отдела «Двигатели и химмотология», канд. техн. наук, доцент raznoschikov@mail.ru

**Д.Ю. Стрелец**<sup>3</sup>, канд. техн. наук, заместитель начальника проектно-исследовательского отделения okb@sukhoi.org

1 — Российский государственный университет инновационных технологий и предпринимательства (РГУИТП)

2 — ЦИАМ им. П.И. Баранова

3 — ОАО «ОКБ Сухого»

А.Г. Братухин



Л.С. Яновский



А.В. Луковников



В.В. Разносчиков



Д.Ю. Стрелец



*В статье приводится описание концепции и комплекса математических моделей, использованных для оценки эффективности применения сжиженного природного газа (СПГ) в авиации, в частности, на примере семейства самолетов Sukhoi SuperJet 100. Приводятся результаты сравнительных расчетов показателей эффективности магистрального пассажирского самолета при переходе с авиакеросина на СПГ. Показана как техническая, так и экономическая целесообразность перехода авиации на новый вид топлива.*

## Введение

К числу важнейших достижений современной российской авиационной промышленности относится семейство самолетов Sukhoi SuperJet 100 (SSJ-100), созданных ОАО «Компания «Сухой» [1]. Во многом проект SSJ-100 уникален для отечественного авиастроения, однако необходимо уже сейчас задумываться о перспективе его развития.

Одно из глобальных направлений дальнейшего развития российского самолето- и авиадвигателестроения — это переход на новые виды топлива, которые обеспе-

чат дальнейшее снижение стоимости и повышение эффективности эксплуатации, а также позволят улучшить эмиссионные характеристики двигателей. В первую очередь, это относится к природному газу, который в настоящее время является самым доступным [2, 3]. При этом запасы газа в России составляют более 40% мировых ресурсов. Сжиженный природный газ, а также жидкие горючие, полученные из него посредством переработки, в настоящее время используются в качестве моторных, в том числе авиационных, топлив (компания BP, Shell, Exxon Mobil и др.)

Газовые топлива и жидкие топлива из газа обладают повышенной, по сравнению с авиакеросином, массовой теплотой сгорания (на 5%), лучшими экологическими характеристиками (по выбросам  $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_x$ ,  $\text{C}_n\text{H}_m$ ) и хладоресурсом. В них отсутствуют гетероатомные соединения и механические примеси, нет свободной воды, что обуславливает возможность значительного увеличения ресурса авиационных двигателей при использовании газовых топлив. Кроме того, себестоимость авиагаза существенно (~ в 4 раза) ниже, чем стоимость авиакеросина. Все

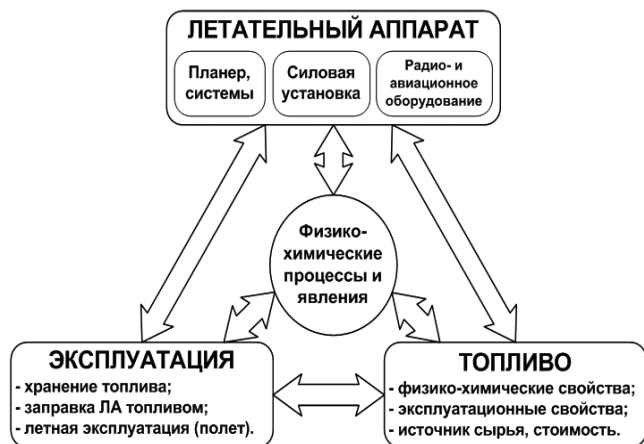


Рис. 1. Принципиальная схема системы «ЛА–топливо–эксплуатация»

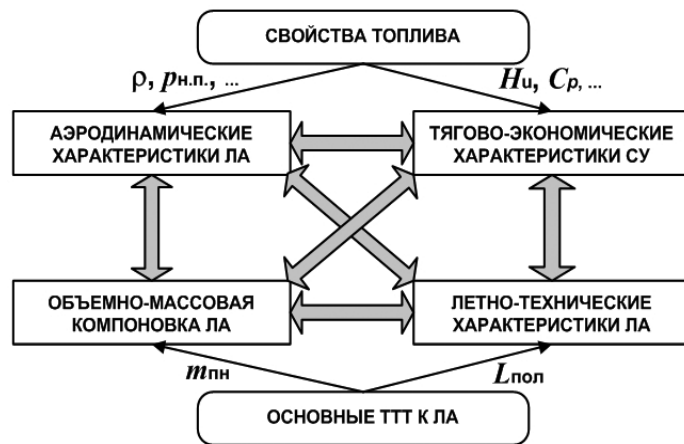


Рис. 2. Влияние свойств топлива на характеристики ЛА и СУ

это в настоящее время в значительной мере предопределяет интерес к оценке перспектив применения газовых топлив в авиации.

В нашей стране впервые в мире проведена эксплуатация под наблюдением самолета Ту-155 (1989 г.) на сжиженном природном газе (СПГ) и вертолета Ми-8ТГ (1988 г.) на авиационном сконденсированном газовом (пропан-бутановом) топливе (АСКТ). Было показано, что перевод авиации на эти виды топлива принципиально возможен.

Вместе с тем, внедрение СПГ в авиацию потребует решения ряда проблем. Во-первых, необходимо создать авиационную газовую криогенную инфраструктуру. Во-вторых, потребуются модернизация существующей авиационной техники под использование СПГ, а новые летательные аппараты (ЛА) и их силовые установки (СУ) необходимо разрабатывать уже с учетом возможности эксплуатации на криогенном газовом топливе.

Тип топлива сильно влияет на облик ЛА и СУ, что, в свою очередь, сказывается на их характеристиках. Интеграцию СУ и ЛА при переходе на новое газовое топливо невозможно рассматривать в отрыве от эксплуатационных особенностей последнего. Необходимо оценить, как при этом изменятся критерии эффективности системы «летательный аппарат — силовая установка — топливо», какие узлы и агрегаты вызовут сложности в процессе проектирования нового ЛА и СУ. Для этого необходимо иметь возможность давать достоверную оценку перспективным проектам ЛА.

Известно [4], что между элементами системы «летательный аппарат — топливо — эксплуатация», существуют сложные связи (рис. 1). Поэтому при создании ЛА

нового типа на газовом топливе необходимо учитывать требования, предъявляемые каждым из элементов к другим элементам и к системе в целом. При создании перспективных ЛА, использующих криогенные или газовые сконденсированные топлива, учет влияния энергетических и эксплуатационных свойств топлива на характеристики ЛА и СУ должен быть обязательным, т.к. свойства топлива оказывают влияние на формирование технического облика ЛА и СУ. Без этого в настоящее время нельзя создать эффективный и конкурентоспособный ЛА.

Решить такую сложную проблему, как выбор нового типа топлива, обеспечивающего наилучшие показатели эффективности создаваемого или модернизируемого ЛА, можно путем построения комплекса математических моделей и глобальной оптимизации на ЭВМ параметров ЛА, СУ и топлива.

Летно-технические (ЛТХ) и эксплуатационные характеристики ЛА в наибольшей степени зависят от таких свойств топлива, как плотность  $\rho$ , низшая массовая теплота сгорания  $H_u$ , давление насыщенных паров  $p_{н.п.}$ , удельная теплоемкость  $C_p$  и др. (рис. 2). Значительное влияние эти свойства топлива оказывают и на конструкцию самолета. ЛТХ ЛА, в свою очередь, наиболее сильно зависят от аэродинамических и объемно-массовых параметров планера и тягово-экономических характеристик СУ. Влияние типа топлива на рабочий процесс и параметры СУ (тягу  $P$  и удельный расход топлива  $C_{уд}$ ) обусловлено, в основном, теплотой сгорания топлива и теплофизическими свойствами продуктов его сгорания в воздухе. При этом топливо в значительной мере определяет облик двигателя и особенности его конструкции. Эффективность СУ существенно зави-

сит от эксергетических возможностей топлива, т.е. от возможности увеличить работу цикла. Например, турбореактивный двигатель на авиакеросине превращает в тягу только теплоту сгорания последнего, а при использовании СПГ появляются возможности реализации хладоресурса и работоспособности топлива до его сгорания.

ЛТХ ЛА зависят, главным образом, от компоновки и аэродинамических характеристик планера и параметров СУ, и это позволяет значительно упростить формирование технического облика ЛА и не рассматривать вопросы, связанные с бортовым оборудованием и эксплуатацией самого ЛА.

Отчетливо выраженная многодисциплинарность проблемы и необходимость учета факторов, зависящих от применяемого топлива и влияющих на облик системы «ЛА–СУ», приводят к необходимости применения комплексной математической модели (КММ), включающей математические модели (ММ) ЛА, СУ и топлива. Это означает, что для оценки эффективности применения СПГ на борту ЛА необходим переход от рассмотрения системы «ЛА–СУ» к системе «ЛА–СУ–топливо», а применяемая КММ должна позволять рассчитывать не только тягово-экономические и габаритно-массовые характеристики СУ, но и геометрические, аэродинамические характеристики (АДХ), а также объемно-массовые характеристики (ОМХ) и траекторные параметры движения ЛА по типовым программам (профилям) полета, а также влияние на них свойств СПГ. Кроме этого требуется учет экологических (шум, эмиссия вредных веществ в атмосферу) и экономических параметров системы «ЛА–СУ–топливо». Все это обуславливает необходимость комплексного анализа

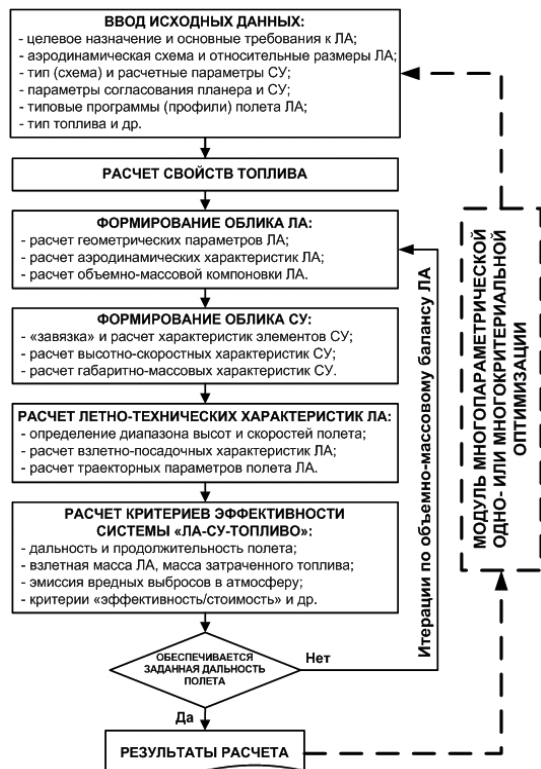


Рис. 3. Блок-схема КММ системы «ЛА-СУ-топливо»

исследуемой системы с выбором критерия (или нескольких критериев) оценки ее эффективности.

### Комплексная математическая модель системы «ЛА-СУ-топливо»

Для решения задач по формированию оптимального предварительного технического облика ЛА и СУ на СПГ по критериям эффективности полетного задания используется КММ, блок-схема которой приведена на рис. 3. В ее состав входят:

- ММ ЛА для расчета геометрических, аэродинамических, объемно-массовых и летно-технических характеристик ЛА;
- ММ СУ для расчета высотно-скоростных (ВСХ), дроссельных (ДХ) и габаритно-массовых (ГМХ) характеристик одноконтурных (ТРД и ТРДФ) и двухконтурных (ТРДД и ТРДДФ) турбореактивных двигателей;
- блок расчета критериев эффективности (КЭ) системы «ЛА-СУ-топливо».

Подробно структура и состав этих ММ рассмотрены в [5].

Кроме того, в состав КММ интегрированы математические модели для расчета свойств топлив, воздуха и продуктов сгорания, экономических и экологических показателей СУ и ЛА. Они значительно расширяют возможности исследования влияния «топливных» факторов на параметры и эффективность системы

«ЛА-СУ-топливо». В частности, имеется возможность проводить расчетно-теоретические исследования по обоснованию состава перспективных топлив, оптимизированных не только по таким «самолетным» критериям, как транспортная или пассажирская эффективность, дальность полета и др., но и по стоимости одного летного часа, эмиссии вредных веществ в атмосферу и др.

Особенностью КММ является сопряжение «самолетных», «двигательных» и «топливных» аспектов проектирования, взаимодействие с пакетами многопараметрической оптимизации, которые позволяют оптимизировать самолетные, двигательные и топливные параметры с целью формирования оптимального облика системы «ЛА-СУ-топливо» по выбранным КЭ.

Обязательным элементом алгоритма расчета габаритов и массы узлов и агрегатов криогенной топливной системы является ММ топлив [6]. Кроме этого, ММ топлив используется для расчета физико-химических процессов, происходящих в топливе в камере сгорания, теплообменниках, и других элементах. Такая ММ (рис. 4), построенная по результатам обобщения наиболее достоверных опубликованных методик расчета свойств веществ, позволяет определять теплофизические (теплоту сгорания  $H_u$ , плотность, давление насы-

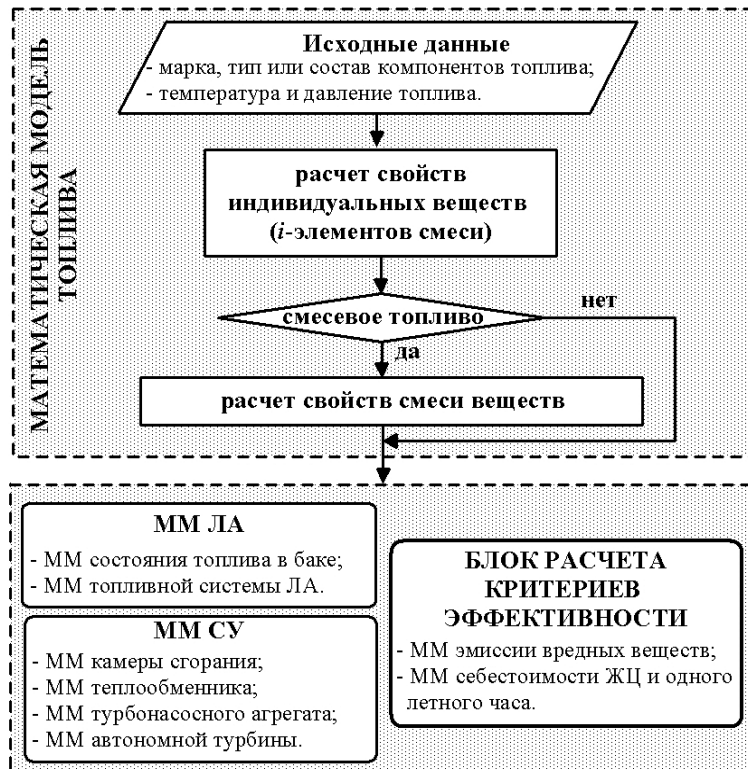


Рис. 4. Блок-схема ММ топлив и ее связь с ММ ЛА и ММ СУ

щенных паров, энтальпию, теплоемкость, теплоту испарения и др.) и переносные (вязкость, теплопроводность и др.) свойства как индивидуальных веществ (водород  $H_2$ , алканы  $C_nH_{2n+2}$ ), так и типов топлив (керосины, авиационное сконденсированное топливо, СПГ и др.).

Для проверки адекватности КММ были проведены расчеты и выполнены сравнительные оценки характеристик для ряда серийных авиадвигателей (ПС-90А, Д-30КП, Д-18Т, Д-36, SaM-146) и самолетов (Ту-204, Ил-76, Ан-124, SSJ-100) на керосине. Погрешность определения тяги и удельного расхода топлива составляет не более 5%. Погрешности же расчета АДХ, ОМХ и ЛТХ (в зависимости от схемы ЛА и расчетного числа М полета) составляют не более 10%, что приемлемо на этапе предварительного проектирования ЛА на альтернативных топливах.

### Постановка задачи исследования

Наиболее целесообразным представляется поэтапный перевод авиации на СПГ. На первом этапе необходимо выполнить модернизацию существующего SSJ-100 и его двигателей путем замены керосиновой топливной системы на криогенную. СПГ технически сложно разместить в крыле (в отличие от керосина), поэтому на борту SSJ-100 потребуются установка дополнительного криогенного топливного бака (КТБ). Это

приведет к незначительному увеличению массы самолета (из-за усиления элементов конструкции крыла вследствие его «разгрузки» из-за размещения КТБ на фюзеляже) и массы СУ (за счет установки на ней дополнительных агрегатов: топливно-насосного агрегата и теплообменника-испарителя для газификации СПГ).

Примем, что увеличение массы конструкции SSJ-100 при переходе с керосина на СПГ компенсируется снижением массы топлива  $m_{топл}$  с целью сохранения неизменной взлетной массы самолета. Требуется при фиксированной массе полезной нагрузки  $m_{пн}$  (при заданном количестве пассажиров  $N_{пас}$  с багажом) оценить изменение дальности полета  $L_{пол}$  модернизированного самолета и таких критериев его эффективности, как эмиссия  $CO_2$  за полет, стоимость летного часа  $C_{лч}$ , топливная эффективность (ТЭ) самолета, т.е. расход топлива на перевозку одного пассажира на дальность в один километр:

$$TЭ = m_{топл} / (N_{пас} L_{пол}), \quad (1)$$

называемый также критерием пассажирской эффективности, г топл./ (пас. · км).

Стоимость летного часа определяется по формуле [7]:

$$C_{лч} = C_{ам}^{ЛА} + C_{ам}^{СУ} + C_{то}^{ЛА} + C_{то}^{СУ} + C_{экип} + C_T, \quad (2)$$

где расходы на амортизацию ( $C_{ам}^{ЛА}$  и  $C_{ам}^{СУ}$ )

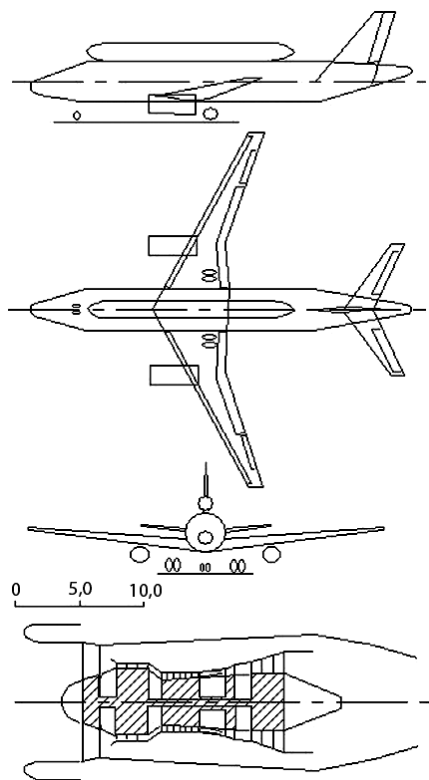


Рис. 5. Облик самолета и силовой установки

и оплату труда летного экипажа ( $C_{экип}$ ) за один час полета в расчетах нами приняты одинаковыми для SSJ-100 на керосине (марки ТС-1) и на СПГ, а стоимость технического обслуживания ( $C_{то}^{ЛА}$  и  $C_{то}^{СУ}$ ) для SSJ-100 на СПГ — на 10% выше. Это означает, что на значение  $C_{лч}$  в основном будет оказывать влияние стоимость топлива  $C_T$ , расходуемого за полет:

$$C_T = 1,1 Q_{топл} t_{пол} C_{топл}, \quad (3)$$

где  $Q_{топл}$  — расход топлива, кг/ч;  $t_{пол}$  — налет самолета ( $t_{пол} = 1$  час), час;  $C_{топл}$  — цена топлива, руб./кг.

Примем, согласно [8], что цена СПГ в 4 раза меньше цены авиакеросина ТС-1.

Рассмотрим в качестве прототипа ближнемагистральный самолет (БМС) Sukhoi SuperJet 100 разработки и производства ОАО «Компания «Сухой» (Генеральный директор ОАО «Компания «Сухой» член-корр. РАН Погосян М.А.; генеральный директор КНААПО — к.т.н. Пекарш А.И.) с двигателем SaM-146 совместной разработки и производства российского ОАО «НПО «Сатурн» и французской компании SNECMA, предназначенный для перевозки 80–100 пассажиров на расстояние до 4000 км.

Облик исследуемого самолета на СПГ и его СУ на базе ТРДД показан на рис. 5.

**Результаты исследования системы «ЛА-СУ-топливо»**

С использованием КММ были проведены расчеты характеристик СУ и ЛА. Для самолета на СПГ в таблице приведены основные исходные данные, а также значения топливной эффективности  $TЭ = TЭ^{СПГ} / TЭ^{кер}$ , эмиссии  $CO_2$  за весь полет  $\bar{m}_{CO_2} = m_{CO_2}^{СПГ} / m_{CO_2}^{кер}$ , стоимости летного часа  $\bar{C}_{лч} = C_{лч}^{СПГ} / C_{лч}^{кер}$  и дальности полета  $\bar{L}_{пол} = L_{пол}^{СПГ} / L_{пол}^{кер}$ , отнесенные к соответствующим значениям для самолетов на авиакеросине ТС-1.

Анализ показал, что относительная масса снаряженного самолета

$$\bar{m}_{снаряж.ЛА} = \bar{m}_{пл} + \bar{m}_{СУ} + \bar{m}_{т.с.},$$

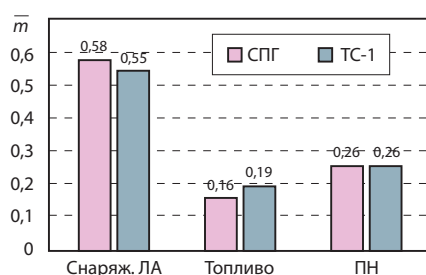


Рис. 6. Сравнение относительных масс снаряженного самолета, топлива и полезной нагрузки SSJ-100 на СПГ и на ТС-1

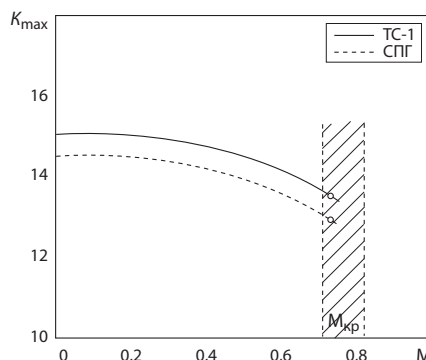


Рис. 7. Сравнение максимального аэродинамического качества SSJ-100 на СПГ и на ТС-1

включающая массу планера, СУ и топливной системы, при переходе с керосина на СПГ увеличивается на 4,4% (рис. 6). Относительная масса топлива  $\bar{m}_{топл}$  на борту уменьшается на 5–8 %, а дальность полета при этом уменьшается на 5%.

Установка внешнего КТБ приводит к ухудшению полетного аэродинамического качества  $K_{max}$  ЛА в среднем на 4–6% (рис. 7) при крейсерских числах М полета  $M_{кр} = 0,75–0,8$ .

Моделирование состояния топлива в КТБ показало, что СПГ находится на линии насыщения. В процессе полета ЛА необходимо учитывать температурный предел, при котором давление насыщенных паров может стать выше максимально допустимого по условиям прочности бака.

Создание легкого и прочного авиационного КТБ требует детальной конструкторской проработки. В перспективе возможно создание КТБ, с удельной массой

Таблица. Относительные показатели эффективности SSJ-100 на СПГ

Показатели	БМС
Взлетная масса ЛА, кг	43000
Максимальная масса ПН, кг (количество пассажиров)	11000 (98)
Относительная топливная эффективность,	0,93
Относительная эмиссия $CO_2$ ,	0,76
Относительная стоимость летного часа,	0,74
Относительная дальность полета (с макс. ПН),	0,95

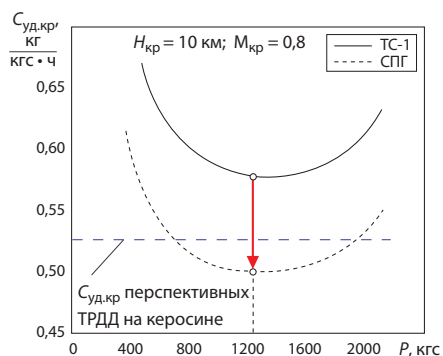


Рис. 8. Дроссельные характеристики SaM-146 на СПГ и на ТС-1

конструкции  $\sim 10 \text{ кг/м}^2$ , обеспечивающего бездренажное суточное хранение СПГ и использование его в полете.

Как известно [3], массовая теплота сгорания СПГ на 17% выше теплоты сгорания авиакеросина ТС-1. Это приводит к пропорциональному уменьшению удельного расхода топлива  $C_{уд.кр}$  на дроссельных режимах работы СУ в крейсерском полете (рис. 8). Видно, что применение СПГ вместо ТС-1 даже без повышения параметров цикла ТРДД (в первую очередь, суммарной степени повышения давления в компрессоре и степени двухконтурности) способствует легкому достижению «рубежных» значений  $C_{уд} \approx 0,52\text{--}0,55 \text{ кг/(кгс}\cdot\text{ч)}$  в крейсерском полете, принятых в качестве проектных для следующего поколения двигателей (типа Leap-X, PW-1000G, ПД-14 и др.) перспективных магистральных самолетов.

Критерий ТЭ, определяемый по формуле (1), при переходе с керосина на СПГ

улучшается в среднем на 7%, стоимость одного летного часа снижается в среднем на 30% (см. таблицу), существенно снижается эмиссия  $\text{CO}_2$ .

Таким образом, при модернизации SSJ-100 под использование СПГ дальность полета меняется незначительно (в пределах 6%). Стоимость одного летного часа на СПГ снижается более чем на 30% за счет повышения топливной экономичности СУ и меньшей стоимости топлива. Расход топлива SSJ-100 на СПГ на один пассажирокилометр снижается, по сравнению с керосином ТС-1, на 6–8%, а эмиссия  $\text{CO}_2$  — на 23–24%. Проведенные исследования для SSJ-100 на СПГ дают основание утверждать о технико-экономической и экологической целесообразности перевода пассажирских (и грузопассажирских) магистральных самолетов на СПГ.

Учитывая имеющуюся возможность индустриального производства СПГ в России, возникает целесообразность разработки межотраслевой инновационной программы НИР и ОКР по созданию на газовых топливах ЛА и наземной инфраструктуры, в частности, на основе перспективного конкурентоспособного семейства региональных и ближнемагистральных самолетов на базе SSJ-100 (рис. 9), созданного с применением информационных технологий, имеющихся в авиационной компании «Сухой» [9].

В разработке и реализации программы целесообразно принять участие Объединенной авиастроительной корпорации (ОАК), Объединенной двигателестро-

тельной корпорации (ОДК), компании «Газпром», государственным научным центрам ЦАГИ, ЦИАМ, ВИАМ, институтам РАН, Российскому государственному университету инновационных технологий и предпринимательства и др. Работы, безусловно, должны выполняться на основе современных методов проектирования и оценки жизненного цикла изделий авиационной техники [10].

В статье показана инновационная направленность применения в гражданской авиации СПГ, в следующей статье будет представлено исследование эффективности применения СЖТ и АСКТ.

### Библиография

1. Веб-ресурс ОАО «Компания «Сухой» — <http://sukhoi.superjet100.com/>.
2. Андреев В.А., Борисов В., Малышев В.В. и др. Внимание — газы: криогенное топливо для авиации. М.: Московский рабочий, 2001. с. 224.
3. Бакулин В.Н., Брещенко Е.М., Дубовкин Н.Ф. и др. Газовые топлива и их компоненты. Свойства, получение, применение, экология: Справочник. М.: Изд. МЭИ, 2009. 614 с.
4. Яновский Л.С., Дубовкин Н.Ф., Галимов Ф.М. и др. Инженерные основы авиационной химмотологии. — Казань: Изд. Казанского университета, 2009. 740 с.
5. Луковников А.В. Концептуальное проектирование силовых установок летательных аппаратов в многодисциплинарной постановке. / Вестник МАИ, Т. 15, № 3, 2008. С. 34–43.
6. Разносчиков В.В., Челанов А.И. Анализ использования криогенных и газовых топлив в силовых установках магистральных самолетов. / Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации, № 134, 2008. С. 10–15.
7. Прозоров Б.Н. Военно-экономический анализ на стадиях жизненного цикла авиационной техники и вооружения. Материалы лекций. М.: ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского, 2008. 177 с.
8. Веб-ресурс «International Energy Agency» — <http://www.iea.org>.
9. Погосян М.А., Братухин А.Г., Савельевских Е.П., Стрелец Д.Ю. Проектирование авиационных комплексов с применением инновационных технологий. Приоритеты авиационных технологий. М.: МАИ. 2004.
10. Братухин А.Г., Иванов Ю.Л., Марьин Б.И. и др. Современные технологии авиастроения. М.: Машиностроение. 1999. 832 с.

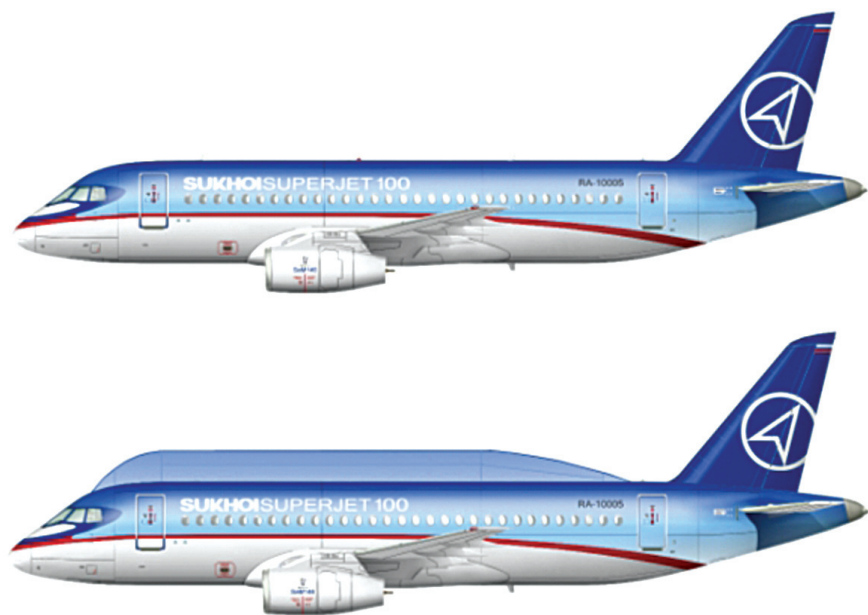


Рис. 9. Ближнемагистральный самолет SSJ-100 на авиакеросине (сверху) и проект самолета на СПГ (снизу)