

УДК 534.836; 534.831:613.164

ПРОЛЕТНЫЙ ШУМ САМОЛЕТОВ И СУБЪЕКТИВНАЯ ОЦЕНКА ЕГО БЕСПОКОЯЩЕГО ДЕЙСТВИЯ

М. И. Некипелов

Приводятся результаты экспериментального исследования характеристик взлетного шума турбореактивного самолета Ту-104 в дальнем звуковом поле. Показано, что спектр пролетного шума на местности изменяется в соответствии с эффектом Доплера. Дана характеристика влияния продолжительности шума, числа пролетов и плотности населения на субъективную оценку беспокоящего действия шума. Приведен метод расчета поправки на продолжительность воздействия шума к уровню воспринимаемого шума.

Шум при полете самолетов распространяется на значительные расстояния, причиняя беспокойство населению. Пролетному шуму посвящены многочисленные исследования [1—5]. Было показано, что под трассой полета наиболее «шумных» самолетов Ту-104 и Ту-114 зона зашумленности территории с наименьшим уровнем 75 дБ (А) в направлении взлета от места старта соответственно достигает 43 и 57,5 км [6].

До сих пор, однако, не изучен достаточно подробно вопрос о закономерностях изменения уровней, частотных спектров и продолжительности воздействия пролетного шума на население, проживающее на разном удалении от аэропорта. В связи с этим было указано [7], что методы расчета уровней воспринимаемого шума нуждаются в тщательной проверке и уточнении их на реальном пролетном шуме в натуральных условиях.

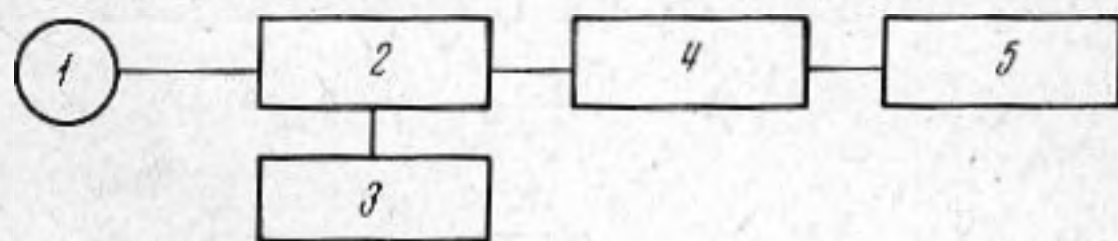
Необходимо отметить, что при пролете самолета над населенными пунктами частота звука в соответствии с эффектом Доплера изменяется в отношении $f = f_0 \cdot c / (c \pm V)$, где f — измененная частота звука (гц), f_0 — первоначальная частота (гц), c — скорость звука в воздухе (м/сек) и V — скорость движения источника звука (м/сек).

Целью настоящей работы было определение характеристик пролетного шума, излучаемого самолетами на разном удалении от взлетной дорожки, и их влияние на субъективную оценку его интенсивности и раздражающего действия.

Наши экспериментальные исследования производились в 1967—1969 гг. в Иркутском аэропорту и в прилегающих к нему районах под траекторией полета самолета Ту-104 при режимах полета и атмосферных условиях, близких к стандартным, и при отсутствии посторонних источников шума. Акустический тракт удовлетворял рекомендациям 123 МЭК, принятым в 1961 г. Международной электротехнической комиссией.

На фиг. 1 представлена блок-схема использованного нами шумоизмерительного тракта, где 1 — микрофон ДМ-38Ш, 2 — шумомер Ш-63, 3 — самописец Н-110, регистрировавший изменение суммарных уровней шума во времени, 4 — модифицированный магнитофон «Репортер-3» с неравномерностью частотной характеристики $\pm 1,3$ дБ в полосе от 40 гц до 13 кгц, 5 — $1/3$ -октавный спектрометр СЗЧ с диапазоном анализируемых частот 45 гц — 23 кгц. Измерение шума производилось в полосе частот 45 гц — 11,2 кгц.

Метод работы был следующим. Микрофон, соединенный с шумомером длинным кабелем, располагался на высоте 1,5 м от поверхности земли и по шкале прибора регистрировался уровень шумового фона с одновременной его записью на магнитную ленту. Запись анализировалась в лаборатории и по ней определялся частотный спектр шумового фона. При приближении самолета к пункту наблюдения микрофон ориентировался мембраной на источник шума и в тот момент, когда уровень шума увеличивался на 10 дб по отношению к фону, одновременно включались самописец, магнитофон и секундомер. Уровень шума, отмеченный в момент включения этих приборов условно принимался за минимальный. Затем отмечалось время, за которое уровень шума от ус-



Фиг. 1

ловного минимального увеличивался до максимального (в момент пролета воздушного корабля над наблюдателем). По мере удаления самолета регистрировались характеристики спада звукового давления от максимума до уровня шумового фона, поднятого на 10 дб.

Анализ шума проводили в лаборатории, где запись на магнитной ленте воспроизводилась для каждого пролета в виде участка, склеенного в кольцо, причем спектры регистрировались на $1/3$ -октавном анализаторе СЗЧ со скоростью 16 кадр/сек.

В связи с тем, что шум самолетов при полете сопровождается большим количеством разнообразных звуков, маскирующих основной тон, для выявления эффекта Доплера во внимание принимались только те максимальные составляющие спектра, уровень звукового давления на которых не имел резких колебаний за время наблюдения и от минимума до максимума и обратно изменялся плавно. Результаты измерения суммарных и октавных уровней звука для 3—5 аналогичных пролетов усреднялись и по ним строились графики изменения интенсивности и спектра шума во времени.

Изложенные ниже экспериментальные данные являются результатом обобщения материалов исследования пролетного шума 1500 самолетов и анкетного опроса 2260 человек проживающих на разном удалении от аэродрома.

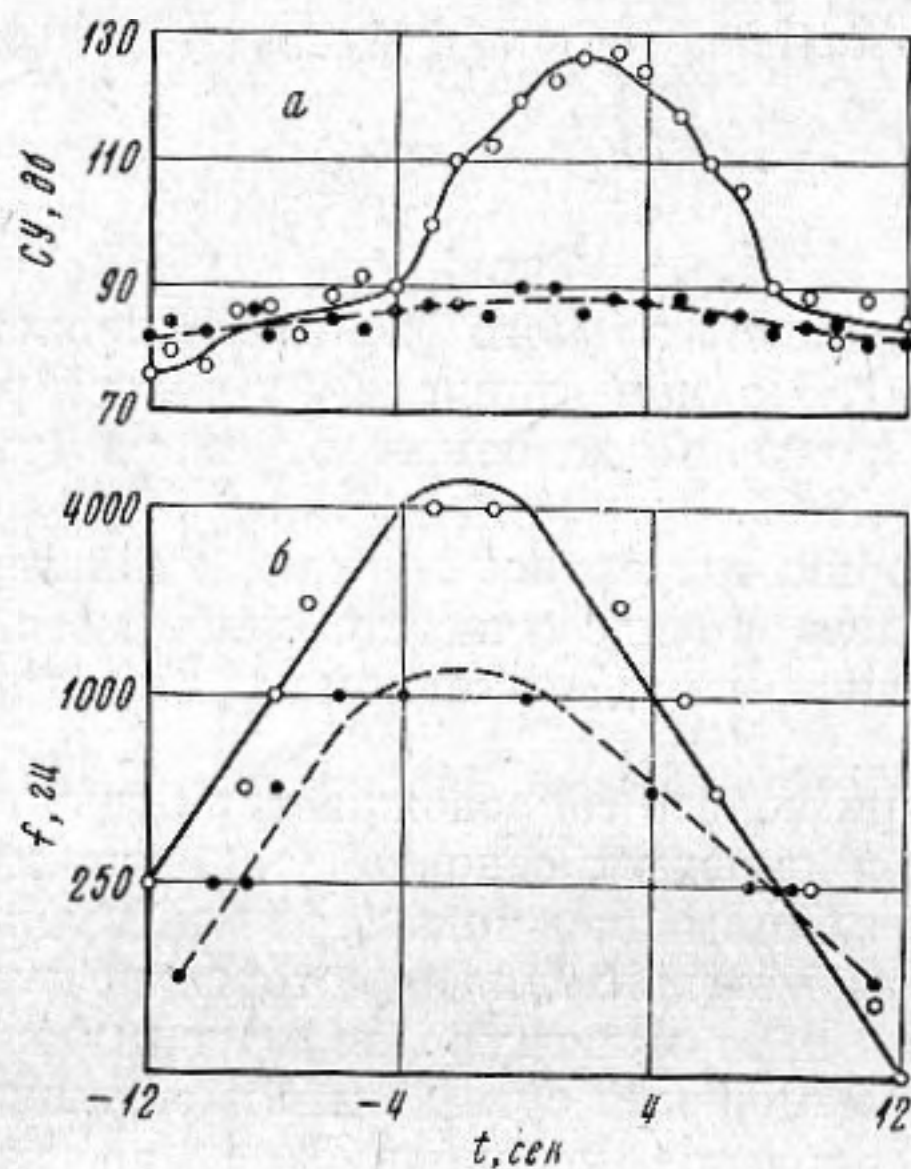
На фиг. 2 представлены усредненные результаты измерения шума при взлете самолета Ту-104 на расстояниях 3,5 и 40 км от начала разбега, где отложены по осям абсцисс время, в секундах, а по осям ординат — суммарные уровни, в децибеллах (2, а) и средние частоты октавных полос, в герцах (2, б). За нулевую отметку времени принято положение самолета в момент пролета над головой наблюдателя. Сплошными линиями обозначены характеристики шума на расстоянии 3,5 км, штриховыми — 40 км от начала разбега самолета.

l, км	Уровни			T _{со.} сек	T _{ш.ф.} сек	l, км	Уровни			T _{со.} сек	T _{ш.ф.} сек
	СУ, дб	РН, дб	дб (А)				СУ, дб	РН, дб	дб (А)		
3,5	125	128	116	12	30	30	87	90	78	—	245
10	104,5	108,5	95,5	16	56	40	85,5	89,5	76,5	—	275
20	93	96	84	19	130						

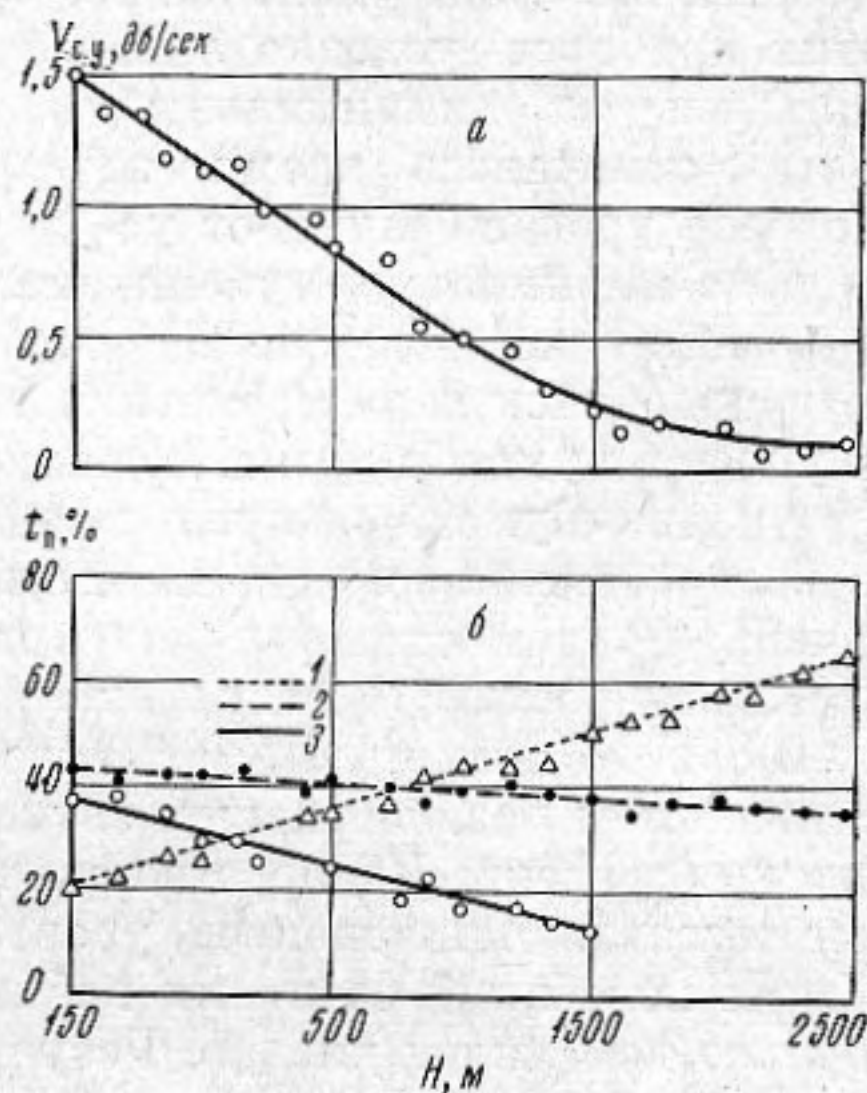
При приближении источника шума к пункту наблюдения, вследствие направленности шума двигателей самолета, должен преобладать высокочастотный звук, излучаемый компрессором. Однако в первые секунды регистрации, благодаря эффекту Доплера и неодинаковому поглощению звука на разных частотах, в спектре обнаруживаются только частотные составляющие в области III—V октав с максимумом звуковой энергии на

низких частотах. С появлением составляющих в VI—VIII октавных полосах спектральный максимум перемещается вначале на средние, а потом на высокие частоты. В тот момент, когда самолет пролетает над наблюдателем, спектр шума становится сплошным и уровни звукового давления достигают максимального значения почти во всех октавных полосах, что обусловлено постепенным увеличением доли звуковой энергии, создаваемой реактивной струей.

При удалении самолета от пункта наблюдения суммарный уровень и спектр определяются в основном шумом реактивной струи. Равномерность



Фиг. 2



Фиг. 3

спектра нарушается из-за быстрого спада звукового давления на высоких частотах, начиная с VIII и кончая VII—VI октавными полосами. При этом спектральный максимум быстро смещается с высоких частот на средние, а с них более медленно — на низкие.

Заслуживает внимания тот факт, что в пункте наблюдения, расположенном вблизи от места старта (3,5 км), шум характеризуется быстрым нарастанием и спадом звукового давления и хорошо выраженным изменением частот во времени, а на значительном удалении от места старта (40 км) эти закономерности становятся слабо выраженными (фиг. 2).

Несмотря на эти различия и характерную направленность шума двигателей самолета, изменения в спектре шума за период пролета, зарегистрированные вблизи (3,5 км) и вдали (40 км) от места старта, подчиняются закону Доплера и выражаются в смещении максимальных составляющих спектра в направлении от низких частот к высоким и обратно.

Быстрота изменения уровней и спектра шума во времени во многом определяют его раздражающее действие. На фиг. 3 представлены данные о влиянии высоты полета (H , м) при взлете самолета Ту-104 на среднюю скорость изменения суммарных уровней шума за период пролета $V_{с.у}$, дБ:сек (3, а), $V_{с.у} = VU_v + (\text{ШФ} + 10) / T_{ш.ф.}$, и на время наличия максимальных составляющих спектров в октавных полосах за период пролета $t_{п}$, в процентах (3, б), где $СУ_v$ — максимальный суммарный уровень пролетного шума, в децибеллах; ШФ — уровень шумового фона, $T_{ш.ф.}$ — время превышения звучания над уровнем шумового фона, в секунду, I — время наличия максимальных составляющих I—III октав относительно суммарного времени наличия $\Sigma t_{п}$ максимальных составляющих во

всех 8-октавных полосах за период пролета, в процентах; 2 и 3 — то же соответственно IV—V и VI—VIII октав, в процентах.

С увеличением высоты средняя скорость изменения суммарного уровня шума на местности за период пролета закономерно уменьшается и достигает минимального значения при $H = 2000—2500$ м, что от начала старта вдоль проекции траектории примерно соответствует расстоянию 28—40 км. При этом суммарное время наличия низкочастотных составляющих спектра увеличивается, среднечастотных — незначительно уменьшается, а высокочастотных — предельно уменьшается при $H = 1500$ м.

Эти данные показывают, что, при прочих равных условиях, характеристики пролетного шума вблизи места старта, по сравнению с таковыми в отдаленных от него пунктах, в субъективном отношении должны расцениваться как наиболее неблагоприятные.

Субъективную реакцию человека на шум принято оценивать критериями громкости, неприятности и приемлемости [8]. Работы последних лет [9—11] показали, что на оценку влияет время воздействия звуковой энергии на человека. Предложено удвоение времени воздействия авиационного шума считать эквивалентным увеличению его уровня на 3 дБ [12]. Вместе с тем рекомендованная фирмой Болт, Беранек и Ньюмен система оценки раздражающего действия шума в PN , дБ [13] не учитывает продолжительности одиночного воздействия и частоту повторяемости шумовых раздражений. Для учета этих факторов необходимо делать поправки к уровням в PN , дБ.

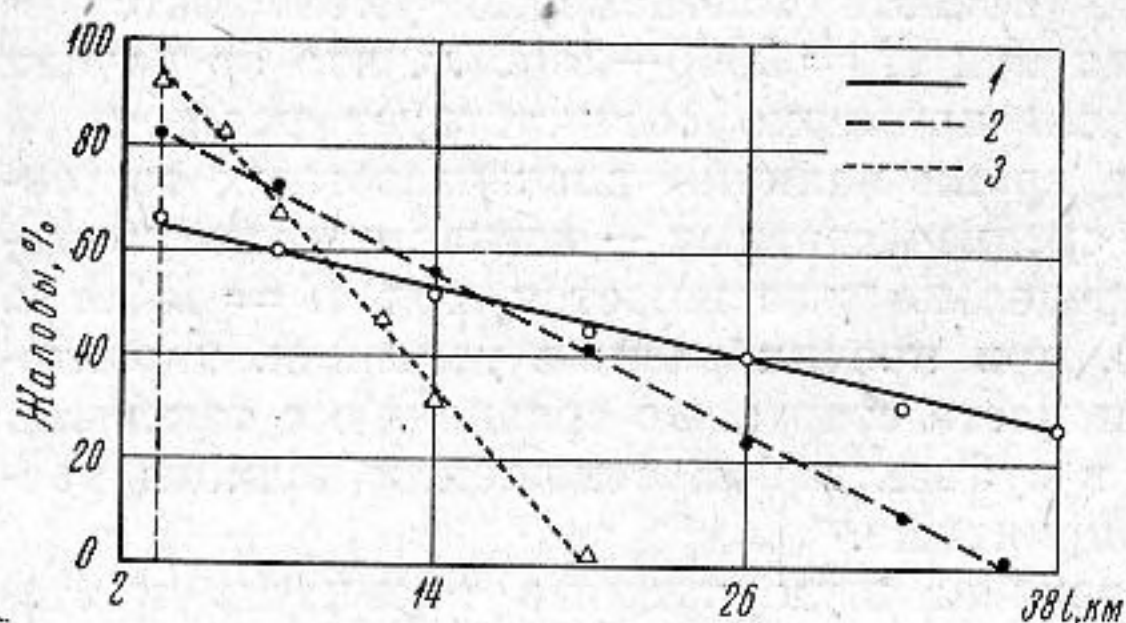
Распространенной мерой продолжительности воздействия самолетного шума является время звучания его верхних 10 дБ (T_{10}) [14]. В связи с тем, что величина T_{10} в силу своей условности не может полностью характеризовать степень раздражения при пролете самолета было предложено [15] принимать за время действия шума время его превышения над уровнями 90 дБ (T_{90}) или 80 дБ (T_{80}). Однако и по этим критериям нельзя в полной мере оценить степень беспокоящего действия шума на население, т. к. эффект раздражения определяется величиной наименьшего превышения мешающего шума над шумовым фоном [16]. Правоммерно, что при одинаковых условиях и одном и том же времени звучания T_{90} на слабом и значительном шумовом фоне эффект раздражения от самолетного шума будет различным. Кроме того, критерий T_{90} характеризует время воздействия интенсивного шума, а продолжительность звучания слабых шумов им не учитывается.

В таблице представлены характеристики шума при взлете самолета Ту-104, где l — удаление от места старта вдоль проекции траектории, в километрах; $СУ$ — средние значения максимальных суммарных уровней, в децибеллах; PN , дБ — средние значения уровней в PN , дБ; $дБ (A)$ — средние значения уровней в дБ (A); T_{90} — средние величины времени превышения шума над условным уровнем 90 дБ/сек, $T_{ш.ф.} = СУ - (ШФ + 10)$ — средние значения превышения минимального суммарного уровня над уровнем шумового фона, поднятым на 10 дБ/сек.

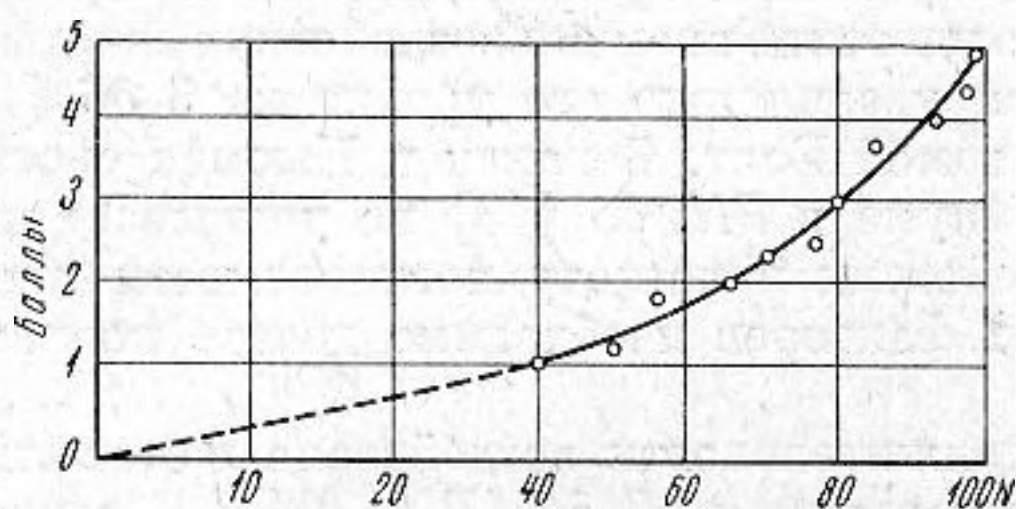
При взлете самолета Ту-104 суммарные уровни шума выше 90 дБ наблюдаются от начала старта до расстояния 20 км вдоль проекции траектории. Дальше этого расстояния интенсивность шума становится ниже и продолжительность его воздействия не учитывается критерием T_{90} . Поэтому наиболее приемлемой для измерения времени наличия как интенсивных, так и слабых шумов является величина $T_{ш.ф.}$

Показателем раздражающего действия шума (его приемлемости) являются жалобы населения. Для выявления реакции населения, проживающего под трассами полета самолетов, на продолжительность воздействия одиночных шумов были проведены специальные исследования. После предварительных натурных измерений характеристик шума в пунктах наблюдения общая продолжительность его воздействия при одиночном пролете была условно подразделена на интервалы времени, каждый из

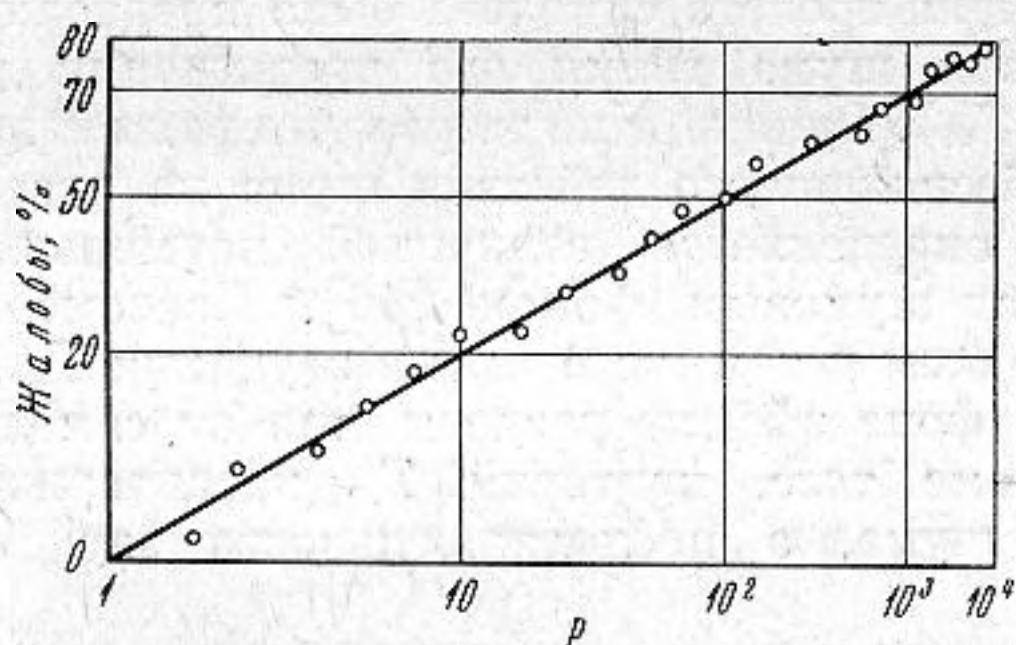
которых строго соответствовал периоду излучения самолетом минимальной (до 80 дб) и максимальной (выше 80 и 90 дб) звуковой энергии. Такая градация времени, на основании измеренных уровней, соответствовала определенному положению самолета по отношению к наблюдателю. Так, при приближении и удалении источника звука, когда расстояние между ним и опрашиваемыми лицами было максимальным, интенсивность шума была низкой и не превышала 80 дб, а в момент пролета над ними уровень звука чрезмерно возрастал и превышал 80 и 90 дб. В анкете для опроса указывалось каждое конкретное положение самолета по отношению к испытуемым лицам: «вдали при приближении», «при пролете над головой» и «вдали при удалении». Оценка продолжительности воздействия минимальных (до 80 дб) и максимальных (выше 80 и 90 дб) уровней одиночного шума производилась по ответу «да — нет» на вопросы: «не привлекает внимания», «приемлема», «близка к приемлемой», «нетерпима».



Фиг. 4



Фиг. 5



Фиг. 6

шума, превышающих шумовой фон; 2 — жалобы на продолжительность воздействия максимальных суммарных уровней шума, превышающих 80 дб; 3 — то же на уровни выше 90 дб.

Из фиг. 4 видно, что наибольший процент жалоб на продолжительность воздействия шума с уровнями выше 80 — 90 дб поступает от населения районов, расположенных под траекторией полета самолета Ту-104 на расстоянии 3,5—14 км от места старта. С увеличением расстояния от взлетно-посадочной площадки число жалоб на интенсивный и кратковременный шум уменьшается, а на малоинтенсивный и продолжительный шум, уровни которого превышают шумовой фон, остается довольно высоким. Это обусловлено тем, что шум, возникающий на слабом шумовом фоне, особенно неприятен и в наибольшей степени раздражает.

На степень раздражения оказывают влияние и такие факторы, как число пролетов за день и плотность населения. Отсутствие разброса взлетных траекторий и прохождение трасс полета преимущественно над одними и теми же населенными пунктами приводит к увеличению общего числа пролетов и накоплению звуковой энергии, воздействующей на население за день. Кроме того, степень беспокойства от шума возрастает с

увеличением плотности населения территорий, подвергающихся озвучиванию.

Раздражающее действие шума в зависимости от этих параметров исследовалось нами путем анкетного опроса лиц, проживающих под трассами полета самолетов в местах с разным числом пролетов за день и разной плотностью населения.

Реакция людей на воздействие шума определялась качественно и количественно. Качественная оценка производилась на основании учета жалоб населения на помеху речевой связи, работе, отдыху и на неприятные субъективные ощущения. Количественная оценка осуществлялась согласно методике, приведенной в работе [17], по категориям: 1 балл — очень тихо, 2 балла — тихо, 3 балла — умеренно шумно, 4 балла — очень шумно и 5 баллов — чрезмерно шумно.

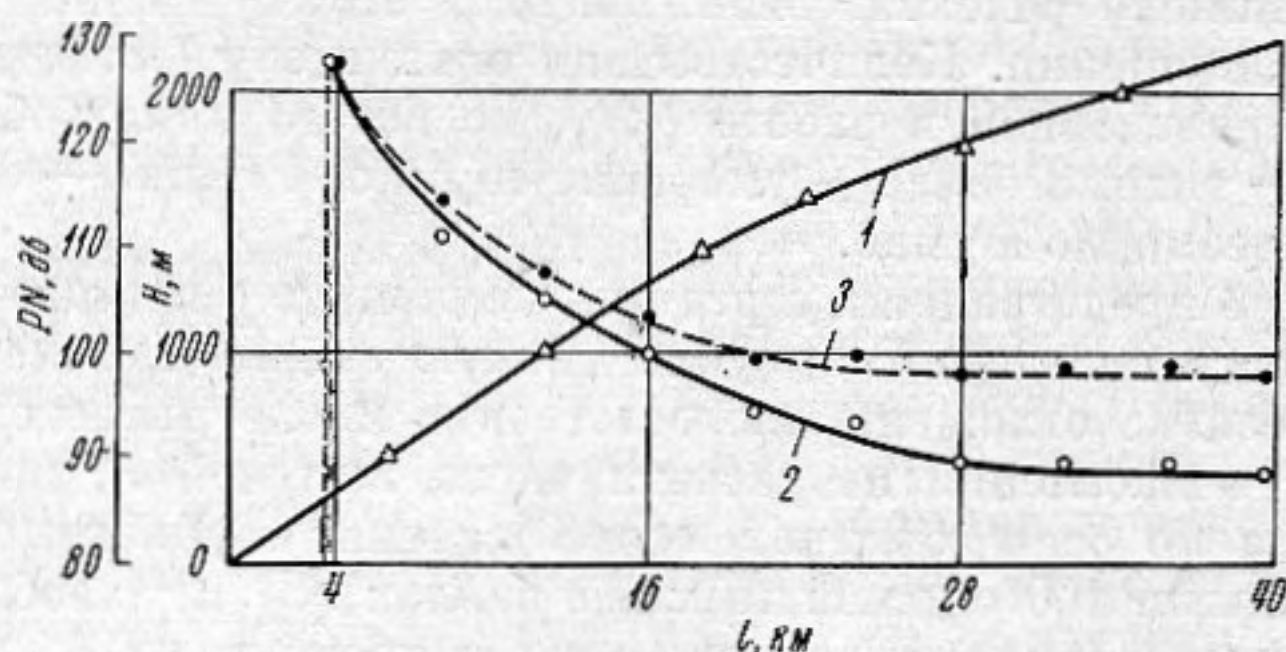
На фиг. 5 и 6 представлены усредненные данные о влиянии числа пролетов и плотности населения на субъективную оценку самолетного шума, где по осям абсцисс отложены соответственно число пролетов за день N (5) и плотность населения из расчета числа жителей P , приходящихся на 1 км^2 (6), а по осям ординат соответственно субъективная оценка шумности каждыми 100 опрошенными, в баллах (5) и жалобы населения на шум на каждые 100 человек опрошенных, в процентах (6).

Результаты исследования показывают, что меньшее беспокойство от шума испытывают жители районов с малой плотностью населения и небольшой интенсивностью движения воздушного транспорта, а наибольшее — с большой плотностью заселения территории и большим числом пролетающих самолетов за день. Причем беспокойство от звукового дискомфорта, создаваемого вследствие повышения интенсивности движения самолетов, увеличивается в соответствии с возрастанием создаваемых ими средних пиковых уровней шума. Приемлемым является число до 80 пролетов за день, когда большинством испытуемых лиц дается оценка шумности в 3 балла (умеренно шумно). В то время, как полеты над районами с низкой плотностью населения не влекут за собой серьезных последствий и рациональны, полеты над крупными населенными пунктами с большой плотностью населения увеличивают количество озвученных лиц и повышают число настойчивых жалоб на беспокоящее действие шума.

Интенсивный, но кратковременный шум вблизи взлетно-посадочной полосы и шум меньшей интенсивности, но большей продолжительности, имеющий место на значительном удалении от аэродрома, могут быть равноценны по раздражающему действию. Поэтому, на наш взгляд, более целесообразно оценивать степень беспокоящего действия самолетного шума на население по времени превышения его звучания над уровнем шумового фона (характерной величиной для каждого населенного пункта). Для оценки влияния продолжительности действия шума на его воспринимаемый уровень целесообразно определять поправку $\Delta PN \text{ дб}_T$, при вычислении которой предложено [18] в качестве нулевого значения использовать продолжительность воздействия максимального из измеренных уровней. Принимая, что удвоение времени звучания шума эквивалентно увеличению его уровня на 3 дб, находим поправку на увеличение продолжительности звучания по эмпирической формуле $\Delta PN \text{ дб}_T = n \cdot q$, где n — число удвоений нулевой величины $T_{ш.ф.}$ (исходного времени превышения звучания при самом максимальном из измеренных уровней над уровнем шумового фона), приближающее ее к значению $T_{ш.ф. n}$; $T_{ш.ф. n} > T_{ш.ф.}$; $q = 3$ параметр увеличения уровня при удвоении времени воздействия авиационного шума.

Практическое применение формулы можно пояснить на конкретном примере. Пусть требуется определить поправку $\Delta PN \text{ дб}_T$ на продолжительность воздействия к уровню воспринимаемого шума, создаваемого при взлете самолета Ту-104 над жилым районом, расположенным в 30 км от места старта, если известно, что наибольший из максимальных уровней

измерен на расстоянии 3,5 км от начала разбега и составляет 128 PN дб, $T_{ш.ф.} = 30$ сек, а в 30 км от того же ориентира максимальный уровень воспринимаемого шума равен 90 PN дб и $T_{ш.ф.} = 245$ сек. Для того, чтобы получить поправку на продолжительность звучания 90 PN дб нужно определить число удвоений n , приближающее $T_{ш.ф.} = 30$ сек к значению $T_{ш.ф.}^n = 245$ сек. Этим числом n в соотношении $30 \cdot 2^n \approx 245$ будет 3, $\Delta PN_{дб} = 3 \cdot 3 = 9$ PN дб. В результате суммирования величины



Фиг. 7

уровня с поправкой получаем уровень воспринимаемого шума с учетом продолжительности его воздействия: $90 + 9 = 99$ PN дб.

Следует указать, что формула для $\Delta PN_{дб, T}$ учитывает только влияние продолжительности воздействия шума $T_{ш.ф.}$ на уровень воспринимаемого шума; влияние, которое оказывает продолжительность звучания на суммарный уровень шума, ею не определяется.

На фиг. 7 представлена в виде усредненных данных закономерность распределения уровней воспринимаемого шума при взлете самолета Ту-104 на разных расстояниях от места старта, где 1 — стандартная траектория набора высоты, в метрах; 2 — уровни воспринимаемого шума PN , дб; 3 — уровни воспринимаемого шума с учетом поправки на продолжительность его воздействия, PN , дб.

Несмотря на то, что приведенные в работе экспериментальные данные относятся в основном к взлетному шуму самолета Ту-104, аналогичные закономерности, правда в несколько меньшей мере, свойственны и для посадочного шума. Полученные материалы могут быть использованы при расчетах уровней воспринимаемого шума с учетом продолжительности его воздействия, выборе рациональных трасс полета над населенной местностью из условий минимального звучания и учтены при нормировании самолетного шума на территории населенных пунктов, находящихся в зоне действия аэропортов.

ЛИТЕРАТУРА

1. И. К. Разумов, В. Е. Квитка, Г. И. Губкина. Характеристики шума, создаваемого самолетом Ту-104. Гражд. авиация, 1958, 2, 19—21.
2. В. Е. Квитка, Г. И. Губкина. Новые исследования шума Ту-104 на взлете. Гражд. авиация, 1952, 7, 24—25.
3. В. Е. Квитка, Б. Н. Мельников. Полеты и акустика. Гражд. авиация, 1967, 2, 24—25.
4. В. Е. Квитка, Б. Н. Мельников. Определение характеристик шума реактивных самолетов при снижении на посадку. Акуст. ж., 1967, 13, 3, 454—455.
5. В. Е. Квитка, Б. Н. Мельников. Дальше, выше и... тише. Гражд. авиация, 1968, 9, 26—27.
6. И. Л. Карагодина, С. А. Солдаткина, И. Л. Винокур, А. А. Климухин. Влияние авиационного шума на население, проживающее в районе расположения аэропортов. Гигиена и санитария, 1969, 5, 25—29.
7. K. S. Pearsons, D. E. Bishop, R. D. Horonjeff. Judged noisiness of modulated and multiple tones in broadband noise. J. Acoust. Soc. America, 1969, 45, 3, 742-750.

8. D. W. Robinson, J. M. Bowsher, W. C. Copeland. On judging the noise from aircraft in flight. *Acustica*, 1963, 13, 5, 324—336.
9. E. J. Rache, J. Muheim. Evaluation methods for total noise exposure. *J. Sound and Vibrat.*, 1968, 7, 1, 106—115.
10. W. Bürk. Kausalverhältnisse zwischen Umwelt und Mensch bei der Beurteilung von Geräuschen. *Kampf dem Lärm*, 1968, 15, 5, 113—119.
11. J. W. Little, J. E. Mabry. Sound duration and its effect on judged annoyance. *J. Sound and Vibrat.*, 1969, 2, 247—262.
12. A. V. Lüpke. Der Zeiteinfluß bei der Geräuschbeurteilung. *Kampf dem Lärm*, 1968, 15, 4, 99—101.
13. K. D. Kryter. Scaling human reactions to the sound from aircraft. *J. Acoust. Soc. America*, 1959, 31, 11, 1415—1429.
14. Bolt, Beranek, Newman. Inc. Studies of noise characteristics of the Comet 4jet airliner and of large conventional propellerdriven airliners, 1958.
15. Г. И. Губкина, Б. Н. Мельников. Влияние скорости полета на пролетный шум пассажирских самолетов и продолжительности шума на субъективную оценку его интенсивности. *Акуст. ж.*, 1967, 13, 4, 562—566.
16. F. Bruckmayer. Beurteilung von Lärmbelästigungen durch Bezug auf den Störpegel. *Österr. Ingr-Z.*, 1963, 6, 9, 315—321.
17. D. W. Robinson. Recent advances in the subjective measurement of noise. 4th Internat. Congr. Acoustics, Copenhagen, 1962. Congr. Rept. v. 2; Copenhagen, 1963, 157—177.
18. A. V. Lüpke. Der Bewertungsfactor bei der Beurteilung von Geräuscheinwirkungen, *Lärmbekämpfung*, 1967, 11, 5, 101—104.

Иркутский государственный
медицинский институт

Поступила в редакцию
23 июля 1970 г.