

К оценке среднего уровня комфортной перегрузки высокоскоростного пассажирского самолета

Шлякотин В.Е.

Центральный институт авиационного моторостроения им. П.И. Баранова, г. Москва

e-mail: veshlyakotin@ciam.ru

На основании данных авиационной медицины и летно-технических данных проектов высокоскоростных пассажирских самолетов проведена оценка перегрузки при ускорении, обеспечивающей комфортный перелет пассажиров.

Ключевые слова: высокоскоростной пассажирский самолет, сверхзвуковой пассажирский самолет, ускорение, перегрузка, условия комфортного перелета

On the assessment of a high-speed passenger aircraft's average level of comfortable g-force

Shlyakotin V.E.

CIAM, Moscow

Based on aviation medicine and flight performance data from high-speed passenger aircraft projects, an assessment of g-force during acceleration was conducted to ensure a comfortable flight for passengers.

Keywords: high-speed passenger aircraft, supersonic passenger aircraft, acceleration, g-force, comfortable flight conditions

С начала XXI века, особенно с 2010-х годов, растет интерес к проблемам создания сверхзвуковых и гиперзвуковых самолетов гражданского назначения – для грузовых и, прежде всего, пассажирских перевозок. Работы в этом направлении проводятся как в России, так и за рубежом: в США, Европе, Японии, Китае, Индии [1]. Развитие международных торгово-промышленных связей, глобализация мировой экономики обусловили проведение широкого фронта работ по программам сверхзвуковых пассажирских/деловых самолетов, как наиболее реалистичным проектам летательных аппаратов (ЛА) с относительно небольшими сверхзвуковыми скоростями полета, не превышающими число Маха $M \approx 2$ и уже реализованными в мировой авиационной практике.

Однако большие расстояния между столицами разных стран, промышленными и культурными центрами требуют существенного сокращения времени перемещения пассажиров между ними, т.е. еще больших скоростей полета, вплоть до гиперзвуковых. Одним из важных преимуществ таких высокоскоростных пассажирских самолетов (ВПС) для дальних континенталь-

ных и межконтинентальных перелетов должна стать возможность однодневной деловой поездки.

Наибольший интерес среди зарубежных проектов ВПС представляют последние разработки стран Европейского союза, Великобритании и США [2–7]. Стремление к существенному сокращению времени полета на дальних маршрутах обуславливает для этих ЛА высокие значения числа Маха крейсерского полета – не менее $M_{кр} = 5,0$, вплоть до орбитальных, $M_{кр} = 25$. При этом в опубликованных материалах по этим проектам отсутствуют какие-либо данные о технико-экономическом обосновании выбора $M_{кр}$ или учета ряда ограничений (уровень шума, интенсивность звукового удара, экологические ограничения и пр.).

В отечественных разработках перспективных ЛА и двигателей к ним эти вопросы рассматриваются и дается предварительное технико-экономическое обоснование будущих гиперзвуковых ЛА, однако до сих пор не освещена проблема физиологических ограничений пассажиров, прежде всего величины ускорения на участках разгона-торможения и времени действия этого ускорения [8].

Создание ВПС даже с $M_{кр} = 4,0 \dots 6,0$ остается под вопросом главным образом из-за технических проблем. Тем не менее рассматривать влияние предельных ускорений ВПС на полетное время для наглядности целесообразно именно при таких $M_{кр}$ и на дальних маршрутах с оценкой приемлемого уровня перегрузки, обеспечивающей комфортный полет пассажиров.

Воздействие инерционных сил (перегрузок) вызывает не только механическое нагружение отдельных органов человека и связующих их элементов, но и физиологическое изменение их функций. Тело человека представляет собой многофазную систему, в состав которой входят твердые тела с различными модулями упругости (костно-опорный аппарат), мягкие ткани, жидкости (кровь, лимфа и др.) и газы. Костно-опорный аппарат имеет сложную кинематику со многими степенями свободы. Реакция столь сложной системы на действие перегрузки зависит как от величины перегрузки, так и от ее направления относительно продольной и других осей, связанных с телом человека [9].

Воздействие ускорения принято выражать величиной перегрузки $n = a/g$, где a – абсолютное значение ускорения, как по величине, так и по направлению; g – ускорение свободного падения.

Перегрузки при высшем пилотаже на скоростном самолете в разных направлениях составляют $n = 8 \dots 10$, время воздействия – $5 \dots 8$ с (для профессиональных, тренированных летчиков) [9]. Реакции организма человека на длительно действующие большие перегрузки (поза – сидя в кресле с фиксацией ремнями) таковы [9]:

- при перегрузке «грудь – спина»: деформация ребер грудной клетки; нарушение дыхания; нарушение работы сердечно-сосудистой системы; болевой синдром;

- при перегрузке «спина – грудь»: деформация (травма) позвоночника и травма головы при кивке; травма конечностей.

Таким образом, выносливость организма человека зависит не только от направления и величины перегрузки, но и от длительности ее воздействия. При исследованиях переносимости человеком перегрузок было обнаружено, что перегрузки, действующие по направлению

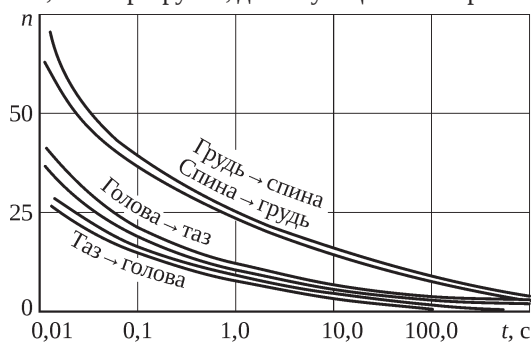


Рис. 1. Физиологическая переносимость человеком действия перегрузок в разных направлениях [10]

близкому к оси «грудь – спина» (характерные для авиационных полетов), переносятся человеком значительно лучше, чем по любым другим направлениям (рис. 1), поскольку при разгоне (торможении) ВПС на экипаж и пассажиров действует ускорение, направленное вдоль траектории движения ЛА.

Основные закономерности воздействия на человека перегрузки «грудь – спина», а также перегрузок, действующих в латеральной (боковой) плоскости были выявлены при исследованиях проблемы обеспечения безопасности экипажей пилотируемых космических кораблей [9]. Ниже представлена эмпирическая зависимость переносимой перегрузки «грудь – спина» от времени ее воздействия, аппроксимирующая данные, приведенные на рис. 1:

$$n = 30t^{-0,2}.$$

Отметим, что в определении перегрузки предполагается, что на поверхности Земли на человека воздействует ускорение $a = g$ и поэтому перегрузка $n = 1$ [10]. Однако при рассмотрении перегрузки, действующей на пассажиров вдоль траектории при ускорении ЛА, величина перегрузки будет соответствовать этому ускорению, которое в случае крейсерского полета отсутствует (движение с постоянной скоростью, $a = 0$). То есть в нашем случае перегрузка будет отсчитываться от $n = 0$ и будет на единицу меньше принятой в авиационной медицине.

Как отмечается в [9; 10], поперечная перегрузка до $n = 3$ (в нашем отсчете $n = 2$), действующая в течение длительного времени (15...25 мин) в направлении «грудь – спина», безболезненно переносится человеком в положении сидя, а перегрузка до $n = 4 \dots 5$ (в нашем отсчете $n = 3 \dots 4$) в положении сидя легко переносится человеком в течение 7...10 мин и не мешает ему управлять летательным аппаратом.

Результаты расчетов перегрузки «грудь – спина», полученные по приведенной выше временной зависимости, показаны на рис. 2. Приведена кривая переносимой перегрузки (сплошная красная) при $t = 1 \dots 10$ мин с экстраполяцией в большие значения времени (штриховая красная кривая) и кривая безболезненно переносимой перегрузки (синяя штриховая), проведенная через данное в [9] значение $n = 2$ при $t = 20$ мин (обозначено звездочкой). Эти кривые характеризуют область более чем некомфортного уровня перегрузок.

Однако, если говорить не о выдерживаемой (переносимой) перегрузке подготовленными (тренированными) представителями летного персонала, а о комфортном ее уровне (для неподготовленного пассажира), то значение такой перегрузки должно быть намного ниже. С целью оценки именно комфортного уровня перегрузки при разгоне (торможении) рассматривались различные

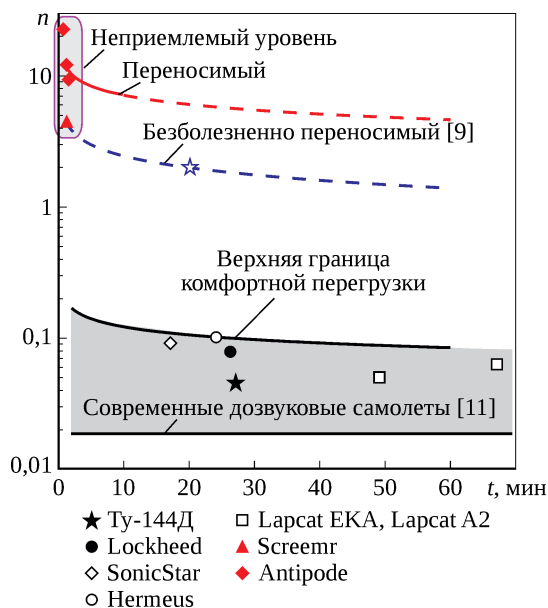


Рис. 2. Уровни переносимой перегрузки «грудь – спина» и уровни средней перегрузки при разгоне (торможении) ВПС в зависимости от длительности воздействия

проекты ВПС, в описании которых представлены данные о дальности, времени и крейсерской скорости (числе Маха) полета (таблица), позволяющие на основе простых кинематических соотношений оценить среднюю перегрузку (ускорение) и время ее воздействия (время разгона). В этих соотношения приняты допущения о равноускоренном движении от скорости $V=0$ до крейсерской $V=V_{кр}$ и равенстве участков разгона и торможения.

Реальные значения ускорений (перегрузок) отличаются от средних значений, поскольку разгон любого ЛА состоит из нескольких участков (разбег по взлетно-посадочной полосе, разгон, набор высоты и др.), тем не менее такой приближенный подход позволит приступить к дальнейшему анализу.

Таблица. Основные полетные данные проектов ВПС

Проект	Маршрут	Дальность, км	$M_{кр}$	$H_{кр}$, км	Время полета, мин
Ту-144Д [12]	Москва – Хабаровск	6134	2,2	18,3	195
Lockheed [13]	Лос-Анджелес – Токио	8722	6,0	30,0	138
	Нью-Йорк – Лондон	5672			116
SonicStar [14]	Лондон – Нью-Йорк	5672	3,1	19,0	120
Hermeus [15; 16]	Нью-Йорк – Париж	5835	5,0	$q_H = 60$ кПа	90
Lapcat EKA [3; 14]	Брюссель – Сидней	16 744	8,0		180
Lapcat A2 [11; 14]	Лондон – Сидней	16 994	5,0		240
Screamr [14]	Лондон – Нью-Йорк	5672	10,0	$q_H = 60$ кПа	30 ^{*)}
Antipode [14]	Нью-Йорк – Лондон	5672	24,0		11 ^{*)}
	Нью-Йорк – Шанхай	11 542			24 ^{*)}
	Нью-Йорк – Сидней	15 682			32 ^{*)}

Примечание. q_H – скоростной напор. ^{*)} Вероятнее всего, длительность крейсерского участка полета.

Наиболее экзотическими из рассмотренных проектов ВПС являются проекты Screamr и Antipode. Уровень средней перегрузки для этих ВПС составляет $n = 9 \dots 23$ (см. рис. 2). Несмотря на кратковременность ее воздействия ($t = 1,0 \dots 1,5$ мин), подобный уровень, скорее всего, нельзя считать допустимым. Результаты для остальных проектов можно считать вполне приемлемыми.

Наиболее реалистичной (в качестве максимального уровня) выглядит средняя перегрузка, реализуемая в проекте Hermeus. В этом случае перегрузка $n \approx 0,1$ длительностью 20...40 мин для пассажира массой ~ 100 кг приведет к дополнительной нагрузке на его тело в ~ 10 кг, что можно считать вполне приемлемым для неподготовленного пассажира.

Этот уровень перегрузки и лег в основу определения верхней границы комфортного уровня. Распределение этой границы по времени ее воздействия (время разгона) осуществлено в соответствии с приведенной выше зависимостью.

Нижняя граница диапазона комфортных перегрузок (закрашенная область) определяется уровнем характерным для современной дозвуковой пассажирской авиации [11].

Однако, несмотря на то, что уровень перегрузки при разгоне сверхзвукового пассажирского самолета Ту-144 находится внутри определенной нами области ($n \approx 0,045$ при $t \approx 25$ мин), согласно воспоминаниям пассажира одного из рейсов, при разгоне самолета ощущался заметный дискомфорт [17]. При разработке перспективных ВПС вопросу создания условий для пассажиров (снижение уровня вибраций, шумоизоляция, эргономичные кресла и пр.) необходимо уделить повышенное внимание.

В заключение необходимо отметить, что для современных дозвуковых и перспективных сверхзвуковых

пассажирских и деловых самолетов время разгона (торможения) значительно меньше времени крейсерского полета. Выбор параметров при проектировании двигателей таких ЛА осуществляется на самом продолжительном режиме – режиме крейсерского полета (расчетном режиме работы двигателей), характеризующемся максимальной экономичностью, поскольку на режимах разгона или торможения (нерасчетных режимах работы двигателя) расход топлива значительно выше. Однако с ростом скорости крейсерского полета, с учетом определенного выше максимального уровня комфортной перегрузки (ускорения), доля времени разгона (тормо-

жения) ВПС значительно возрастает. В этом случае потребуется пересмотреть расчетный режим работы двигателя с оптимизацией его параметров по всей траектории полета.

Таким образом, на основе оценок среднего уровня перегрузки типа «грудь – спина» при разгоне (торможении) для различных проектов ВПС определена область комфортных перегрузок для неподготовленных пассажиров. Более того, определенный диапазон перегрузок становится дополнительным условием (ограничением) выбора режимных параметров как для летательного аппарата, так и для его силовой установки.

Литература

1. Обзор НИОКР по созданию сверх- и гиперзвуковых пассажирских самолетов нового поколения (ЕС – Япония – США) // *Авиационная и ракетная техника : экспресс-информация по материалам иностранной печати / ЦАГИ*. 2011. № 26. С. 98–99. Источники: Air International, 2011, № 1; www.reactionengines.co.uk, 22/IV 2011; www.transeum.com, 2/V 2011.
2. Serre L., Defoort S. Lapcat-II: towards a Mach 8 civil aircraft concept, using advanced Rocket/Dual-mode ramjet propulsion system. 2009. (16th AIAA/DLR/DGLR International Space Planes and Hypersonic Systems and Technologies Conference : 19–22 October 2009, Bremen, Germany ; AIAA 2009-7328).
3. Steelant J. Sustained hypersonic flight in Europe: first technology achievements within LAPCAT II. 2011. (17th AIAA International Space Planes and Hypersonic Systems and Technologies Conference : 11–14 April 2011, San Francisco, California ; AIAA 2011-2243).
4. Preliminary numerical analysis of the LAPCAT MR2 vehicle configuration at Mach 8 cruise conditions / P. Roncioni, L. Cutrone, F. Battista, M. Marini, J. Steelant. 2011. 8 p. (4th European Conference for Aerospace Sciences (EUCASS) : Saint Petersburg, 4–8 June 2011).
5. LAPCAT-II: conceptual design of a Mach 8 TBCC civil aircraft, enforced by full Navier-Stokes 3D nose-to-tail computation / S. Defoort, M. Ferrier, L. Serre, D. Scherrer, C. Paridaens, P. Hendrick and A. Ingenito, C. Bruno. 2011. (17th AIAA International Space Planes and Hypersonic Systems and Technologies Conference : 11–14 April 2011, San Francisco, California ; AIAA 2011-2317).
6. Концептуальное проектирование средств спасения для гиперзвукового суборбитального ГЛА «СпейсЛайнер» // *Авиационная и ракетная техника : экспресс-информация по материалам иностранной печати / ЦАГИ*. 2016. № 29. С. 32–33. Источник: Aviation Week & Space Technology, 23/XI – 06/XII 2015.
7. Boeing представила концепт гиперзвукового пассажирского самолета // *Обозрение. Серия «Авиационное двигателестроение» : по материалам иностранных публикаций / ЦИАМ*. 2018. № 29. С. 5–8.
8. Шлякотин В.Е., Шихман Ю.М. О выборе максимальных значений числа Маха полета высокоскоростного пассажирского самолета // *Основные результаты научно-технической деятельности ЦИАМ (2017 г.) / под общ. ред. М.В. Гордина, А.И. Ланшина, М.Я. Иванова. М. : ЦИАМ, 2018. С. 66–69.*
9. Рабинович Б.А. Безопасность человека при ускорениях : (биомеханический анализ). М. : Книга и бизнес, 2007. 208 с.
10. Алексеев С.М., Усманский С.П. Высотные и космические скафандры. М. : Машиностроение, 1973. 280 с.
11. Джордани Э. Как построить гиперзвуковой авиалайнер // *ИноСМИ*. URL: <https://inosmi.ru/world/20150929/230520122.html> (дата обращения: 15.12.2021). Дата публ.: 29.09.2015.
12. Ту-144 («044») : сверхзвуковой пассажирский самолет, ОКБ А.Н. Туполева // *Авиабазы : сайт. Раздел «Ангар»*. URL: <http://airbase.ru/sb/russia/tupolev/144/> (дата обращения: 15.12.2021).
13. Lockheed Hypersonic Transport Configuration // *Interavia Air Letter : World aviation, space and electronics day by day*. 1977. No. 8878 (November 8). P. 5.
14. Быстрее звука: проекты сверхзвуковых самолетов будущего / Редакция Naked Science // *Naked Science*. URL: <https://naked-science.ru/article/top/bystree-zvuka-proekty-sverkhzv> (дата обращения: 15.12.2021). Дата публ.: 04.04.2016.
15. Hermeus : site / Hermeus Corp. URL: <http://www.hermeus.com> (дата обращения: 15.12.2021).

-
16. Компания Hermeus готовится к испытаниям новой комбинированной СУ для высокоскоростных ЛА // Обозрение. Серия «Авиационное двигателестроение»: по материалам иностранных публикаций / ЦИАМ. 2021. № 7. С. 4–6.
 17. Полет на сверхзвуковом Ту-144: воспоминания пассажира рейса 499/500 / Пассажир Ту-144 // Авиафорум. URL: <https://aviaforum.ru/threads/poljot-na-sverxzvukovom-tu-144-vozpominanija-passazhira-rejsa-499-500.43396> (дата обращения: 15.12.2021). Дата публ.: 26.06.2016.

References

1. Obzor NIOKR po sozdaniiu sverkh- i giperzvukovykh passazhirskikh samoletov novogo pokoleniia (ES – Iaponiia – SShA) [Review of R&D projects dedicated to creation of super- and hypersonic passenger aircraft of a new generation (EU – Japan – USA)]. Aviatsonnaia i raketnaia tekhnika : ekspress-informatsiia po materialam inostrannoi pečati [Aviation and rocket technology: express information on foreign press]. TsAGI, 2011. No. 26. Source materials: Air International. 2011. No. 1. P. 98–99; www.reactionengines.co.uk, 22/IV 2011; www.transeum.com, 2/V 2011.
2. Serre L., Defoort S. Lapcat-II: towards a Mach 8 civil aircraft concept, using advanced Rocket/Dual-mode ramjet propulsion system. 2009. (16th AIAA/DLR/DGLR International Space Planes and Hypersonic Systems and Technologies Conference : 19–22 October 2009, Bremen, Germany ; AIAA 2009-7328).
3. Steelant J. Sustained hypersonic flight in Europe: first technology achievements within LAPCAT II. 2011. (17th AIAA International Space Planes and Hypersonic Systems and Technologies Conference : 11–14 April 2011, San Francisco, California ; AIAA 2011-2243).
4. Preliminary numerical analysis of the LAPCAT MR2 vehicle configuration at Mach 8 cruise conditions / P. Roncioni, L. Cutrone, F. Battista, M. Marini, J. Steelant. 2011. 8 p. (4th European Conference for Aerospace Sciences (EUCASS) : Saint Petersburg, 4–8 June 2011).
5. LAPCAT-II: conceptual design of a Mach 8 TBCC civil aircraft, enforced by full Navier – Stokes 3D nose-to-tail computation / S. Defoort, M. Ferrier, L. Serre, D. Scherrer, C. Paridaens, P. Hendrick and A. Ingenito, C. Bruno. 2011. (17th AIAA International Space Planes and Hypersonic Systems and Technologies Conference : 11–14 April 2011, San Francisco, California ; AIAA 2011-2317).
6. Kontseptual'noe proektirovanie sredstv spaseniia dlia giperzvukovogo suborbital'nogo GLA “SpeisLiner” [Conceptual design of survival equipment for hypersonic suborbital passenger transport “SpaceLiner”]. Aviatsonnaia i raketnaia tekhnika : ekspress-informatsiia po materialam inostrannoi pečati [Aviation and rocket technology: express information on foreign press]. TsAGI, 2016. No. 29. Source materials: Aviation Week & Space Technology, 23/XI – 06/XII 2015, P. 32–33.
7. Boeing predstavila kontsept giperzvukovogo passazhirskogo samoleta [Boeing presented the concept of a hypersonic passenger aircraft]. Obzrenie. Seriia “Aviatsonnoe dvigatelestroenie”: po materialam inostrannykh publikatsii [Review. Series “Aviation engine development”: based on foreign publications]. CIAM, 2018. No. 29. P. 5–8.
8. Shliakotin V.E., Shikhman Iu.M. O vybore maksimal'nykh znachenii chisla Makha poleta vysokoskorostnogo passazhirskogo samoleta [Selection of maximum values of the flight Mach number for a high-speed passenger aircraft]. Osnovnye rezul'taty nauchno-tekhnicheskoi deiatel'nosti TsIAM (2017 g.) [The main results of scientific and technological activities in CIAM (2017)] under the general editorship of M.V. Gordin, A.I. Lanshin, M.Ya. Ivanov. Moscow: CIAM, 2018. P. 66–69.
9. Rabinovich B.A. Bezopasnost' cheloveka pri uskoreniiax: (biomekhanicheskii analiz) [Human safety under accelerations: (biomechanical analysis)]. Moscow: Kniga i biznes [Book and Business], 2007. 208 p.
10. Alekseev S.M., Usmanskii S.P. Vysotnye i kosmicheskie skafandry [High-altitude and space suits]. Moscow: Mashinostroenie [Mechanical Engineering], 1973. 280 p.
11. Giordani A. The challenges of building a hypersonic airliner // BBC. URL: <https://www.bbc.com/future/article/20150914-the-challenges-of-building-a-hypersonic-airliner>. Publ. date: 15.09.2015.
12. Tu-144 (“044”) : sverkhzvukovoi passazhirskii samolet, OKB A.N. Tupoleva [Tu-144 (“044”): supersonic passenger aircraft, Tupolev Design Bureau]. Aviabaza [Airbase]: the website. The “Hangar” section. URL: <http://airbase.ru/sb/russia/tupolev/144/> (accessed 15.12.2021).
13. Lockheed Hypersonic Transport Configuration // Interavia Air Letter : World aviation, space and electronics day by day. 1977. No. 8878 (November 8). P. 5.
14. Bystree zvuka: proekty sverkhzvukovykh samoletov budushchego [Faster than Sound: future supersonic aircraft projects]. Naked Science Editorial Board. Naked Science. URL: <https://naked-science.ru/article/top/bystree-zvuka-proekty-sverkhzv> (accessed 15.12.2021). Date of publication: 04.04.2016.

-
15. Hermeus : site / Hermeus Corp. URL: <http://www.hermeus.com> (accessed 15.12.2021).
 16. Kompaniia Hermeus gotovitsia k ispytaniiam novoi kombinirovannoi SU dlia vysokoskorostnykh LA [Hermeus is getting ready to test a new combined propulsion unit for a high-speed aircraft]. Obozrenie. Seriia “Aviatsionnoe dvigatelestroenie”: po materialam inostrannykh publikatsii [Review. Series “Aviation engine development”: based on foreign publications]. CIAM, 2021. No. 7. P. 4–6.
 17. Polet na sverkhzvukovom Tu-144: vospominaniia passazhira reisa 499/500. Passazhir Tu-144 [Flying on a supersonic Tu-144: recollections of the flight 499/500 passenger. Tu-144 Passenger]. Aviaforum [Aviation forum.]. URL: <https://aviaforum.ru/threads/poljot-na-sverxzvukovom-tu-144-vospominaniya-passazhira-rejsa-499-500.43396> (accessed 15.12.2021). Date of publication: 26.06.2016.

Материалы получены редакцией 11.04.2022