



Рис. 1. Низкочастотный спектр шума до и после модернизации кабины и салона авиалайнера

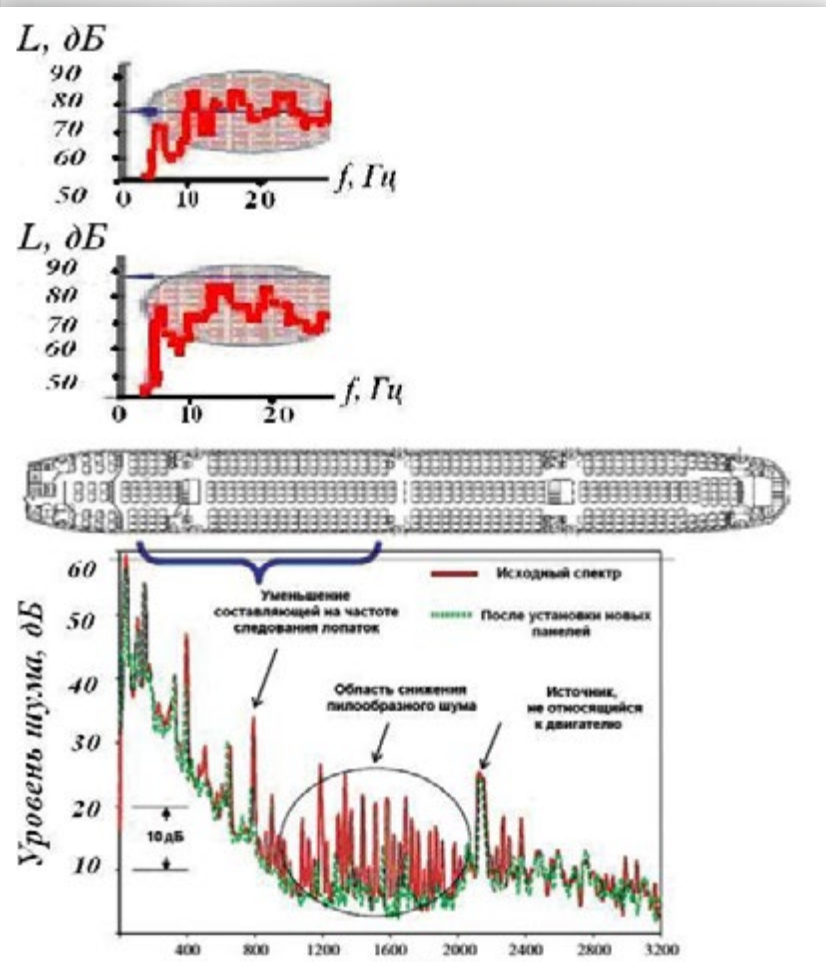
ЗАЩИТА ЧЕЛОВЕКА ОТ ИНФРАЗВУКА В СОВРЕМЕННОЙ АВИАЦИИ

БИОФИЗИЧЕСКИЕ И ПАТОФИЗИОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПРОФИЛАКТИКИ



Сергей ФИЛИПЕНКОВ,
редактор журнала
«Авиапанорама», кандидат
медицинских наук, доцент

В спектре авиационного шума при применении в современных двигательных установках турбовентиляторных двигателей с лопатками большого радиуса обязательно присутствует инфразвук (ИЗ) частотой менее 16 Гц. Он оказывает виброакустическое воздействие как на членов экипажа в кабине и на инженерно-технический состав, обеспечивающий полёты, так и на пассажиров. Профилактика воздействия инфразвука на человека начинает становиться актуальной проблемой современной авиации.



Уровень звукового давления (УЗД) в кабинах летательных аппаратов колеблется от 60 до 106 дБ с максимумом спектра в области инфразвуковых частот или в области средних частот звукового диапазона. УЗД на местах специалистов обслуживания в инфразвуковой полосе частот может составить 95–115 дБ, что на 10–25 дБ превышает предельно допустимый уровень (ПДУ), равный 85 дБ. По гигиеническим критериям оценки вредности и опасности производства это соответствует вредному классу условий труда (Р 2.2.2006–05, СН 2.2.4/2.1.8.583–96).

Анализ заболеваемости лётного состава показал, что, начиная с 1990-х и до 2010-х годов происходит постепенное повышение частоты целого ряда специфических заболеваний органов слуха и глаз, а также неспецифическое увеличение общей заболеваемости с учащением болезней сердечно-сосудистой (с 3% до 11%), нервной (с 4% до 6,5%) и пищеварительной систем (с 7% до 11%). Обслуживающий инженерно-технический состав (ИТС) также имеет значимое повышение заболеваемости органов дыхания с 29% до 41%, глаз

с 1% до 2%, кожи с 3% до 6,5%, что в настоящее время объясняется прямым воздействием инфразвука на организм (И. М. Жданыко, В. Н. Зинкин, С. К. Солдатов, 2014; С. К. Солдатов, В. Н. Зинкин, А. А. Ворона и др., 2005; I. Bukhtiyarov, S. Soldatov, V. Zinkin, V. Filatov, 2010). Кроме того, по данным зарубежных авторов I. P. German (2007); H.E. von Gierke, Ch.W. Nixon, J. C. Guingard (1975), интенсивный ИЗ по причине колебаний различных органов и всего тела на резонансных частотах вызывает у человека панику, позывы на мочеиспускание на частотах 10–16 Гц и позывы на дефекацию при 0,5–16 Гц, а также сильные боли в груди при 5–7 Гц, затруднения и болезненность дыхания при меньших частотах в 1–3 Гц. Болевые ощущения в области головы и нарушение разборчивости речи возникают при частотах 13–20 Гц, боли в области челюсти при 6–8 Гц и боли в области живота при 4,5–10 Гц. Известно, что резонансные колебания достигают высокого энергетического уровня только на стартовых позициях при пусках ракет-носителей тяжёлого и сверхтяжёлого класса, а также на морских судах в сильных штормах, на авианосцах и на тяжёлых авианесущих кораблях при взлете с их палубы на форсированном режиме двигательных установок.

К нашему счастью, в авиации столь интенсивные виброакустические воздействия не встречаются в силу малой размерности лопаток ТВРД и умеренной энергетической мощности двигательных установок летательных аппаратов. Для современных аппаратов гражданского назначения (среднемагистральных авиалайнеров) наиболее актуальной является задача создания комфортного виброакустического климата в кабине с целью защиты пассажиров во время дальних перелётов от утомления и проявлений агрессии, которая вполне может быть следствием ИЗ-компоненты.

В качестве примера на рис. 2 представлены уровни звукового давления, характерные для виброакустического воздействия ИЗ-диапазона в кабине летательных аппаратов типа вертолёта Ми-8, транспортного самолёта Ан-72, бомбардировщика Су-24 и модернизированного пассажирского авиалайнера Ту-204СМ (И. В. Бухтияров, С. К. Солдатов, В. Н. Зинкин, В. Н. Филатов, 2010; В. С. Бакланов, В. Д. Мокеев, С. Н. Филипенков, 2013).

Исследования резонансных колебаний у человека связывают влияние ИЗ с реакцией механорецепторов кожного покрова, мышц, сухожилий, связок на деформацию тканей. Реакция человека на резонансные колебания

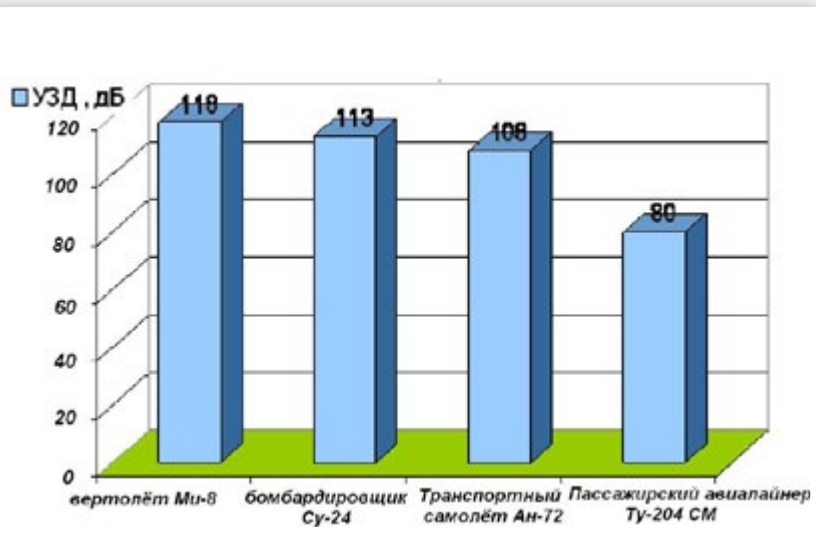


Рис. 2. Уровень звукового давления в инфразвуковом диапазоне для различных типов летательных аппаратов.

в значительной степени определяется следующими биофизическими факторами: размер тела, его строение, поза, степень напряжения мускулатуры, наличие ремней фиксации и других ограничений подвижности, а также динамическим взаимодействием между телом и упругими опорами, такими как мягкие спинки, сиденья, ложементы кресел, индивидуальные средства защиты (ИСЗ). Резонанс выявляется прямыми измерениями механического импеданса и расчётом передаточных функций органов и всего тела человека, а также оценивается субъективно по ощущениям.

Установлено, что максимальные моды резонансных колебаний тела стоящего или сидящего человека по продольной оси тела имеют место на ИЗ-частотах 4–5 Гц. Эти моды связаны с колебаниями трёх крупных анатомических подсистем, а именно: трахеи и лёгких; желудочно-кишечного тракта и органов брюшной полости; мышц и костей плечевого пояса (если последние не фиксированы привязной системой). По этой причине на стартовых позициях используются средства индивидуальной защиты обслуживающего персонала в виде специальных шумозащитных костюмов пневматического типа. В условиях обслуживания наиболее энерговооруженных летательных аппаратов военной авиации, а именно истребителей, для защиты от ИЗ-компоненты виброакустического воздействия вполне достаточно применения наушников и защитных шлемов специальной конструкции, а также высотно-компенсирующих костюмов у членов экипажа и жилетов у обслуживающего инженерно технического персонала так, как это показано на рис. 3.

В табл. 1 обобщены данные зарубежных исследований, проведенных с участием международной организации по стандартизации (ISO), а в табл. 2 даётся детальное описание явлений дискомфорта ответных реакций организма и патологических симптомов, возникающих в случае, когда частота колебаний совпадает с собственной резонансной частотой части тела или органа.

Второй по значимости резонанс возникает на частотах около 12 Гц. Он связан с осевым сжатием груди и определяется эластическими свойствами грудной клетки, позвоночника и межрёберных мышц. Низкоамплитудные резонансные колебания головы и более мелких анатомических структур (головного и спинного мозга, сердца и его сумки) вызываются вибрацией на околозвуковых ИЗ-частотах, которые достаточно часто встречаются также на современных пассажирских авиалайнерах.



Рис. 3. Современные противозумные средства индивидуальной защиты включают в себя:

- а) пневматический костюм для общей защиты организма от интенсивного шума и УЗД для ИЗ > 120 дБ на стартовых позициях сверхтяжёлых ракет-носителей;
- б) противозумные наушники и жилеты инженерно-технического персонала ТАКР при $85 < \text{УЗД ИЗ} < 100$ дБ;
- в) шлемофоны с противозумными прокладками для члена экипажа транспортного самолёта,
- г) наушники со специальными противозумными прокладками для ИТС;
- д) противозумные прокладки обтюра защитного шлема в сочетании с наушниками со специальными противозумными прокладками внутри шлема для члена экипажа

Таблица 1

Резонансные частоты различных частей тела человека
 Guide for the evaluation of Human Exposure to Whole Body Vibration ISO 2631-1978(E). Geneva.: ISO, 1978

Компоненты тела	Резонансная частота, Гц	Компоненты тела	Резонансная частота, Гц
<u>Все тело</u>		<u>Движение конечностей</u>	3–4
стоя в напряжении	6 и 11–12	<u>Кисть</u>	1–3
стоя расслабленно,	4–5		30–40
в поперечном направлении	2	<u>Грудная клетка</u>	3,5
сидя	5–6	Стенка грудной клетки	60
Голова	20–30	<u>Передняя часть грудной клетки</u>	7–11
<u>Голова, сидя</u>	2–8	<u>Позвоночный столб</u>	8
Глазное яблоко	40–60	<u>Торако-абдоминальные органы,</u>	7–8
Барабанная перепонка	1000	полулежа	
<u>Голова/плечи</u>		<u>Брюшная полость (в целом)</u>	4–8
стоя	5 и 12	стенка	5–8
сидя	4–5	органы	3–3,5
<u>Плечи/голова, поперечное ребро</u>	2–3	<u>Тазовая область, полулежа</u>	8
<u>Туловище</u>	3–5	<u>Бедро</u>	
<u>Плечевой пояс</u>		стоя	4
стоя	4–6	сидя	2–8
сидя	4	<u>Стопа, сидя</u>	<10

Таблица 2

Значимость частот вибрации, при которой возникают симптомы дискомфорта

Симптом	Частота, Гц	Симптом	Частота, Гц
Болезнь движения	0,1–0,63	Влияние на речь	13–20
Боль в области живота	3–10	"Кусок в горле"	12–16
Боль в грудной клетке	3–9	Позывы к мочеиспусканию	10–18
Общий дискомфорт	1–50	Влияние на дыхание	4–8
Недомогание	4–8	Мышечные сокращения	4–9
Скелетно-мышечный дискомфорт	3–8	Боль в яичниках	10
Головные симптомы	13–20	Одышка	1–4
Симптомы нижней челюсти	6–8		

Rasmussen G. Human body vibration exposure and its measurement: Technical review. Marlboro MA.: Bruel&Kjaer Instrument, Inc., 1982

В случае боковых и поперечных по направлению вибраций резонанс у сидящего в кресле пассажира оказывается в иной моде с резонансной частотой 1–2 Гц, которая определяется индивидуальной гибкостью организма и фиксацией тела человека в кресле привязной системой.

Боковые и поперечные вибрации, как правило, вызывают исключительно чувство психологического дискомфорта во всём дозвуковом диапазоне частот акустических колебаний, в отличие от вибрации в направлении по продольной оси тела, которая вызывает более серьёз-

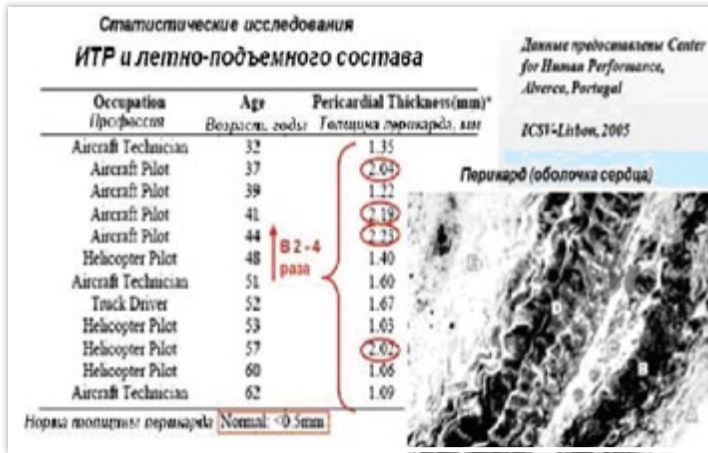


Рис. 4. Статистика изменений толщины стенки перикарда по данным УЗИ у аэродромного инженерно-технического состава, пилотов лайнеров и вертолётов в зависимости от возраста и профессиональной деятельности

ные расстройства в организме человека. Влияние направления таких вибраций на реакции организма всё ещё продолжает исследоваться с целью нормирования воздействия.

В полёте военный лётчик может подвергаться виброакустическому воздействию в ИЗ-диапазоне одновременно с действием перегрузок от линейного ускорения при маневрировании. Измерением импеданса тела во время такого сочетанного воздействия продольных вибраций с частотой в диапазоне 2,5–20 Гц и характерных для маневренных летательных аппаратов продольных перегрузках в направлении «голова-таз» Н. С. Vukukal (1968) обнаружил наличие сжимающих и уплотняющих тело сил при выполнении лётчиком противоперегрузочного приёма мышечного напряжения уже при небольшой величине перегрузки до +4 единиц, а также при больших её величинах, когда срабатывает автомат давления и происходит обжатие нижней половины тела противоперегрузочным костюмом. Маневрирование сопровождалось повышением резонансных частот и появлением новых резонансов, что сильно понижало переносимость вибрации при перегрузках на фоне шумов в околосвуковом диапазоне от работающего в форсированном режиме двигателя. При этом, виброакустические воздействия большой мощности возбуждают ИЗ-резонансные колебания всех органов тела человека, вызывая накапливающийся в процессе профессиональной деятельности лётного состава кумулятивный патофизиологический эффект. Последнее приводит к достоверному снижению на 10–15 лет профессионального долголетия лётчиков-истребителей по сравнению с пилотами гражданских авиалайнеров.

Максимальным по амплитуде резонансным колебаниям, как правило, подвержены крупные органы грудной и брюшной полости. Регулярное и длительное воздействие инфразвука с УЗД величиной 85 дБ на лётный состав ВВС и экипажи авиалайнеров при их профессиональной деятельности приводит к профессиональной патологии. Ранними её предвестниками являются утолщение стенки перикарда (рис. 4), а также выраженная вариабельность сердечного ритма. Например, у пилотов гражданских авиалиний, регулярно летавших на современных воздушных судах производства Boeing и Airbus на протяжении их профессиональной карьеры, португальские врачи А. А. Nuno, С. Branco и М. Alves-Pereira (2005) обнаружили при ежегодном ультразвуковом исследовании достоверное утолщение стенки перикарда и заполнение самой полости сердечной сумки соединительной тканью так, как это представлено на рис. 4.

В процессе многолетней деятельности под воздействием ИЗ кабины у лётного состава страдает иммунитет, повреждаются лимфоузлы и остальные органы иммунной системы, в которых сосредоточены Т-лимфоциты, отвечающие за сохранение памяти о чужеродных антигенах. Именно этот механизм приводит к частым респираторным заболеваниям лётчиков военной авиации и обслуживающего ИТС. При хронической стресс-реакции на ИЗ развиваются заболевания дыхания, пищеварения, сердечно-сосудистой и нервной систем, возникает нейросенсорная тугоухость, а с возрастом снижается острота зрения. Всё перечисленное неизбежно приводит к отстранению от полётов как гражданских пилотов, так и военных лётчиков. Полиmodalность воздействия на различные органы приводит к тому, что ИЗ способствует запуску биохимических и нейроэндокринных механизмов, формирующих неспецифическую стресс-реакцию. Разнообразные изменения обменных процессов на уровне клеток приводят к метаболическим изменениям на уровне целостного организма, в том числе в крови и моче. Происходит мгновенный выброс в кровь гормонов надпочечников, щитовидной железы и иных эндокринных желез (например, гипофиза), повышается активность ферментов, проницаемость клеточных мембран, что сопровождается увеличением в крови концентрации катехоламинов, кортикостероидов, повышением сахара, дисбалансом магния, натрия, калия и кальция. Интенсивный и длительно действующий ИЗ вызывает отставленную (на несколько часов) неспецифическую стресс-реакцию в последствии по окончании полётов.

Более того, хроническое отклонение от нормы показателей активности регуляторных систем организма под действием ИЗ значительно повышает риск сердечно-сосудистой патологии. Согласно нашим исследованиям, проведенным в ЛИИ им. М. М. Громова (С. Н. Филипенков, Л. Г. Елкина, 2007; С. Н. Филипенков, Е. И. Юдина, 2008), статистический анализ сердечного ритма с использованием показателя «ПАРС» Р. М. Баевского может служить достоверным прогностическим инструментом для коррекции функционального состояния лётчиков и пилотов с целью повышения их профессионального долголетия. Достаточно сравнить изменения «ПАРС» до и после полёта, чтобы сделать вывод о необходимости коррекции режима труда/отдыха для улучшения функционального состояния организма и проведения восстановительных или реабилитационных мероприятий профилактического санаторно-курортного характера (рис. 5).

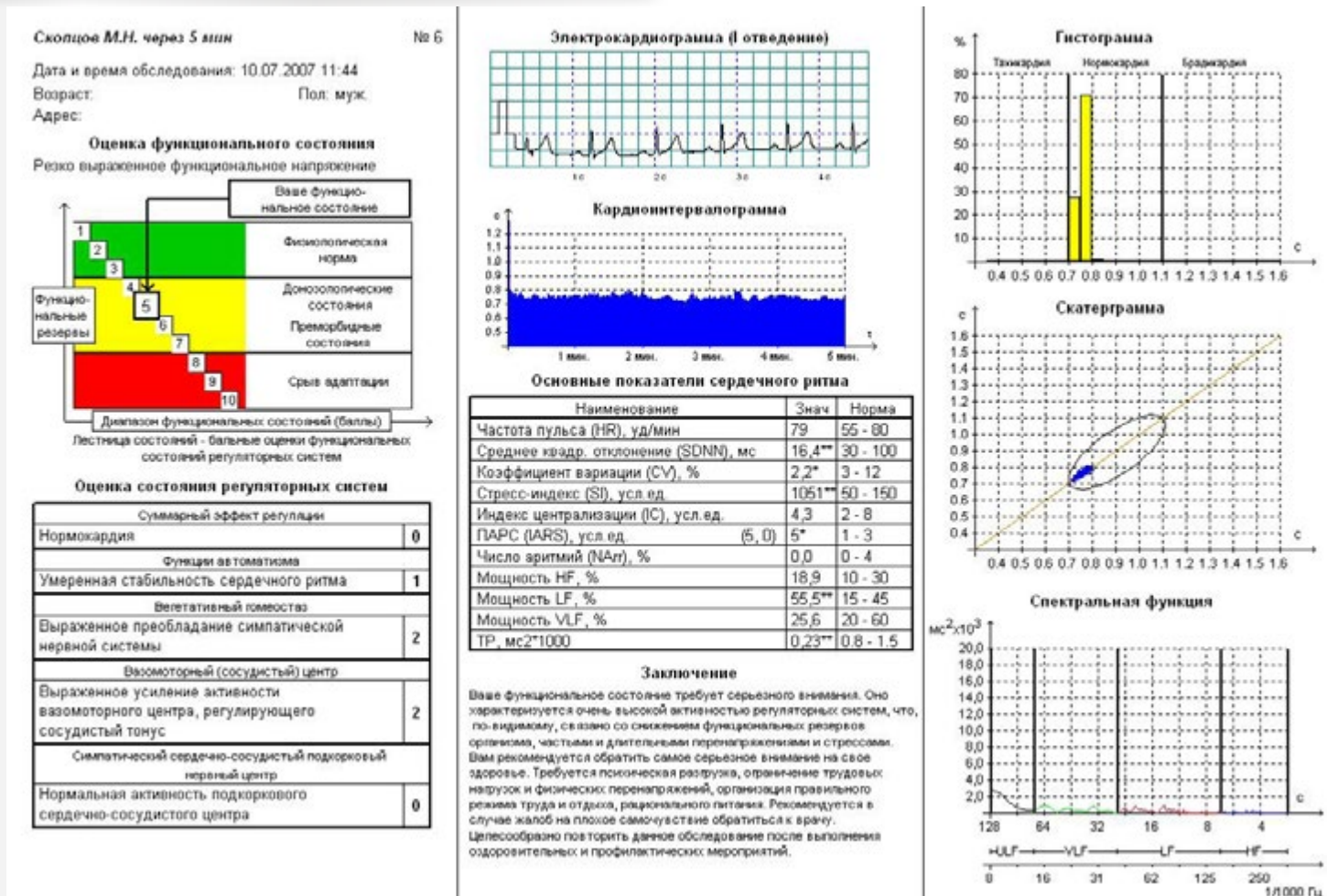


Рис. 5. Вариабельность сердечного ритма и показатель активности регуляторных систем по Р. М. Баевскому у пилота перед полётом и через 10 минут после испытательного полёта на летающей лаборатории выросли с 2 до 5 баллов, а состояние после полёта изменилось от физиологической нормы до срыва адаптации, требующего проведения восстановительно-реабилитационных процедур

Таблица 2

Частоты вибрации, значимые для работоспособности, человека

Вид деятельности	Частотный диапазон, Гц	Вид деятельности	Частотный диапазон, Гц
Равновесие	30–300	<u>Считывание приборных ошибок</u>	5, 6–11,2
Осязание	30–300	<u>Ручное управление</u>	3–8
<u>Речь</u>	1–20	Восприятие глубины	25–40, 60–40
<u>Перемещение головы</u>	6–8	Удержание рукоятки управления	200–240
<u>Чтение</u>	1–50	<u>Визуальные задания</u>	9–50
<u>Слежение</u>	1–30		

Man-Systems Integration Standards. Vol. 1, Rev. A NASA-STD-3000. Johnson Space Center, Houston, TX. NASA. 1989. PP. 5-40, 5-53, 5-56

Исследования работоспособности в условиях комбинированного воздействия акустических ИЗ-колебаний в сочетании с ИЗ-вибрацией позволили дать заключение о том, что по степени комфортности оператор оценивает одновременное действие шума и вибрации в целом, но не может разделить их вклад. На этом основании уместно определять по ощущениям человека только итоговый виброакустический климат кабины (подробнее см. статью В. С. Бакланова в журнале «Авиапанорама» № 3, 2013 г.).

Обобщённые данные о влиянии различных резонансных частот колебаний на работоспособность, продуктивность, эффективность выполнения операторских задач представлены в табл. 3.

Длительные низкочастотные колебания малой и средней амплитуды на частоте в 1–2 Гц вызывают всем хорошо известный по железнодорожному движению усыпляющий эффект. Комбинация слышимого шума и ИЗ с вибрациями в широком спектре частот, характерных для транспортной и гражданской авиации, обычно приводит к сонливости.

Умеренный по энергетическому уровню ИЗ сопровождается чувством дискомфорта от сдавливания головы или головной боли и вызывает психические расстройства, связанные с нарушением скорости мышления или режима сна/бодрствования, что достоверно ухудшает операторскую деятельность.

При длительном и регулярном воздействии ИЗ средней интенсивности неизбежно развивается утомление после рабочей смены и возникает предрасположенность к самым различным заболеваниям, прежде всего, сердечно-сосудистым нарушениям преходящего характера.

Только высокоамплитудные вибрации в том же ИЗ-диапазоне вызывают обратный возбуждающий или даже панический эффект, поскольку даже кратковременная экспозиция ИЗ высоких энергетических уровней вызывает нарушения артериального и мозгового кровообращения и увеличивает перистальтику (частоту сокращения) гладких мышц, что приводит к расстройствам функций желудка, кишечника и мочевого пузыря.

Механизм привыкания к ИЗ ещё недостаточно изучен в аэроакустике, но именно он обеспечивает адаптацию и тренированность организма при неизменных параметрах вибрационного процесса малой и средней интенсивности (например, слабые и средние по энергетическому уровню виброакустические воздействия от работы двигателя самолёта на крейсерском режиме полёта).

Снижение работоспособности под влиянием низкого уровня ИЗ-вибрации проявляется, прежде всего, в смещении зрительных ориентиров относительно колеблющегося тела человека, что сильно сказывается на работе с дисплеями и мониторами или при чтении текста, когда информация становит-

ся нечитаемой и смазывается любой зрительный образ. Более того, нарушается точность движений при выполнении заданий, требующих тонкой координации, что снижает скорость выполнения рабочих операций и требует дополнительного сосредоточения оператора.

Сочетание действия шума и вибрации, характерное для летательных аппаратов самого различного назначения, вызывает синергетический отрицательный эффект на основные функции организма. Уменьшение только одной интенсивности вибрации не сказывается на субъективной оценке перехода от дискомфорта к комфорту. В то же время J. D. Leatherwood, S. A. Clevenson, D. D. Hollenbaugh (1984) показали в своём техническом докладе NASA TP-2261, что в условиях, когда сопровождающий ИЗ-вибрацию звуковой шум имеет минимальные уровни, сама переносимость виброускорений членами экипажей значимо повышается и улучшается самочувствие. Особенно это заметно на вертолётах.

Таким образом, нуждающиеся в профилактических мероприятиях с применением ИСЗ реакции организма на воздействие ИЗ можно условно разделить на следующие три группы:

— Первая группа реакций возникает в ответ на смещение и деформацию органов и тканей при низкочастотных колебаниях. Эти реакции имеют функциональную зависимость от частоты колебаний и связаны с резонансом органов и всего тела. Механическая вибрация на резонансных частотах воспринимается чувствительными механорецепторами периферической нервной системы, сосредоточенными в кожных покровах, в различных тканевых структурах мышц, сухожилий, суставов и во внутренних органах (исключая только головной мозг). Механорецепторы тканей различаются по полосе пропускания пакетов нервных импульсов, имеют различный характер суммации импульсов и различные биохимические нейромедиаторы. Необходимо ношение защитных шлемов, масок, наушников с противозумными прокладками и пневматических жилетов, облегчающих тело.

— Вторая группа включает стресс-реакции организма общего характера, т.е. неспецифические биохимические, иммунологические и психофизи-

ологические реакции на ИЗ как на любой другой внешний стресс-фактор. Они не зависят от частоты колебаний и вызывают однотипный ответ, связанный с общей тяжестью или мощностью акустического или вибрационного воздействия с возможным накоплением, т.е. кумулятивными эффектами в последствии. При длительном действии ИЗ малой интенсивности и небольших уровнях передачи энергии резонирующим органам в результате происходит расстройство функций целого ряда систем, а именно: сердечно-сосудистой системы, мочевыделительной системы, скелетно-мышечной системы, опорно-двигательного аппарата, нейросенсорной и центральной нервной системы. Возникает общее ощущение усталости, возможна бессонница, головная боль, дрожь и тремор конечностей, радикулит в поясничных отделах позвоночника (ишемический люмбаго). Необходим полноценный послеполётный отдых в течение 2–3 суток для восстановления функциональных резервов организма, а при хронических расстройствах необходимо реабилитационное санаторно-курортное лечение.

— Третья группа реакций возникает от локальных ИЗ-колебаний структур головного мозга и глаз. В результате нарушается кровоснабжение сетчатки, появляются иллюзии или видения. Даже при небольших энергетических уровнях ИЗ-колебаний вибрации сильно влияют на выполнение любых операторских задач по причине затруднения зрительного восприятия, обработки информации и нарушения точности координации движений рук. Меньше всего подвергаются воздействию ИЗ органы слуха, но и в них при достаточно высокой интенсивности ИЗ-компоненты и постоянном воздействии вибраций или шумов ИЗ диапазона в течение нескольких лет механически разрушаются реснички рецепторов Кортиева органа, что ведёт к нейросенсорной тугоухости. В соответствии с гигиеническими требованиями, необходимо снижение уровня звукового давления инфразвука на рабочих местах в соответствии с Р 2.2.2006–05 «Гигиенические критерии оценки условий труда по показателям вредности и опасности факторов трудового процесса» или СН 2.2.4/2.1.8.583–1996 «Инфразвук на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории жилой застройки».