

## ОБЗОР ПРОБЛЕМ СОЗДАНИЯ СВЕРХЗВУКОВОГО ПАССАЖИРСКОГО САМОЛЁТА НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ В ЧАСТИ СИЛОВОЙ УСТАНОВКИ

© 2023

- А. Д. Алendarь** инженер отделения «Авиационные двигатели»;  
Центральный институт авиационного моторостроения  
имени П.И. Баранова, г. Москва;  
аспирант;  
Московский авиационный институт (национальный исследовательский  
университет);  
[adalendar@ciam.ru](mailto:adalendar@ciam.ru)
- А. И. Ланшин** доктор технических наук, старший научный сотрудник, советник  
генерального директора по науке;  
Центральный институт авиационного моторостроения  
имени П.И. Баранова, г. Москва;  
[ailanshin@ciam.ru](mailto:ailanshin@ciam.ru)
- А. А. Евстигнеев** начальник сектора отделения «Авиационные двигатели»;  
Центральный институт авиационного моторостроения  
имени П.И. Баранова, г. Москва;  
[aaevstigneev@ciam.ru](mailto:aaevstigneev@ciam.ru)
- К. Я. Якубовский** научный сотрудник отдела «Конструкторское бюро роторно-поршневых  
двигателей»;  
Центральный институт авиационного моторостроения  
имени П.И. Баранова, г. Москва;  
[kyyakubovsky@ciam.ru](mailto:kyyakubovsky@ciam.ru)
- М. В. Силуянова** доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Технологии  
производства и эксплуатации двигателей летательных аппаратов»;  
Московский авиационный институт (национальный исследовательский  
университет);  
[dc2mati@yandex.ru](mailto:dc2mati@yandex.ru)

Рассматриваются проблемы создания силовой установки сверхзвукового пассажирского самолёта нового поколения на основе обзора работ, ведущихся в мире по тематике сверхзвукового воздушного транспорта. Показано, что стремление к достижению высоких лётно-технических характеристик и коммерческой эффективности сверхзвукового пассажирского самолёта при удовлетворении современных экологических требований приводит к появлению противоречивых технических решений в части силовой установки: расположения и количества двигателей, облика воздухозаборника и выходного устройства, выбора схемы и проектных параметров двигателя, применения новых высокотемпературных материалов в горячей части двигателя и т.д. Рассмотрены особенности условий работы узлов двигателя сверхзвукового пассажирского самолёта по сравнению с двигателями современных дозвуковых самолётов гражданской авиации и сверхзвуковых самолётов военной авиации. Приведены расчётные оценки влияния различных технических решений на параметры двигателя сверхзвукового пассажирского самолёта. Ввиду сложности и многокритериальности задачи создания силовой установки сверхзвукового пассажирского самолёта её решение требует комплексного подхода на основе тесного взаимодействия специалистов по планеру, двигателю и пр.

*Сверхзвуковой пассажирский самолёт; силовая установка; сверхзвуковой воздухозаборник; шумоглушающее сопло; ТРДД; ДИЦ; керамический композиционный материал*

---

**Цитирование:** Алendarь А.Д., Ланшин А.И., Евстигнеев А.А., Якубовский К.Я., Силуянова М.В. Обзор проблем создания сверхзвукового пассажирского самолёта нового поколения в части силовой установки // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2023. Т. 22, № 1. С. 7-28. DOI: 10.18287/2541-7533-2023-22-1-7-28

В качестве одного из перспективных направлений развития гражданской авиационной техники сегодня рассматривается создание сверхзвукового пассажирского самолёта (СПС). Рост числа Маха крейсерского сверхзвукового полёта самолётов гражданской авиации до  $M = 1,7 \dots 2,2$  позволит повысить эффективность решения задач в интересах бизнеса и государственного управления за счёт увеличения зоны однодневных поездок до 7000 – 8000 км, что особенно актуально в условиях протяжённой территории Российской Федерации [1 - 3].

В последние годы в мире растёт интенсивность исследований и разработок в области СПС [4]. При этом значительное внимание уделяется вопросам минимизации вредного воздействия на окружающую среду – снижения звукового удара при сверхзвуковом полёте, уменьшения уровня шума самолёта в зоне аэропорта, снижения эмиссии вредных веществ при сохранении на высоком уровне требований по эффективности и надёжности СПС [5 – 7]. В настоящее время ни один из проектов СПС (за исключением самолётов первого поколения Ту-144 и Concorde) не реализован, поскольку СПС принципиально отличается от существующих и перспективных дозвуковых самолётов и сверхзвуковых самолётов военной авиации. Проблемы создания СПС в целом и направления по их решению рассмотрены в ряде работ [8 – 10]. СПС условно описывается характеристиками трёх групп: летно-технические (крейсерская скорость, дальность полёта, пассажировместимость и др.), экологические (уровень шума в районе аэропорта, уровень эмиссии вредных веществ, уровень звукового удара) и экономические (стоимость приобретения, жизненного цикла и др.). На каждую из этих групп непосредственное влияние оказывает силовая установка (СУ). В части летно-технических характеристик – это тягово-экономические характеристики, особенно в сверхзвуковых условиях полёта. В части экологических характеристик – это эмиссионные характеристики камеры сгорания, акустические характеристики узлов СУ и пр. В части экономических характеристик – это расход топлива, показатели ресурса, стоимость эксплуатации и т.д. Данная работа направлена на анализ основных проблем СПС нового поколения именно в части СУ.

Среди требований к СУ перспективного СПС можно выделить (рис. 1):

- максимальную эффективность в сверхзвуковом крейсерском полёте, определяющуюся, в основном, низким эффективным удельным расходом топлива;
- высокие тяговые характеристики на взлётных и трансзвуковых режимах;
- низкий уровень шума вентилятора и реактивной струи в районе аэропорта;
- низкий уровень эмиссии вредных веществ;
- высокие показатели ресурса и надёжности основных деталей и узлов;
- минимальное влияние на эпюру избыточного давления, распространяющуюся от СПС до поверхности земли при полёте со сверхзвуковой скоростью (чего не требуется от силовых установок дозвуковых самолётов и сверхзвуковых военных самолётов).

Выполнение этих требований представляет собой сложную научно-техническую задачу, для решения которой необходимо проведение комплексных фундаментальных, поисковых и прикладных исследований и опытно-конструкторских работ, включающих, помимо прочего, исследования в направлении интеграции СУ с летательным аппаратом (ЛА), разработки эффективных воздухозаборников (ВЗ) и выходных устройств (ВУ), обоснования рациональных схем и параметров двигателя, а также разработки новых материалов и технологий и т.д.

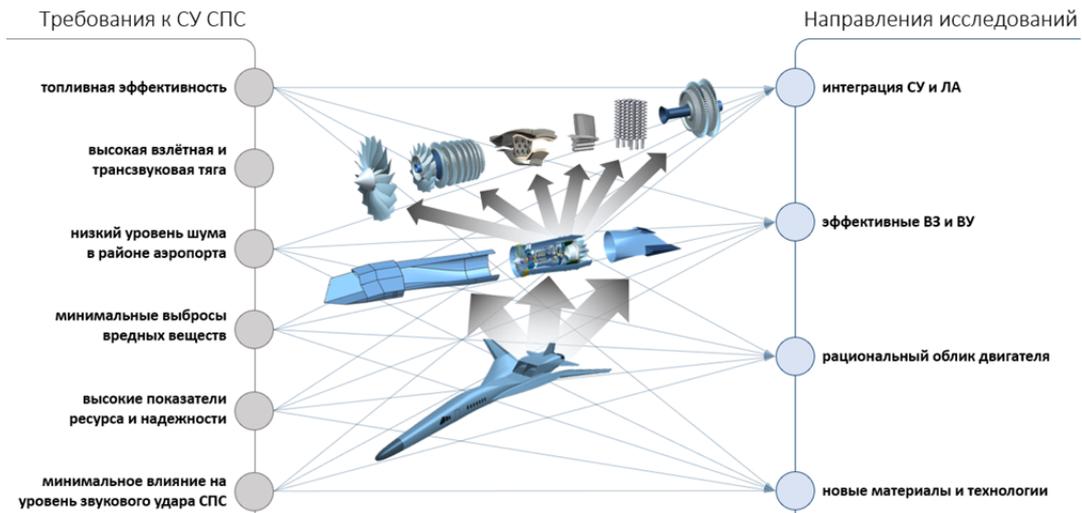


Рис. 1. Требования и направления исследований силовых установок сверхзвуковых пассажирских самолётов

Сложность, разнообразие и взаимовлияние требований к СУ СПС приводят к противоречивости технических решений, необходимых для их выполнения, начиная с расположения СУ на ЛА и заканчивая материалами, применяемыми в деталях двигателя. Это, в свою очередь, обуславливает разнообразие компоновок СПС последних лет, отличающихся друг от друга взлётным весом, числом Маха крейсерского полёта, расположением и количеством двигателей и т.д. (рис. 2) [11 – 19]. Тенденция к увеличению количества расчётных параметров и надёжности авиационных двигателей позволила авиастроителям пойти по пути создания двухдвигательных магистральных самолётов, в том числе для межконтинентальных перелётов [20], что обеспечивает лучшую топливную эффективность и снижение затрат на приобретение и эксплуатацию двигателей, а также уменьшение времени межполётного обслуживания. Однако вопрос о количестве двигателей в составе СУ СПС в настоящее время остается открытым ввиду таких особенностей СПС, как, например, низкие взлетно-посадочные характеристики по сравнению с дозвуковыми авиалайнерами, меньший размер парка самолётов и т.д.

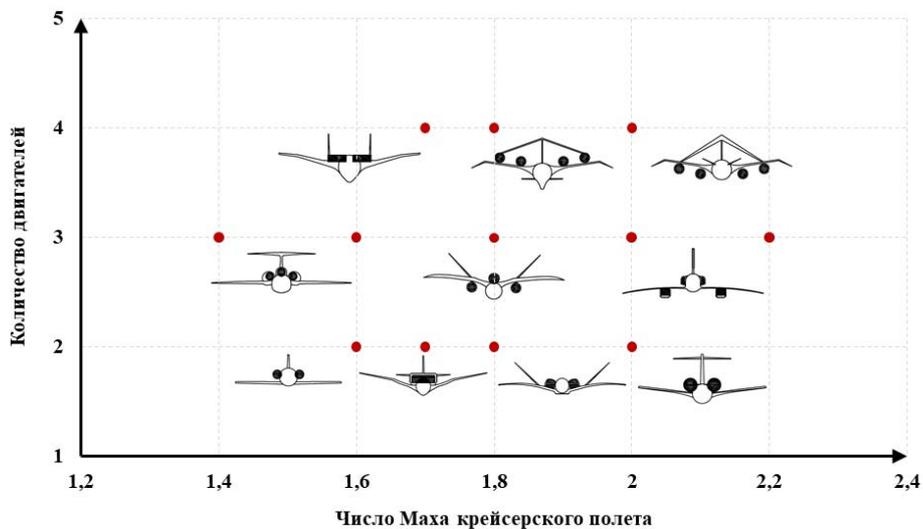


Рис. 2. Некоторые варианты компоновок сверхзвуковых пассажирских самолётов последних лет

Одним из противоречий в части технических решений СУ СПС является расположение ВЗ. Известно, что для обеспечения высокой эффективности СУ как на сверхзвуковых, так и на дозвуковых режимах полёта целесообразно располагать ВЗ снизу планера [21]. Однако в случае СПС способ размещения ВЗ на ЛА помимо обеспечения оптимальных аэродинамических и тяговых характеристик берёт на себя дополнительную функцию, способствуя минимизации звукового удара. Для снижения уровня звукового удара ВЗ целесообразно располагать сверху планера, что позволяет исключить влияние СУ на эпюру избыточного давления под СПС [22 – 24]. Дополнительным положительным эффектом при таком расположении ВЗ также является экранирование шума вентилятора планером [25]. Минусами верхнего расположения ВЗ являются: уменьшение качества ЛА, увеличение скорости потока перед ВЗ, работа ВЗ при отрицательном угле атаки набегающего потока и т.д. [26].

Расположение воздухозаборника на планере тесно связано с его обликом. В настоящее время для СПС исследуются ВЗ различных схем торможения и форм входного сечения. Традиционными схемами являются плоские и осесимметричные ВЗ внешнего сжатия [27], характеризующиеся устойчивостью, простотой организации процесса торможения и т.д. [21; 26]. Однако стремление к более тесной интеграции СУ с планером в целях снижения внешнего аэродинамического сопротивления приводит к появлению нетрадиционных форм входного сечения, например, трапециевидных (рис. 3, а) [28; 29], овальных [29 – 32], многоугольных (рис. 3, б) [33; 34] и др. С целью повышения характеристик ВЗ помимо схем внешнего сжатия рассматривается возможность применения автозапускаемых ВЗ смешанного сжатия [35 – 38], ВЗ внутреннего сжатия с широко регулируемым трактом [39] для решения проблемы запуска ВЗ [40], а также применение поверхностей изобарического торможения [41; 42]. При этом рассматриваются различные способы установки воздухозаборников на ЛА: на клине слива (рис. 3, а) [19; 43; 44] для недопущения попадания внутрь ВЗ пограничного слоя, накопленного на поверхностях ЛА; с «заглатыванием» пограничного слоя, т.е. непосредственно на поверхностях ЛА (рис. 3, б) [45] для уменьшения миделя и снижения аэродинамического сопротивления ЛА, а также на пилоне (рис. 3, в) [46; 47] – традиционный для дозвуковых самолётов способ.

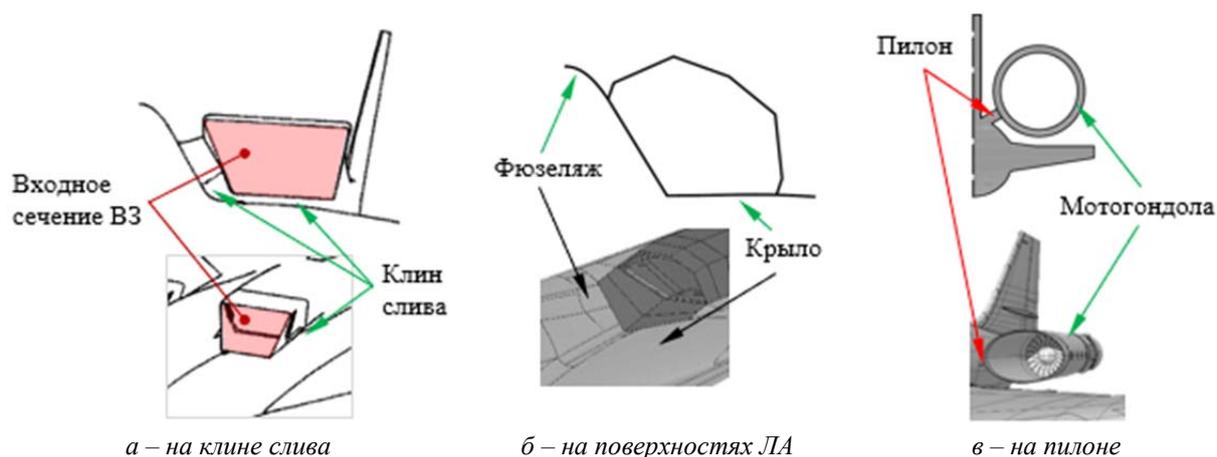


Рис. 3. Варианты установки воздухозаборников на сверхзвуковых пассажирских самолётах

Для улучшения согласования ВЗ с двигателем, снижения внешнего аэродинамического сопротивления и уровня звукового удара при сверхзвуковых скоростях полёта рассматриваются ВЗ с дополнительными контурами: например, двухконтурный ВЗ с перепуском в отдельное сопло через мотогондолу (рис. 4, а) [46; 48]; двухконтурный ВЗ с разделителем на выходе (рис. 4, б) [49; 50] для СУ с турбореактивным трехконтурным двигателем.

турным двигателем (ТРТД), сливая пограничный слой, накопленный в диффузоре, в третий контур, а также с перепуском пограничного слоя из ВЗ в основное сопло [51] для уменьшения потерь тяги на трансзвуковых режимах полёта.

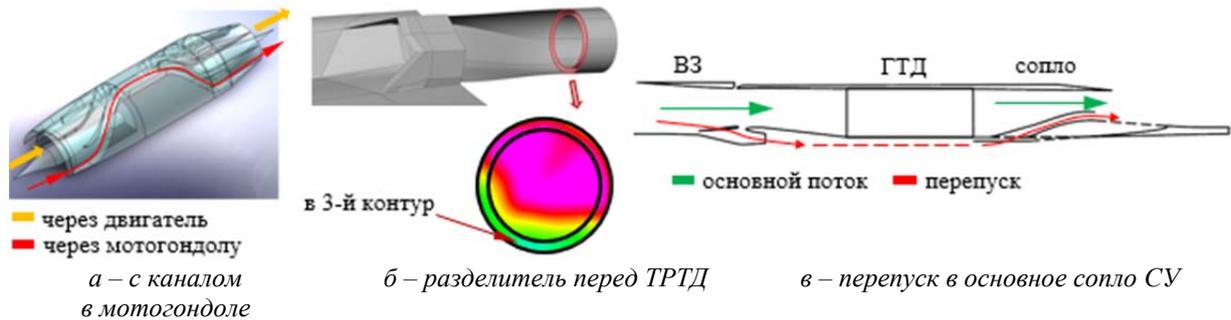


Рис. 4. Схемы воздухозаборников с дополнительными контурами

Выходное устройство также является одним из критических узлов силовой установки СПС. К нему предъявляются требования максимального снижения шума струи на взлётных режимах, обеспечения минимальных потерь тяги в условиях сверхзвукового крейсерского полета, малой массы и др. На сегодняшний день исследовано множество методов снижения шума струй [52 – 55], например, инверсированный профиль скорости и температуры, многотрубчатые, многолепестковые сопла, шевронные сопла, аэроакустические воздействия на струю; вдув воздуха и впрыск воды; миксер-эжектор; плазменные актуаторы, сопла с косым срезом, экранирование шума струи элементами планера, секторные сопла и др. В качестве наиболее перспективных средств шумоглушения реактивной струи двигателя СПС сегодня рассматриваются сопла типа миксер-эжектор и секторные сопла (рис. 5) [56 – 60], интегрированные с элементами планера. Однако следует отметить, что для сопел этих типов характерны высокие значения потерь тяги [61], что, в свою очередь, существенно сказывается на эффективности двигателя. Например, на рис. 6 приведена зависимость изменения удельного расхода топлива ( $C_{уд}, \%$ ) двигателей СПС с различной степенью двухконтурности ( $m$ ) от изменения коэффициента тяги сопла  $\Delta \bar{P}_c, \%$ . Видно, что снижение  $\Delta \bar{P}_c$  на 1% приводит к увеличению удельного расхода топлива на 2,4% при величине  $m = 1$  и на 4,2% в случае  $m = 4$ .

Также следует отметить, что большая часть исследований сопел типа миксер-эжектор и секторных сопел проводилась при уровнях параметров, соответствующих двигателям с низкой степенью двухконтурности (соответственно высокой скоростью истечения струи) [56 – 60].

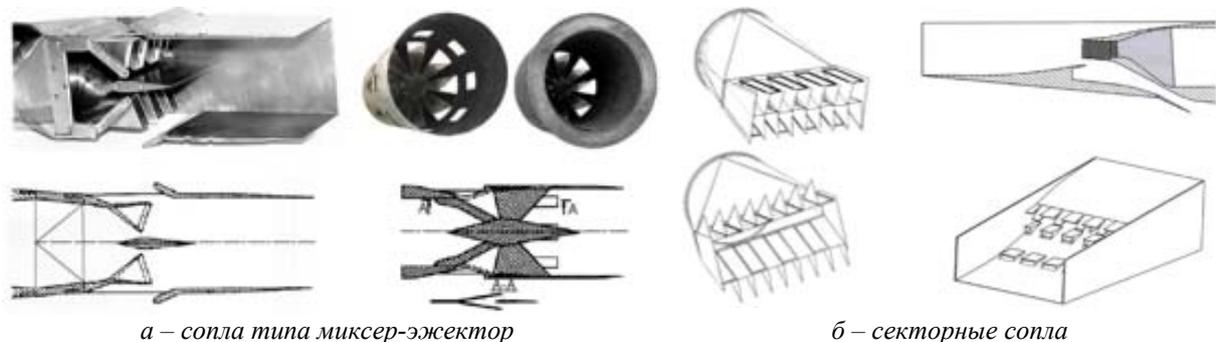


Рис. 5. Шумоглушающие сопла для силовых установок сверхзвуковых пассажирских самолётов

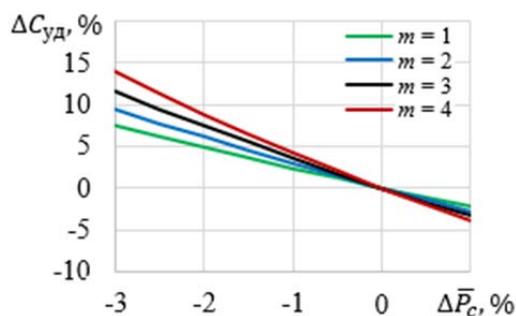


Рис. 6. Влияние коэффициента тяги сопла на удельный расход топлива

При этом известно, что с уменьшением скорости истечения эффективность снижения шума у сопел этих типов снижается [61; 62]. Исследования шумоглушащих сопел, учитывающие применение двигателей повышенной степени двухконтурности ( $m = 2 - 3$ ), регулирование сопел, а также наличие тесной интеграции с кормовой частью планера, находятся на ранней стадии.

Сегодня в мире активно ведутся исследования по формированию рационального облика двигателя для СПС [63]. Обычно для военных сверхзвуковых самолётов используются двигатели с низкой степенью двухконтурности [61], так как они обеспечивают высокие значения удельной тяги и низкое аэродинамическое сопротивление на сверхзвуковых режимах полёта. Однако для двигателей с низкими значениями степени двухконтурности характерны высокие значения скорости истечения реактивной струи, а следовательно высокий уровень шума. Увеличение степени двухконтурности до значений, соответствующих двигателям современных гражданских авиалайнеров [20; 65 – 67], приведёт к большой площади миделя СУ и, следовательно, высоким значениям внешнего аэродинамического сопротивления на сверхзвуковых режимах полёта [68].

Данное противоречие привело к большому разнообразию схем двигателей для СПС. В 60-е годы XX века для первых СПС рассматривались ТРД и ТРДД с низкой степенью двухконтурности, так как на первом месте для разработчиков было достижение требуемых лётно-технических характеристик [63]. В 90-е годы XX века появилось сразу несколько проектов сверхзвуковых административных самолётов (Falcon SST, C-21, C-51 и др.), для которых рассматривались бесфорсажные версии военных двигателей: GE F414, Snecma M88-2, AL-363 (AL-31Ф), Д-21А1 (Д-30Ф6), ВК-21 (P134-300) [69 – 71] и др. без форсажных камер. Таким образом, основной схемой двигателя для проектов СПС того периода был классический ТРДД с параметрами на уровне двигателей 4-го поколения ( $T_r^* = 1550 \dots 1650$  К,  $\pi_{\kappa\Sigma}^* = 15 \dots 25$ ) и низким значением степени двухконтурности  $m = 0,5 \dots 0,8$  с соответствующей высокой скоростью струи (учитывая, что на тот момент действовала глава 3 тома 1 Приложения 16 к Конвенции по гражданской авиации [72]). Следует также отметить, что в рамках большинства проектов бесфорсажные двигатели оснащались сверхзвуковыми регулируемым плоскими и осесимметричными воздухозаборниками и соплами с центральным телом. Сегодня в качестве двигателей для СПС ближайшей перспективы в целях снижения стоимости и рисков разработки рассматриваются ТРДД средней степени двухконтурности ( $m \approx 2 - 3$ ) на основе газогенераторов существующих гражданских двигателей [73 – 76]. Также в мире активно ведутся исследования по поиску рационального облика вновь проектируемого двигателя [3; 11; 12; 74; 77]. При этом рассматриваются как ТРДД традиционной схемы, так и двигатели изменяемого цикла: с управляемым смесителем, трёхконтурные двигатели различных схем, двигатели с выносными вентиляторами и пр. [63].

Помимо схемы важным вопросом при определении облика силовой установки СПС является выбор проектных параметров двигателя. При этом необходимо учитывать ряд особенностей, не характерных для двигателей самолётов других типов. На примере ТРДД классической схемы можно отметить следующее:

- выбор степени двухконтурности определяется компромиссом между лётно-техническими характеристиками СПС и уровнем шума в районе аэропорта;
- выбор суммарной степени повышения давления ограничивается температурой на выходе из компрессора высокого давления на крейсерском режиме;
- выбор температуры газа перед турбиной ограничивается требуемым ресурсом деталей горячей части двигателя с учётом длительности работы на крейсерском режиме;
- выбор регулируемого или нерегулируемого сопла определяется компромиссом между эффективными характеристиками СУ на сверхзвуковых режимах и её массой.

С целью повышения эффективности СУ и снижения шума в районе аэропорта исследуются рациональные законы управления двигателем СПС. Так, в работе [78] показано, что в крейсерских условиях при переходе на режимы частичной тяги целесообразно раскрывать критическое сечение сопла. Это позволяет обеспечить постоянство режима работы воздухозаборника без увеличения перепусков, а также снизить кормовое сопротивление мотогондолы.

На трансзвуковых режимах ( $M_\infty = 1 \dots 1,3$ ) рассматривается возможность применения управляемого смесителя для увеличения тяги [3]. В данном диапазоне чисел Маха полёта за счёт частичного «прикрытия» смесителем внутреннего контура ТРДД и небольшим раскрытием критического сечения сопла появляется возможность повышения температуры газа перед турбиной (на данных режимах  $T_r^*$  существенно ниже максимального значения) с сохранением положения рабочей точки на характеристике вентилятора. Таким образом, имеется возможность увеличения тяги двигателя до 15% при увеличении температуры газа перед турбиной на 70...100 градусов (рис. 7).

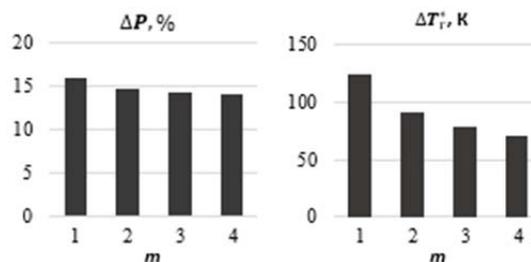


Рис. 7. Увеличение тяги и температуры газа перед турбиной ТРДД с разной степенью двухконтурности на трансзвуковом режиме за счёт управления смесителем

На взлётных режимах рассматриваются различные варианты так называемого малошумного управления взлётной тягой [7; 79; 80], которое заключается в дросселировании двигателя по определённому закону и выборе оптимальной траектории взлёта с целью снижения шума в контрольных точках «сбоку от ВПП» и «набор высоты».

Важной проблемой двигателя СПС, препятствующей достижению высоких показателей ресурса (более 2000 полётных циклов у узлов горячей части), является высокая температура рабочего тела в проточной части двигателя на сверхзвуковых режимах (в том числе на крейсерском режиме в течение 4 – 5 часов). Решение данной проблемы требует применения новых материалов, покрытий и более сложных систем охлаждения горячей части двигателя. На рис. 8 приведены приближённые уровни температур для двигателя с  $m = 2,5$  в условиях  $M_H = 1,8$ ;  $H = 15$  км.

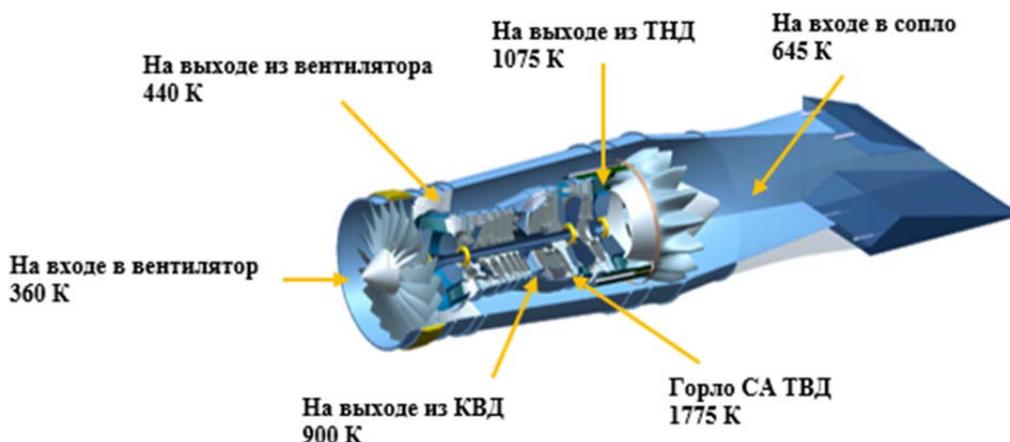


Рис. 8. Уровни температур в двигателе сверхзвукового пассажирского самолёта на крейсерском режиме

Одним из перспективных направлений в этой области сейчас является разработка деталей из высокотемпературных композиционных материалов на основе керамики (ККМ) [81; 82]. Известно, что такие материалы уже применяются для изготовления деталей военных и гражданских двигателей (рис. 9). Исследования, направленные на создание деталей из ККМ для двигателей СПС, сегодня находятся на ранней стадии [3; 83]. При этом прогнозируется, что применение ККМ в горячей части двигателя СПС позволит сократить расход воздуха на охлаждение турбины, снизить её массу, а также обеспечить требования по ресурсу двигателя.

С целью более эффективного охлаждения лопаток ТВД рассматривается возможность применения воздухо-воздушных теплообменных аппаратов (ВВТ) в составе системы охлаждения турбины двигателя СПС (рис. 10) [75; 84] по аналогии с ТРДД военных сверхзвуковых самолётов [85; 86]. При этом исследуются новые виды поверхностей теплообмена, которые возможно изготовить только аддитивными методами [84; 87; 88].

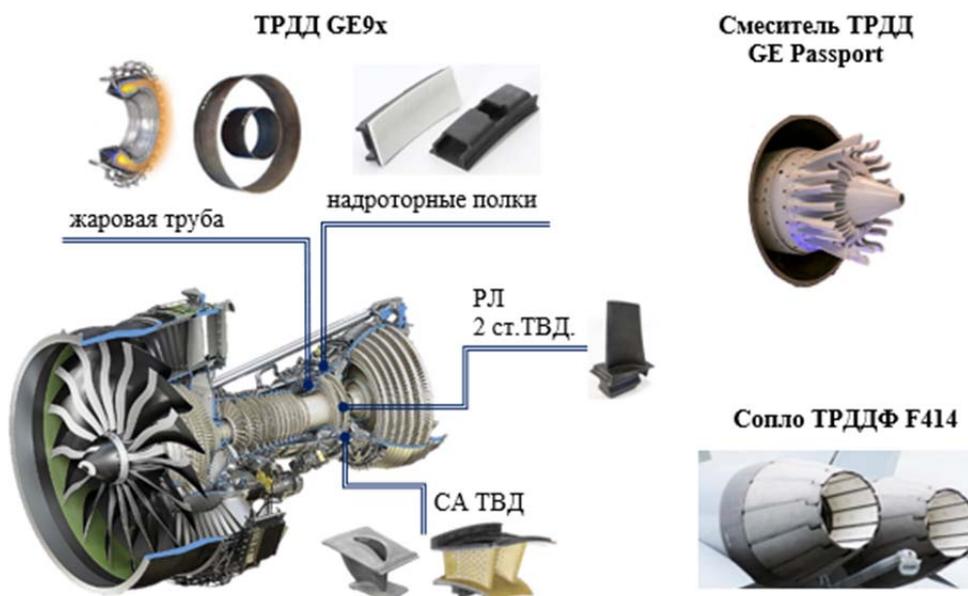


Рис. 9. Применение керамических композиционных материалов в авиационных двигателях

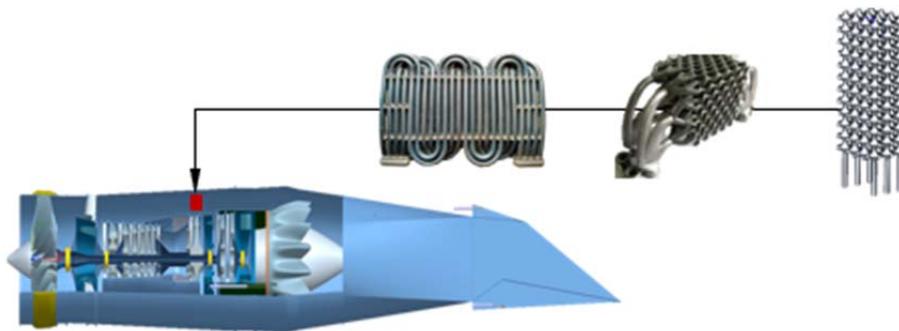


Рис. 10. Расположение и некоторые виды теплообменных аппаратов системы охлаждения турбины двигателя СПС [76; 78]

Особенности применения ВВТ в двигателе СПС заключаются в высоком влиянии потерь полного давления во втором контуре на характеристики двигателя (ввиду повышенной степени двухконтурности), а также высокими температурами как охлаждаемого, так и охлаждающего воздуха на крейсерском режиме полёта.

Помимо перечисленных для создания двигателя СПС необходимо будет решить и другие проблемы, связанные, например, с масляной системой (с учётом того, что самый теплонапряжённый режим работы масляной системы двигателя реализуется в условиях крейсерского сверхзвукового полёта в течение продолжительного времени), уплотнениями и т.д.

### Заключение

Силовая установка оказывает непосредственное влияние на весь комплекс характеристик сверхзвукового пассажирского самолёта: лётно-технические, экологические и экономические. Процесс создания силовой установки сверхзвукового пассажирского самолёта сопряжён со значительными техническими рисками ввиду необходимости применения уникальных научно-технических решений. Решить эту комплексную научно-техническую задачу можно за счёт оптимального способа интеграции СУ и планера, выбора рациональных проектных параметров двигателя, разработки эффективных воздухозаборников и выходных устройств, внедрения новых материалов и технологий и т.д. в тесной кооперации со специалистами по силовой установке, планеру, материалам и др.

Работа выполнена в рамках реализации Программы создания и развития научного центра мирового уровня «Сверхзвук» на 2020-2025 годы при финансовой поддержке Минобрнауки России (соглашение от 24 июня 2021 г. №075-15-2021-605).

### Библиографический список

1. Краев В.М., Силуянова М.В., Тихонов А.И. Задачи создания сверхзвуковой гражданской авиации в России // СТИН. 2020. № 4. С. 2-7.
2. Щенников В.С. Перспективы разработки сверхзвуковых пассажирских самолётов // Вестник экономической безопасности. 2018. № 2. С. 369-373.
3. Ланшин А.И., Комратов Д.В., Постников А.А. НЦМУ «Сверхзвук» в тематике разработки авиационных двигателей // Авиационные двигатели. 2022. № 1 (14). С. 69-78. DOI: 10.54349/26586061\_2022\_1\_69

4. Sun Y., Smith H. Review and prospect of supersonic business jet design // *Progress in Aerospace Sciences*. 2017. V. 90. P. 12-38. DOI: 10.1016/j.paerosci.2016.12.003
5. Rallabhandi S.K., Loubeau A. Summary of propagation cases of the third AIAA sonic boom prediction workshop // *Journal of Aircraft*. 2022. V. 59, Iss. 3. P. 578-594. DOI: 10.2514/1.c036327
6. Челебян О.Г., Строкин В.Н., Шилова Т.В. Оценка эмиссии вредных веществ двигателей сверхзвуковых самолётов // *Авиационные двигатели*. 2021. № 3 (12). С. 55-62. DOI: 10.54349/26586061\_2021\_3\_55
7. Berton J.J., Jones S.M., Seidel J.A., Huff D.L. Noise predictions for a supersonic business jet using advanced take-off procedures // *The Aeronautical Journal*. 2018. V. 122, Iss. 1250. P. 556-571. DOI: 10.1017/aer.2018.6
8. Smith H. A review of supersonic business jet design issues // *The Aeronautical Journal*. 2007. V. 111, Iss. 1126. P. 761-776. DOI: 10.1017/s0001924000001883
9. Hardeman A.B., Maurice L.Q. Sustainability: key to enable next generation supersonic passenger flight // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2021. V. 1024, Iss. 1. DOI: 10.1088/1757-899x/1024/1/012053
10. Мирзоян А.А., Кокорев В.П. Ключевые проблемы разработки перспективных концепций сверхзвуковых пассажирских самолётов (обзор по материалам американских публикаций) // *Двигатель*. 2011. № 2 (74). С. 16-21.
11. Korovkin V., Evstigneev A., Makarov V., Strelets D., Shevelev O., Kopiev V., Belyaev I. Candidate engines definition for future multy speed supersonic civil aircraft // 21<sup>st</sup> ISABE Conference 2013 (September, 9-13, 2013, Busan, Korea). V. 3. P. 1881-1883.
12. HISAC-T-6-26-1. Publishable Activity Report. Dassault Aviation. Issue 1. July 21, 2008. 121 p.
13. Welge H.R., Nelson C., Bonet J. Supersonic vehicle systems for the 2020 to 2035 timeframe // 28th AIAA Applied Aerodynamics Conference (28 June-1 July, 2010, Chicago, Illinois). DOI: 10.2514/6.2010-4930
14. Morgenstern J., Norstrud N., Stelmack M., Skoch C. Final report for the advanced concept studies for supersonic commercial transports entering service in the 2030 to 2035 period, N+3 supersonic program. NASA/CR-2010-216796. PMF-01623. August 2010. 123 p.
15. Aerion AS2. <https://www.businessjetinteriorsinternational.com/features/aerion-as2.html>
16. Spike Aerospace. <https://www.spikeaerospace.com/>
17. Boom Overture. <https://boomsupersonic.com/overture>
18. Chernyshev S.L., Gorbovsyoy V.S., Kazhan A.V., Korunov A.O. Re-entry vehicle sonic boom issue: modelling and calculation results in windy atmosphere based on the augmented Burgers equation // *Acta Astronautica*. 2022. V. 194. P. 450-460. DOI: 10.1016/j.actaastro.2021.12.038
19. Башкиров И.Г., Гилязев Д.И., Горбовской В.С., Дементьев А.А., Иванюшкин А.К., Кажан А.В., Кажан В.Г., Карпов Е.В., Новгородцев Е.В., Шаныгин А.Н., Шенкин А.В., Фомин Д.Ю., Чернышев С.Л. Сверхзвуковой самолёт: патент РФ № 2753443; опубл. 16.08.2021; бюл. № 23.
20. Гордин М.В., Палкин В.А. Концепции авиационных двигателей для перспективных пассажирских самолётов // *Авиационные двигатели*. 2019. № 3 (4). С. 7-16. DOI: 10.54349/26586061\_2019\_3\_7
21. Seddon J., Goldsmith E.L. Intake aerodynamics. American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1985. 442 p.
22. Горбовской В.С., Кажан А.В., Кажан В.Г., Чернышев С.Л. О влиянии формы эпюры избыточного давления на громкость звукового удара // *Учёные записки ЦАГИ*. 2020. Т. 51, № 2. С. 3-17.

23. Howe D. Engine placement for sonic boom mitigation // 40<sup>th</sup> AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit (January, 14-17, 2002, Reno, NV, U.S.A.). DOI: 10.2514/6.2002-148
24. Коваленко В.В., Чернышев С.Л. К вопросу о снижении звукового удара // Учёные записки ЦАГИ. 2006. Т. 37, № 3. С. 53-63.
25. Почкин Я.С., Россихин А.А., Халецкий Ю.Д. Экранирование шума вентилятора фрагментом крыла // Сб. тезисов Всероссийского аэроакустического форума (20-25 сентября 2021 г., Геленджик). Вып. 2807. Жуковский: ЦАГИ, 2021. С. 35-36.
26. Ремеев Н.Х. Аэродинамика воздухозаборников сверхзвуковых самолётов. Жуковский: ЦАГИ, 2002. 178 с.
27. Brezillon J., Carrier G., Laban M. Multi-Disciplinary optimization including environmental aspects applied to supersonic aircraft // 27th International Congress of the Aeronautical Sciences, ICAS 2010 (September, 19-24, 2010, Nice, France).
28. Карпов Е.В., Колток Н.Г., Новгородцев Е.В., Кажан А.В. Экспериментальное исследование характеристик нерегулируемого трапециевидного воздухозаборника (ВЗ) в надкрыльевой компоновке сверхзвукового гражданского самолёта (СГС) // Материалы Межотраслевой научно-технической конференции «Современные проблемы аэрогазодинамики силовых установок летательных аппаратов» (21-22 октября 2021 г., Жуковский). М.: ЦАГИ, 2021. С. 46-48.
29. Новгородцев Е.В., Карпов Е.В., Колток Н.Г. Повышение характеристик пространственных нерегулируемых воздухозаборников внешнего сжатия на основе использования систем управления пограничным слоем // Вестник Московского авиационного института. 2021. Т. 28, № 4. С. 7-27. DOI: 10.34759/vst-2021-4-7-27
30. Карпов Е.В., Колток Н.Г., Новгородцев Е.В. Численное исследование характеристик обтекания овального воздухозаборника в надкрыльевой компоновке сверхзвукового гражданского самолёта // Материалы Межотраслевой научно-технической конференции «Современные проблемы аэрогазодинамики силовых установок летательных аппаратов» (21-22 октября 2021 г., Жуковский). М.: ЦАГИ, 2021. С. 45-46.
31. Slater J.W. Methodology for the design of streamline-traced external-compression supersonic inlets // 50th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference (July, 28-30, 2014, Cleveland, OH). DOI: 10.2514/6.2014-3593
32. Garzon G.A. Use of a translating cowl on a SSBJ for improved takeoff performance // 45th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit (January, 8-11, 2007, Reno, Nevada). DOI: 10.2514/6.2007-25
33. Белова В.Г., Виноградов В.А., Комратов Д.В., Степанов В.А. Характеристики воздухозаборного устройства сверхзвукового делового самолёта при имитации возмущений // Материалы XXX научно-технической конференции по аэродинамике, посвящённой 150-летию со дня рождения С.А. Чаплыгина (25-26 апреля 2019 г., п. Володарского, Московская обл.). Жуковский: ЦАГИ, 2019. С. 50-51.
34. Любимов Д.А., Кукшинова И.В., Виноградов В.А. Исследование RANS/ILES-методом особенностей течения в пространственном воздухозаборнике сверхзвукового самолёта бизнес-класса в дроссельных режимах // Теплофизика высоких температур. 2021. Т. 59, № 4. С. 576-583. DOI: 10.31857/S0040364421040153
35. Белова В.Г., Виноградов В.А., Комратов Д.В., Макаров А.О., Степанов В.А. Расчётно-экспериментальные исследования входного устройства силовой установки сверхзвукового делового самолёта // Материалы XXIX научно-технической конференции по аэродинамике (01-02 марта 2018 г, д. Богданиха, Московская обл.). Жуковский: ЦАГИ, 2018. С. 55.

36. Виноградов В.А., Кусюкбаева Д.И., Степанов В.А. Сравнение расчётных и экспериментальных данных по интегральным характеристикам воздухозаборника в компоновке с корпусом сверхзвукового летательного аппарата // *Материалы XXIX научно-технической конференции по аэродинамике* (01-02 марта 2018 г, д. Богданиха, Московская обл.). Жуковский: ЦАГИ, 2018. С. 80.

37. Виноградов В.А., Мельников Я.А., Степанов В.А. Выбор и проектирование пространственного нерегулируемого воздухозаборника для сверхзвукового делового самолёта // *Учёные записки ЦАГИ*. 2017. Т. 48, № 2. С. 24-38.

38. Виноградов В.А., Макаров А.Ю., Мелконян Н.А., Степанов В.А. Экспериментальное исследование нерегулируемого пространственного воздухозаборника сверхзвукового делового самолёта // *Учёные записки ЦАГИ*. 2017. Т. 48, № 3. С. 42-55.

39. Шорстов В.А. Воздухозаборник с изменяемой геометрией для сверхзвукового пассажирского летательного аппарата: патент РФ № 2766238; 10.02.2022; бюл. № 4.

40. Нечаев Ю.Н. Входные устройства сверхзвуковых самолётов. М.: Воениздат, 1963. 140 с.

41. Conners T.R., Howe D.C. Supersonic inlet shaping for dramatic reductions in drag and sonic boom strength // 44th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit (January, 9-12, 2006, Reno, Nevada). DOI: 10.2514/6.2006-30

42. Conners T.R., Merret J.M., Howe D.C., Tacina K., Hirt S. Wind tunnel testing of an axisymmetric isentropic relaxed external compression inlet at Mach 1.97 design speed // 43rd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit (July, 8-11, 2007, Cincinnati, OH). DOI: 10.2514/6.2007-5066

43. Ибрагимов М.Р., Новиков А.П., Новиков М.П., Трифонов А.К., Юдин В.Г. Воздухозаборник сверхзвукового пассажирского самолёта: патент РФ № 196778; опубл. 16.03.2020; бюл. № 8.

44. Ибрагимов М.Р., Новиков А.П., Новиков М.П., Трифонов А.К., Юдин В.Г. Воздухозаборник сверхзвукового пассажирского самолёта: патент РФ № 196781; опубл. 16.03.2020; бюл. № 8.

45. Виноградов В.А., Степанов В.А. Воздухозаборник с изменяемой геометрией для сверхзвукового летательного аппарата (варианты): патент РФ № 2353550; опубл. 27.04.2009; бюл. № 12.

46. Conners T., Wayman T. The feasibility of high-flow nacelle bypass for low sonic boom propulsion system design // 29th AIAA Applied Aerodynamics Conference (June, 27-30, 2011, Honolulu, Hawaii). DOI: 10.2514/6.2011-3797

47. Сергеев А.С., Насыров Р.А., Трифонов А.А. Самолёт S-512: реальный шаг к сверхзвуковой гражданской авиации // *Студенческий вестник*. 2019. № 27 (77), ч. 3. С. 58-59.

48. Hirt S.M, Chima R.V., Vyas M.A. Experimental investigation of a large-scale low-boom inlet concept // 29th AIAA Applied Aerodynamics Conference (June, 27-30, 2011, Honolulu, Hawaii). DOI: 10.2514/6.2011-3796

49. Белова В.Г., Виноградов В.А., Комратов Д.В., Степанов В.А., Захаров Д.Л., Маслов В.П. Проработка облика интегрированного воздухозаборного устройства сверхзвукового делового/пассажирского самолёта с модифицированной схемой сжатия и двухконтурным разделителем потоков на выходе // *Сб. тезисов Международной научно-технической конференции по авиационным двигателям ICAM 2020* (18-21 мая 2021 г., Москва, Россия). Т. 1. М.: ЦИАМ им. П.И. Баранова, 2020. С. 107-110.

50. Белова В.Г., Виноградов В.А., Комратов Д.В., Степанов В.А. Исследования двухконтурного входного устройства для силовой установки сверхзвукового делового самолёта с двигателем изменяемого цикла // *Материалы XXX научно-технической*

конференции по аэродинамике, посвящённой 150-летию со дня рождения С.А. Чаплыгина (25-26 апреля 2019 г., п. Володарского, Московская обл.). Жуковский: ЦАГИ, 2019. С. 49-50.

51. Макаров В.Е., Шорстов В.А. Предварительное обоснование схемы силовой установки на основе регулируемого за счёт вспомогательного канала воздухозаборника внутреннего сжатия // Материалы Межотраслевой научно-технической конференции «Современные проблемы аэрогазодинамики силовых установок летательных аппаратов» (21-22 октября 2021 г., Жуковский). М.: ЦАГИ, 2021. С. 62-63.

52. Stern A.M., Peracchio A.A. The challenge of reducing supersonic civil transport propulsion noise // 25th Joint Propulsion Conference (July, 10-12, 1989, Monterey, CA). DOI: 10.2514/6.1989-2363

53. Seiner J.M., Krejsa E.A. Supersonic jet noise and the high-speed civil transport // 25th Joint Propulsion Conference (July, 10-12, 1989, Monterey, CA, U.S.A). DOI: 10.2514/6.1989-2358

54. Smith M.J.T., Lowrie B.W., Brooks J.R., Bushell K.W. Future supersonic transport noise – lessons from the past // 24th Joint Propulsion Conference (July, 11-13, 1988, Boston, Massachusetts). DOI: 10.2514/6.1988-2989

55. Sadeghian M., Bandy M.G. Technologies for aircraft noise reduction: A review // Journal of Aeronautics and Aerospace Engineering. 2019. V. 9, Iss. 1. DOI: 10.35248/2168-9792.20.9.219

56. Shenkin A.V., Mazurov A.P., Bykov A.P. Aerodynamic design of single-expansion ramp nozzle for aircraft with supersonic cruise speed of flight // Proceedings of the 29-th Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences, ICAS 2014 (September, 7-12, 2014, St. Petersburg, Russia).

57. Krasheninnikov S., Mironov A., Pavlyukov E., Shenkin A., Zhitenev V. Mixer-ejector nozzles: acoustic and thrust characteristics // International Journal of Aeroacoustics. 2005. V. 4, Iss. 3-4. P. 267-288. DOI: 10.1260/1475472054771448

58. Krasheninnikov S., Mironov A., Paulukov E., Zhitenev V., Julliard J., Maingre E. An experimental study of 2-D mixer/ejector noise and thrust characteristics // 2nd AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference (May, 06-08, 1996, State College, PA). DOI: 10.2514/6.1996-1668

59. Имаев Т.Ф., Миронов А.К., Полев А.С., Слинко М.Б. Выхлопное сопло воздушно-реактивного двигателя: патент РФ № 156534; опублик. 10.11.2015; бюл. № 31.

60. Горбовской В.С., Кажан В.Г., Кажан А.В., Шенкин А.В. Шумоглушащее сопло воздушно-реактивного двигателя: патент РФ № 2732360; опублик. 15.09.2020; бюл. № 26.

61. Bridges J., Zaman K.Q., Heberling B. Basics of mixer-ejectors for quiet propulsion // AIAA Aviation Forum 2020 (June, 15-19, 2020, Virtual). DOI: 10.2514/6.2020-2505

62. Лаврухин Г.Н. Аэродинамика реактивных сопел. Т. I. Внутренние характеристики сопел. М.: Наука. Физматлит, 2003. 376 с.

63. Алendarь А.Д., Грунин А.Н., Силуянова М.В. Анализ концепций базовых обликов перспективных двигателей сверхзвуковых гражданских летательных аппаратов на основе опыта зарубежных разработчиков // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2021. Т. 20, № 3. С. 24-36. DOI: 10.18287/2541-7533-2021-20-3-24-36

64. Скибин В.А., Солонин В.И., Палкин В.А. Работы ведущих авиадвигателестроительных компаний в обеспечение создания перспективных авиационных двигателей (аналитический обзор). М.: ЦИАМ, 2010. 676 с.

65. Палкин В.А. Обзор работ в США и Европе по авиационным двигателям для самолётов гражданской авиации 2020...2040-х годов // Авиационные двигатели. 2019. № 3 (4). С. 63-83. DOI: 10.54349/26586061\_2019\_3\_63

66. Евстигнеев А.А., Ланшин А.И., Почкин Я.С., Солонин В.И., Халецкий Ю.Д. Проблема шума перспективных ТРДД для дальнемагистральных самолётов // *Авиационные двигатели*. 2022. № 2 (15). С. 27-40. DOI: 10.54349/26586061\_2022\_1\_27
67. Алendarь А.Д., Викулин А.В., Грунин А.Н. Анализ параметров зарубежных турбореактивных двигателей тягой более 35 т. // *Материалы XIX Всероссийской научно-технической конференции «Аэрокосмическая техника, высокие технологии и инновации – 2018»* (15-17 ноября 2018 г., Пермь). Пермь: ПНИПУ, 2018. С. 14-17.
68. Силуянова М.В., Алendarь А.Д., Грунин А.Н. Разработка технического облика и исследование эффективных характеристик силовой установки перспективного сверхзвукового пассажирского самолёта // *Авиационная промышленность*. 2019. № 3-4. С. 9-14.
69. *Иностранные авиационные двигатели: справочник* / под ред. Л.И. Соркина. М.: Авиамир, 2000. 534 с.
70. *Иностранные авиационные двигатели и газотурбинные установки (по материалам зарубежных публикаций): справочник* / под ред. Л.И. Соркина, Г.К. Ведешкина, А.Н. Князева. М.: ЦИАМ, 2010. 415 с.
71. Зрелов В.А. Отечественные ГТД. Основные параметры и конструктивные схемы: учеб. пособие. М.: Машиностроение, 2005. 336 с.
72. Приложение 16. Охрана окружающей среды. Т. 1. Авиационный шум. ИКАО, 2014.
73. Якурнова К.А., Алendarь А.Д. Анализ зарубежных работ по созданию двухконтурного турбореактивного двигателя на основе базового газогенератора // *Сб. тезисов Международной молодёжной научной конференции «XLVII Гагаринские чтения 2021»* (20-23 апреля 2021 г., Москва) М.: Издательство «Перо», 2021. С. 202-203.
74. Berton J.J., Huff D.L, Geiselhart K., Seidel J.A. Supersonic technology concept aeroplanes for environmental studies // *AIAA SciTech Forum 2020* (January, 6-10, 2020, Orlando, Florida). DOI: 10.2514/6.2020-0263
75. Пожаринский А.А., Кузнецов В.А. Двухконтурный турбореактивный двигатель: патент РФ № 2488710; опубл. 27.07.2013; бюл. № 21.
76. Korovkin V., Evstigneev A., Makarov V., Strelets D., Shevelev O., Kopiev V., Belyaev I. Concept of prototype of near-term supersonic commercial aircraft with derivative engines based on existing cores // *24th International Society of Air Breathing Engines – ISABE 2019* (September, 22-27, 2019, Canberra).
77. Nordqvist M., Kareliusson J., Silva E.R., Kyprianidis K.G. Conceptual design of a turbofan engine for a supersonic business jet // *23-th International Society of Air Breathing Engines – ISABE 2017* (September, 03-08, 2017, Manchester).
78. Силуянова М.В., Курицына В.В., Алendarь А.Д., Грунин А.Н. Влияние проектных параметров двигателя на облик и эффективные характеристики силовой установки сверхзвукового делового самолёта // *СТИН*. 2020. № 7. С. 23-27.
79. Мирзоян А.А., Халецкий Ю.Д. Управление тягой и шумом двигателей сверхзвукового пассажирского самолёта на взлёте // *Авиационные двигатели*. 2020. № 2 (7). С. 51-56. DOI: 10.54349/26586061\_2020\_2\_51
80. Мирзоян А.А., Рябов П.А. Опыт исследований в проекте FP6 HISAC малозумных программ управления взлётной тягой СПС // *Тезисы докладов пятой открытой Всероссийской (XVII научно-технической) конференции по аэроакустике* (25-29 сентября 2017 г., Москва). Жуковский: ЦАГИ, 2017. С. 288.
81. Nakamura T., Oka T., Imanari K. Development of CMC turbine parts for aero engines // *INI Engineering Review*. 2014. V. 47, Iss. 1. P. 29-32.
82. Мезенцев М.А., Мактыбеков Б., Сеницын А.В., Ежов А.Ю., Цветков И.В., Пальчиков Д.С., Выборнов Д.И. Исследования и применение конструкционных

керамических и композиционных материалов в авиационном двигателестроении // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. 2022. Т. 9, № 1. С. 19-27. DOI: 10.24892/RIJE/20220104

83. Мезенцев М.А., Каримбаев Т.Д., Пальчиков Д.С., Сеницын А.В. Технологии создания и испытания высокотемпературных деталей из керамических композиционных материалов // Сборник докладов Международной научно-технической конференции «Проблемы и перспективы развития двигателестроения» (23-25 июня 2021 г., Самара). Т. 2. Самара: Издательство Самарского университета, 2021. С. 337-338.

84. Луковников А.В. Исследования ЦИАМ им. П.И. Баранова по обеспечению создания силовой установки сверхзвукового гражданского самолёта второго поколения // Сборник тезисов «XLVI Академические чтения по космонавтике», посвящённые памяти академика С.П. Королёва и других выдающихся отечественных учёных-пионеров освоения космического пространства (25-28 января 2022 г., Москва). Т. 3. М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2022. С. 390-392.

85. Нестеренко В.Г., Аббаварам Р.Р. Воздухо-воздушные теплообменники системы охлаждения ротора турбины высокого давления в современных авиационных турбореактивных двухконтурных двигателях // Инженерный журнал: наука и инновации. 2018. № 11 (83). DOI: 10.18698/2308-6033-2018-11-1827

86. Zhuang L., Xu G., Dong B., Liu Q., Li M., Wen J. Exergetic effects of cooled cooling air technology on the turbofan engine during a typical mission // Energies. 2022. V. 15, Iss. 14. DOI: 10.3390/en15144946

87. Лепешкин А.Р., Светлаков А.Л., Вербанов И.С. Снижение шероховатости поверхностей и испытания на герметичность теплообменных аппаратов, изготавливаемых по аддитивной технологии // Материалы XVII Международной научно-практической конференции «Энерго- и ресурсосбережение – XXI век» (02-04 декабря 2019 г., Орёл). Орёл: ОГУ им. И.С. Тургенева, 2019. С. 149-153.

88. Магеррамова Л.А., Ножницкий Ю.А., Волков С.А., Волков М.Е., Чепурнов В.Ж., Белов С.В., Вербанов И.С., Заикин С.В. Перспективы применения аддитивных технологий для создания деталей и узлов авиационных газотурбинных двигателей и прямоточных воздушно-реактивных двигателей // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2019. Т. 18, № 3. С. 81-98. DOI: 10.18287/2541-7533-2019-18-3-81-98

## THE PROBLEMS OF CREATING A PROPULSION SYSTEM OF A NEW GENERATION SUPERSONIC PASSENGER AIRCRAFT (REVIEW)

© 2023

- A. D. Alendar** Engineer, Department of Aircraft Engines  
Central Institute of Aviation Motors, Moscow, Russian Federation;  
Postgraduate Student;  
Moscow Aviation Institute (National Research University),  
Moscow, Russian Federation;  
[artem.alendar@mail.ru](mailto:artem.alendar@mail.ru)
- A. I. Lanshin** Doctor of Science (Engineering), Senior Researcher, Advisor to the General  
Director for Science;  
Central Institute of Aviation Motors, Moscow, Russian Federation;  
[ailanshin@ciam.ru](mailto:ailanshin@ciam.ru)
- A. A. Evstigneev** Head of Sector, Department of Aircraft Engines;  
Central Institute of Aviation Motors, Moscow, Russian Federation;  
[aevstigneev@ciam.ru](mailto:aevstigneev@ciam.ru)

**K. Ya. Yakubovsky** Researcher of the Department Design Bureau of Rotary Piston Engines;  
Central Institute of Aviation Motors, Moscow, Russian Federation;  
[kyyakubovsky@ciam.ru](mailto:kyyakubovsky@ciam.ru)

**M. V. Siluyanova** Doctor of Science (Engineering), Associate Professor, Professor of the  
Department of Technologies of Production and Operation of Aircraft Engines;  
Moscow Aviation Institute (National Research University),  
Moscow, Russian Federation;  
[dc2mati@yandex.ru](mailto:dc2mati@yandex.ru)

The problems of creating a propulsion system for a new generation supersonic passenger aircraft are considered on the basis of a review of the work on the supersonic transport being carried out in the world. It is shown that the desire to achieve high flight performance and commercial effectiveness of a supersonic passenger aircraft while meeting up-to-date environmental requirements leads to contradictory technical solutions regarding the propulsion system: the location and number of engines, the scheme of the air intake and nozzle, the choice of the scheme and design parameters of the engine, the use of new high-temperature materials in the engine hot section, etc. The features of the operating conditions of the engine components of a supersonic passenger aircraft in comparison with the engines of up-to-date subsonic civil aviation aircraft and supersonic military aircraft are indicated. The calculated estimates of the influence of various technical solutions on the parameters of the supersonic passenger aircraft engine are given. Due to the complexity and multi-criterion nature of the task of creating a supersonic passenger aircraft propulsion system, its solution requires an integrated approach based on close cooperation of specialists in airframe aerodynamics, engine, etc.

*Supersonic passenger aircraft; propulsion system; supersonic air intake; sound-suppression nozzle; turbofan engine; variable cycle engine; ceramic composite material*

---

*Citation:* Alendar A.D., Lanshin A.I., Evstigneev A.A., Yakubovsky K.Ya., Siluyanova M.V. The problems of creating a propulsion system of a new generation supersonic passenger aircraft (review). *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2023. V. 22, no. 1. P. 7-28. DOI: 10.18287/2541-7533-2023-22-1-7-28

## References

1. Kraev V.M., Siluyanova M.V., Tikhonov A.I. Creation of supersonic civil aviation in Russia. *Russian Engineering Research*. 2020. V. 40, Iss. 9. P. 755-758. DOI: 10.3103/S1068798X20090063
2. Shchennikov V.S. Prospects for the development of supersonic passenger aircraft. *Vestnik of Economic Security*. 2018. No. 2. P. 369-373. (In Russ.)
3. Lanshin A.I., Komratov D.V., Postnikov A.A. The world-class research center «Supersonic» in the field of aircraft engine development. *Aviation Engines*. 2022. No. 1 (14). P. 69-78. DOI: 10.54349/26586061\_2022\_1\_69
4. Sun Y., Smith H. Review and prospect of supersonic business jet design. *Progress in Aerospace Sciences*. 2017. V. 90. P. 12-38. DOI: 10.1016/j.paerosci.2016.12.0033
5. Rallabhandi S.K., Loubeau A. Summary of propagation cases of the third AIAA sonic boom prediction workshop. *Journal of Aircraft*. 2022. V. 59, Iss. 3. P. 578-594. DOI: 10.2514/1.c036327.
6. Chelebyan O.G., Strokin V.N., Shilova T.V. Emission assessment of supersonic aircraft engines. *Aviation Engines*. 2021. No. 3 (12). P. 55-62. (In Russ.)
7. Berton J.J., Jones S.M., Seidel J.A., Huff D.L. Noise predictions for a supersonic business jet using advanced take-off procedures. *The Aeronautical Journal*. 2018. V. 122, Iss. 1250. P. 556-571. DOI: 10.1017/aer.2018.6
8. Smith H. A review of supersonic business jet design issues. *The Aeronautical Journal*. 2007. V. 111, Iss. 1126. P. 761-776. DOI: 10.1017/s0001924000001883
9. Hardeman A.B., Maurice L.Q. Sustainability: key to enable next generation supersonic passenger flight. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2021. V. 1024, Iss. 1. DOI: 10.1088/1757-899x/1024/1/012053

10. Mirzoyan A.A., Kokorev V.P. Key problems in the development of advanced concepts of supersonic passenger aircraft (review based on American publications). *Dvigatel'*. 2011. No. 2 (74). P. 16-21. (In Russ.)
11. Korovkin V., Evstigneev A., Makarov V., Strelets D., Shevelev O., Kopiev V., Belyaev I. Candidate engines definition for future multy speed supersonic civil aircraft. *21st ISABE Conference 2013 (September, 9-13, 2013, Busan, Korea)*. V. 3. P. 1881-1883.
12. HISAC-T-6-26-1. Publishable Activity Report. Dassault Aviation. Issue 1. July 21, 2008. 121 p.
13. Welge H.R., Nelson C., Bonet J. Supersonic vehicle systems for the 2020 to 2035 timeframe. *28th AIAA Applied Aerodynamics Conference (28 June – 1 July, 2010, Chicago, Illinois)*. DOI: 10.2514/6.2010-4930
14. Morgenstern J., Norstrud N., Stelmack M., Skoch C. Final report for the advanced concept studies for supersonic commercial transports entering service in the 2030 to 2035 period, N+3 supersonic program. NASA/CR-2010-216796. PMF-01623. August 2010. 123 p.
15. Aerion AS2. Available at: <https://www.businessjetinteriorsinternational.com/features/aerion-as2.html>
16. Spike Aerospace. Available at: <https://www.spikeaerospace.com/>
17. Boom Overture. Available at: <https://boomsupersonic.com/overture>
18. Chernyshev S.L., Gorbovskoy V.S., Kazhan A.V., Korunov A.O. Re-entry vehicle sonic boom issue: modelling and calculation results in windy atmosphere based on the augmented Burgers equation. *Acta Astronautica*. 2022. V. 194. P. 450-460. DOI: 10.1016/j.actaastro.2021.12.038
19. Bashkirov I.G., Gilyazev D.I., Gorbovskoy V.S., Dementev A.A., Ivanyushkin A.K., Kazhan A.V., Kazhan V.G., Karpov E.V., Novogorodtsev E.V., Shanygin A.N., Shenkin A.V., Fomin D.Yu., Chernyshev S.L. *Sverkhzvukovoy samolet* [Supersonic aircraft]. Patent RF, no. 2753443, 2021. (Publ. 16.08.2021, bull. no. 23)
20. Gordin M.V., Palkin V.A. Concepts of aero engines for advanced civil aircraft. *Aviation Engines*. 2019. No. 3 (4). P. 7-16. (In Russ.)
21. Seddon J., Goldsmith E.L. Intake aerodynamics. American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1985. 442 p.
22. Gorbovskoy V.S., Kazhan A.V., Kazhan V.G., Chernyshev S.L. The influence of the overpressure signature shape on the sonic boom loudness. *TsAGI Science Journal*. 2020. V. 51, Iss. 2. P. 111-129. DOI: 10.1615/TsAGISciJ.2020034757
23. Howe D. Engine placement for sonic boom mitigation. *40th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit (January, 14-17, 2002, Reno, NV, U.S.A.)*. DOI: 10.2514/6.2002-148
24. Kovalenko V.V., Chernyshev S.L. On the issue of reducing sonic boom. *Uchenye zapiski TsAGI*. 2006. V. 37, no. 3. P. 53-63. (In Russ.)
25. Pochkin Ya.S., Rossikhin A.A., Khaletskiy Yu.D. Ekranirovanie shuma ventilyatora fragmentom kryla. *Sb. tezisev Vserossiyskogo Aeroakusticheskogo Foruma (September, 20-25, 2021, Gelendzhik)*. Iss. 2807. Zhukovskiy: TsAGI Publ., 2021. P. 35-36. (In Russ.)
26. Remeev N.Kh. *Aerodinamika vozdukhobornikov sverkhzvukovykh samoletov* [Aerodynamics of supersonic aircraft air intakes]. Zhukovskiy: TsAGI Publ., 2002. 178 p.
27. Brezillon J., Carrier G., Laban M. Multi-Disciplinary optimization including environmental aspects applied to supersonic aircraft. *27th International Congress of the Aeronautical Sciences, ICAS 2010 (September, 19-24, 2010, Nice, France)*.
28. Karpov E.V., Koltok N.G., Novogorodtsev E.V., Kazhan A.V. Eksperimental'noe issledovanie kharakteristik nereguliruemogo trapetsievidnogo vozdukhobornika (VZ) v nadkryl'evoy komponovke sverkhzvukovogo grazhdanskogo samoleta (SGS). *Materialy Mezhotraslevoy Nauchno-Tekhnicheskoy Konferentsii «Sovremennye Problemy*

*Aerogazodinamiki Silovykh Ustanovok Letatel'nykh Apparatov» (October, 21-22 2021, Zhukovskiy)*. Moscow: TsAGI Publ., 2021. P. 46-48. (In Russ.)

29. Novogorodtsev E.V., Karpov E.V., Koltok N.G. Characteristics improvement of spatial fixed-geometry air intakes of external compression based on boundary layer control systems application. *Aerospace MAI Journal*. 2021. V. 28, no. 4. P. 7-27. (In Russ.) DOI: 10.34759/vst-2021-4-7-27

30. Karpov E.V., Koltok N.G., Novogorodtsev E.V. Chislennoe issledovanie kharakteristik obtekaniya oval'nogo vozdukhobornika v nadkryl'evoy komponovke sverkhzvukovogo grazhdanskogo samoleta. *Materialy Mezhotraslevoy Nauchno-Tekhnicheskoy Konferentsii «Sovremennye Problemy Aerogazodinamiki Silovykh Ustanovok Letatel'nykh Apparatov» (October, 21-22 2021, Zhukovskiy)*. Moscow: TsAGI Publ., 2021. P. 45-46. (In Russ.)

31. Slater J.W. Methodology for the design of streamline-traced external-compression supersonic inlets. *50th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference (July, 28-30, 2014, Cleveland, OH)*. DOI: 10.2514/6.2014-3593

32. Garzon G.A. Use of a translating cowl on a SSBJ for improved takeoff performance. *45th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit (January, 8-11, 2007, Reno, Nevada)*. DOI: 10.2514/6.2007-25.

33. Belova V.G., Vinogradov V.A., Komratov D.V., Stepanov V.A. Kharakteristiki vozdukhobornogo ustroystva sverkhzvukovogo delovogo samoleta pri imitatsii vozmushcheniy. *Materialy XXX Nauchno-Tekhnicheskoy Konferentsii po Aerodinamike, Posvyashchennoy 150-letiyu so Dnya Rozhdeniya S.A. Chaplygina (April, 25-26, 2019, Moscow oblast)*. Zhukovskiy: TsAGI Publ., 2019. P. 50-51. (In Russ.)

34. Lyubimov D.A., Kukshinova I.V., Vinogradov V.A. A RANS/ILES study of the features of the flow in the spatial air intake of a supersonic business-class aircraft in throttle modes. *High Temperature*. 2022. V. 60, Suppl. 1 P. S86-S93. DOI: 10.1134/S0018151X21040155

35. Belova V.G., Vinogradov V.A., Komratov D.V., Makarov A.O., Stepanov V.A. Raschetno-eksperimental'nye issledovaniya vkhodnogo ustroystva silovoy ustanovki sverkhzvukovogo delovogo samoleta. *Materialy XXIX Nauchno-Tekhnicheskoy Konferentsii po Aerodinamike (March, 01-02, 2018, Bogdanikha, Moscow oblast)*. Zhukovskiy: TsAGI Publ., 2018. P. 55. (In Russ.)

36. Vinogradov V.A., Kussyukbaeva D.I., Stepanov V.A. Sravnenie raschetnykh i eksperimental'nykh dannykh po integral'nym kharakteristikam vozdukhobornika v komponovke s korpusom sverkhzvukovogo letatel'nogo apparata. *Materialy XXIX Nauchno-Tekhnicheskoy Konferentsii po Aerodinamike (March, 01-02, 2018, Bogdanikha, Moscow oblast)*. Zhukovskiy: TsAGI Publ., 2018. P. 80. (In Russ.)

37. Vinogradov V.A., Melnikov Ya.A., Stepanov V.A. Choice and design of a 3D fixed-geometry inlet for a small supersonic business aircraft. *TsAGI Science Journal*. 2017. V. 48, Iss. 2. P. 141-158. DOI: 10.1615/TsAGISciJ.2017021109

38. Vinogradov V.A., Makarov A.Yu., Melkonyan N.A., Stepanov V.A. Experimental investigation of a 3D fixed-geometry inlet for a supersonic business aircraft. *TsAGI Science Journal*. 2017. V. 48, Iss. 3. P. 261-276. DOI: 10.1615/TsAGISciJ.2017022808

39. Shorstov V.A. *Vozdukhobornik s izmenyaemoy geometriey dlya sverkhzvukovogo passazhirskogo letatel'nogo apparata* [Variable geometry air intake for supersonic passenger aircraft]. Patent RF, no. 2766238, 2022. (Publ. 10.02.2022, bull. no. 4)

40. Nechaev Yu.N. *Vkhodnye ustroystva sverkhzvukovykh samoletov* [Air intakes of supersonic aircraft]. Moscow: Voenizdat Publ., 1963. 140 p.

41. Conners T.R., Howe D.C. Supersonic inlet shaping for dramatic reductions in drag and sonic boom strength. *44th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit (January, 9-12, 2006, Reno, Nevada)*. DOI: 10.2514/6.2006-30
42. Conners T.R., Merret J.M., Howe D.C., Tacina K., Hirt S. Wind tunnel testing of an axisymmetric isentropic relaxed external compression inlet at Mach 1.97 design speed. *43rd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit (July, 8-11, 2007, Cincinnati, OH)*. DOI: 10.2514/6.2007-5066
43. Ibragimov M.R., Novikov A.P., Novikov M.P., Trifonov A.K., Yudin V.G. *Vozdukhobornik sverkhzvukovogo passazhirskogo samoleta* [The air intake of a supersonic passenger aircraft]. Patent RF, no. 196778, 2020. (Publ. 16.03.2020; bull. no. 8)
44. Ibragimov M.R., Novikov A.P., Novikov M.P., Trifonov A.K., Yudin V.G. *Vozdukhobornik sverkhzvukovogo passazhirskogo samoleta* [The air intake of a supersonic passenger aircraft]. Patent RF, no. 196781, 2020. (Publ. 16.03.2020; bull. no. 8)
45. Vinogradov V.A., Stepanov V.A. *Vozdukhobornik s izmenyaemoy geometriey dlya sverkhzvukovogo letatel'nogo apparata (varianty)* [Air intake with variable geometry for supersonic aircraft (versions)]. Patent RF, no. 2353550, 2009. (Publ. 27.04.2009, bull. no. 12)
46. Conners T., Wayman T. The feasibility of high-flow nacelle bypass for low sonic boom propulsion system design. *29th AIAA Applied Aerodynamics Conference (June, 27-30, 2011, Honolulu, Hawaii)*. DOI: 10.2514/6.2011-3797
47. Sergeev A.S., Nasyrov R.A., Trifonov A.A. The S-512 airplane: a real step towards supersonic civil aviation. *Studencheskiy Vestnik*. 2019. No. 27 (77), part 3. P. 58-59. (In Russ.)
48. Hirt S.M., Chima R.V., Vyas M.A. Experimental investigation of a large-scale low-boom inlet concept. *29th AIAA Applied Aerodynamics Conference (June, 27-30, 2011, Honolulu, Hawaii)*. DOI: 10.2514/6.2011-3796
49. Belova V.G., Vinogradov V.A., Komratov D.V., Stepanov V.A., Zaharov D.L., Maslov V.P. Development of the appearance of an integrated inlet of a supersonic business/passenger aircraft with a modified compression scheme and a two-circuit flow divider at the output. *Proceedings of the International Conference on Aviation Motors ICAM 2020 (May, 18-21, 2021, Moscow, Russia)*. Moscow: CIAM Publ., 2020. P. 107-110. (In Russ.)
50. Belova V.G., Vinogradov V.A., Komratov D.V., Stepanov V.A. Issledovaniya dvukhkoturnogo vkhodnogo ustroystva dlya silovoy ustanovki sverkhzvukovogo delovogo samoleta s dvigatelem izmenyaemogo tsikla. *Materialy XXX Nauchno-Tekhnicheskoy Konferentsii po Aerodinamike, Posvyashchennoy 150-letiyu so Dnya Rozhdeniya S.A. Chaplygina (April, 25-26, 2019, Moscow oblast)*. Zhukovskiy: TsAGI Publ., 2019. P. 49-50. (In Russ.)
51. Makarov V.E., Shorstov V.A. Predvaritel'noe obosnovanie skhemy silovoy ustanovki na osnove reguliruemogo za schet vspomogatel'nogo kanala vozdukhobornika vnutrennego szhatiya. *Materialy Mezhotraslevoy Nauchno-Tekhnicheskoy Konferentsii «Sovremennyye Problemy Aerogazodinamiki Silovykh Ustanovok Letatel'nykh Apparatov» (October, 21-22, 2021, Zhukovskiy)*. Moscow: TsAGI Publ., 2021. P. 62-63. (In Russ.)
52. Stern A.M., Peracchio A.A. The challenge of reducing supersonic civil transport propulsion noise. *25th Joint Propulsion Conference (July, 10-12, 1989, Monterey, CA)*. DOI: 10.2514/6.1989-2363
53. Seiner J.M., Krejsa E.A. Supersonic jet noise and the high-speed civil transport. *25th Joint Propulsion Conference (July, 10-12, 1989, Monterey, CA)*. DOI: 10.2514/6.1989-2358

54. Smith M.J.T., Lowrie B.W., Brooks J.R., Bushell K.W. Future supersonic transport noise – lessons from the past. *24th Joint Propulsion Conference (July, 11-13, 1988, Boston, Massachusetts)*. DOI: 10.2514/6.1988-2989

55. Sadeghian M., Bandpy M.G. Technologies for aircraft noise reduction: A review. *Journal of Aeronautics and Aerospace Engineering*. 2020. V. 9, Iss. 1. DOI: 10.35248/2168-9792.20.9.219

56. Shenkin A.V., Mazurov A.P., Bykov A.P. Aerodynamic design of single-expansion ramp nozzle for aircraft with supersonic cruise speed of flight. *Proceedings of the 29-th Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences, ICAS 2014 (September 7-12, 2014, St. Petersburg, Russia)*.

57. Krasheninnikov S., Mironov A., Pavlyukov E., Shenkin A., Zhitenev V. Mixer-ejector nozzles: acoustic and thrust characteristics. *International Journal of Aeroacoustics*. 2005. V. 4, Iss. 3-4. P. 267-288. DOI: 10.1260/1475472054771448

58. Krasheninnikov S., Mironov A., Paulukov E., Zitenev V., Julliard J., Maingre E. An experimental study of 2-D mixer/ejector noise and thrust characteristics. *2nd AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference (May, 06-08, 1996, State College, PA)*. DOI: 10.2514/6.1996-1668

59. Imaev T.F., Mironov A.K., Polev A.S., Slinko M.B. *Vykhlopnoe soplo vozdušno-reaktivnogo dvigatelya* [Exhaust nozzle of an aero-jet engine]. Patent RF no. 156534, 2015. (Publ. 10.11.2015, bull. no. 31).

60. Gorbovskoy V.S., Kazhan V.G., Kazhan A.V., Shenkin A.V. *Shumoglushashchee soplo vozdušno-reaktivnogo dvigatelya* [Noise-suppressing nozzle of air-jet engine]. Patent RF no. 2732360, 2020. (Publ. 15.09.2020, bull. no. 26)

61. Bridges J., Zaman K.Q., Heberling B. Basics of mixer-ejectors for quiet propulsion. *AIAA Aviation Forum 2020 (June, 15-19, 2020, Virtual)*. DOI: 10.2514/6.2020-2505

62. Lavrukhin G.N. *Aerodinamika reaktivnykh sopel. T. I. Vnutrennie kharakteristiki sopel* [Aerodynamics of jet nozzles. V.I. Internal characteristics of nozzles]. Moscow: Nauka. Fizmatlit Publ., 2003. 376 p.

63. Alendar A.D., Grunin A.N., Siluyanova M.V. Analysis of basic concepts of advanced engines for supersonic civil aircraft on the basis of foreign designers' experience. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2021. V. 20, no. 3. P. 24-36. (In Russ.). DOI: 10.18287/2541-7533-2021-20-3-24-36

64. Skibin V.A., Solonin V.I., Palkin V.A. *Raboty vedushchikh aviadvigateley stroitel'nykh kompaniy v obespechenie sozdaniya perspektivnykh aviatsionnykh dvigateley (analiticheskiy obzor)* [The work of leading aircraft engine construction companies to ensure the creation of advanced aircraft engines (analytical review)]. Moscow: CIAM Publ., 2010. 676 p.

65. Palkin V.A. Review of works in the USA and Europe on aero engines for civil aircraft of 2020...2040's. *Aviation Engines*. 2019. No. 3 (4). P. 63-83. (In Russ.)

66. Evstigneev A.A., Lanshin A.I., Pochkin Ia.S., Solonin V.I., Khaletskii Iu.D. The problem of noise in promising turbofan engines for long-haul aircraft. *Aviation Engines*. 2022. No. 2 (15). P. 27-40. (In Russ.)

67. Alendar A.D., Vikulin A.V., Grunin A.N. Analiz parametrov zarubezhnykh turboreaktivnykh dvigateley tyagoy bolee 35 t. *Materialy XIX Vserossiyskoy Nauchno-Tekhnicheskoy Konferentsii «Aerokosmicheskaya Tekhnika, Vysokie Tekhnologii i Innovatsii – 2018»* (November, 15-17, 2018, Perm). Perm: PNIPU Publ., 2018. P. 14-17. (In Russ.)

68. Siluyanova M.V., Alendar A.D., Grunin A.N. Development of technical appearance and investigation of effective characteristics of power plant of perspective supersonic passenger aircraft. *Aviation Industry*. 2019. No. 3-4. P. 9-14. (In Russ.)

69. *Inostrannyye aviatsionnyye dvigateli: spravochnik / pod red. L.I. Sorkina* [Foreign aircraft engines, 2000: Handbook]. Moscow: Aviamir Publ., 2000. 534 p.

70. *Inostrannyye aviatsionnyye dvigateli i gazoturbinnyye ustanovki (po materialam zarubezhnykh publikatsiy): spravochnik / pod red. L.I. Sorkina, G.K. Vedeshkina, A.N. Knyazeva* [Foreign aircraft engines and gas turbine power plants: handbook (based on materials of foreign publications.) / ed. by L.I. Sorkin, G.K. Vedeshkin, A.N. Knyazev]. Moscow: CIAM Publ., 2010. 415 p.

71. Zrelov V.A. *Otechestvennyye GTD. Osnovnyye parametry i konstruktivnyye skhemy: ucheb. posobie* [Domestic gas turbine engines. Basic parameters and design schemes]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 2005. 336 p.

72. Annex 16. V. I. Environmental protection - Aircraft noise. ICAO, 2014.

73. Yakurnova K.A., Alendar A.D. Analysis of foreign works on the creation of a bypass turbojet on the basis of the core engine. *Proceedings of the XLVII Gagarin Science Conference (April, 20-23, 2021, Moscow)*. Moscow: Pero Publ., 2021. P. 202-203. (In Russ.)

74. Berton J.J., Huff D.L., Geiselhart K., Seidel J.A. Supersonic technology concept aeroplanes for environmental studies. *AIAA SciTech Forum 2020 (January, 6-10, 2020, Orlando, Florida)*. DOI: 10.2514/6.2020-0263

75. Pozharinskiy A.A., Kuznetsov V.A. *Dvukhkonturnyy turboreaktivnyy dvigatel'* [Dual-flow turbojet engine]. Patent RF, no. 2488710, 2013. (Publ. 27.07.2013, bull. no. 21)

76. Korovkin V., Evstigneev A., Makarov V., Strelets D., Shevelev O., Kopiev V., Belyaev I. Concept of prototype of near-term supersonic commercial aircraft with derivative engines based on existing cores. *24th International Society of Air Breathing Engines – ISABE 2019 (September, 22-27, 2019, Canberra)*.

77. Nordqvist M., Kareliusson J., Silva E.R., Kyprianidis K.G. Conceptual design of a turbofan engine for a supersonic business jet. *23-th International Society of Air Breathing Engines – ISABE 2017 (September, 03-08, 2017, Manchester)*.

78. Siluyanova M.V., Kuritsyna V.V., Alendar' A.D., Grunin A.N. Influence of engine parameters on the power-unit performance in supersonic aircraft. *Russian Engineering Research*. 2020. V. 40, Iss. 12. P. 1048-1051. DOI: 10.3103/S1068798X20120187

79. Mirzoyan A.A., Khaletskii I.D. Take-off thrust and noise control for supersonic civil transport engines. *Aviation Engines*. 2020. No. 2 (7). P. 51-56. (In Russ.)

80. Mirzoyan A.A., Ryabov P.A. Opyt issledovaniy v proekte FP6 HISAC maloshumnykh programm upravleniya vzletnoy tyagoy SPS. *Tezisy Dokladov Pyatoy Otkrytoy Vserossiyskoy (XVII Nauchno-Tekhnicheskoy) Konferentsii po Aeroakustike (September, 25-29, 2017, Moscow)*. Zhukovskiy: TsAGI Publ., 2017. P. 288. (In Russ.)

81. Nakamura T., Oka T., Imanari K. Development of CMC turbine parts for aero engines. *IHI Engineering Review*. 2014. V. 47, Iss. 1. P. 29-32.

82. Mezentsev M.A., Myktybekov B., Sinitsyn A.V., Ezhov A.Y., Tsvetkov I.V., Palchikov D.S., Vybornov D.I. Research and application of structural ceramic and composite materials in aircraft engine. *Russian Internet Journal of Industrial Engineering*. 2022. V. 9, no. 1. P. 19-27. DOI: 10.24892/RIJIE/20220204

83. Mezentsev M.A., Karimbayev T.D., Palchikov D.S., Sinitsyn A.V. Technologies for creating and testing high-temperature parts from ceramic matrix composite. *Sbornik Dokladov Mezhdunarodnoy Nauchno-Tekhnicheskoy Konferentsii «Problemy i Perspektivy Razvitiya Dvigatestroeniya» (June, 23-25, 2021, Samara)*. V. 2. Samara: Samara University Publ., 2021. P. 336-337. (In Russ.)

84. Lukovnikov A.V. Central Institute of Aviation Motors Research to ensure the creation of a power plant for a second generation supersonic civil aircraft. *Abstracts XLVI Academic Space Conference (January, 25-28, 2022, Moscow)*. V. 3. Moscow: Bauman Moscow State Technical University Publ., 2022. P. 390-392. (In Russ.)

85. Nesterenko V.G., Abbavaram R.R. Air-to-air heat exchangers of the high-pressure turbine rotor cooling system in modern aviation turbojet. *Engineering Journal: Science and Innovation*. 2018. No. 11 (83). DOI: 10.18698/2308-6033-2018-11-1827

86. Zhuang L., Xu G., Dong B., Liu Q., Li M., Wen J. Exergetic effects of cooled cooling air technology on the turbofan engine during a typical mission. *Energies*. 2022. V. 15, Iss. 14. DOI: 10.3390/en15144946

87. Lepeshkin A.R., Svetlakov A.L., Verbanov I.S. Reducing surface roughness and leak testing of heat exchangers manufactured using additive technology. *Materialy XVII Mezhdunarodnoy Nauchno-Prakticheskoy Konferentsii «Energo- i Resursosberezhenie – XXI Vek» (December, 02-04, 2019, Orel)*. Orel: Orel State University Publ., 2019. P. 149-153. (In Russ.)

88. Magerramova L.A., Nozhnitsky Yu.A., Volkov S.A., Volkov M.E., Chepurinov V.Zh., Belov S.V., Verbanov I.S., Zaikin S.V. Prospects of application of additive technologies to develop parts and components of gas turbine engines and ramjets. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2019. V. 18, no. 3. P. 81-98. (In Russ.). DOI: 10.18287/2541-7533-2019-18-3-81-98