

## АКУСТИЧЕСКАЯ ЭКОЛОГИЯ. ШУМЫ И ВИБРАЦИЯ

УДК 534.75,612.85

### ОЦЕНКИ РАЗДРАЖАЮЩЕГО ДЕЙСТВИЯ ШУМА

© 2022 г. Л. К. Римская-Корсакова<sup>а</sup>, \*, П. А. Пятаков<sup>а</sup>, С. А. Шуляпов<sup>а</sup>

<sup>а</sup>АО «Акустический институт имени академика Н.Н. Андреева», ул. Шверника 4, Москва, 117036 Россия

\*e-mail: lkrk@mail.ru

Поступила в редакцию 21.04.2022 г.

После доработки 16.05.2022 г.

Принята к публикации 26.05.2022 г.

Шум определяют как слышимый звук, который нарушает тишину и вызывает раздражение. Такое раздражение традиционно оценивают по А-взвешенному уровню звукового давления шума, примерно соответствующему уровню воспринимаемой громкости. Однако А-взвешенная шкала неприменима для анализа тональных, импульсных и преимущественно низкочастотных шумов, поэтому были разработаны методы расчетов громкости шумов в линейных единицах — сонах, учитывающие не только слуховую чувствительность, но и свойства маскировки и слуховые временные эффекты. Существование пределов снижения уровней шумов и их информационная значимость привели к появлению других методов оценки шумового раздражения. За раздражение, помимо громкости, отвечают такие субъективные качества шума, как резкость, хриплость, сила колебаний, тональность и др. Для них определены единицы измерений и разработаны методы расчетов. С учетом таких качеств была предложена метрика краткосрочного психоакустического раздражения (ПАР), справедливая для многих видов шумов. Другой способ оценки психоакустического раздражения включает в себя проведение слуховой экспертизы и построение математической модели, связывающей ранг слухового раздражения с измеренными субъективными качествами шумов. Полученная модель помогает: выявлять причины раздражения (раздражающие субъективные качества); разрабатывать планы работ, направленных на шумоподавление, на формирование приятных шумов машин и механизмов; контролировать изменения ранга раздражения в ходе реализации таких планов. В данной работе сопоставляются разные методы оценки раздражения, вызванного шумами, зарегистрированными в вагонах московского метро.

*Ключевые слова:* субъективные качества, громкость, резкость, хриплость, психоакустическое раздражение, шумовые вагоны метро

DOI: 10.31857/S0320791922050100

#### 1. ВВЕДЕНИЕ

Шум определяют как слышимый звук, который нарушает тишину и вызывает раздражение. Традиционный способ оценки раздражающего действия шума — это определение его уровня по А-взвешенной шкале дБ. Такая шкала была введена в 1961 г. и позволяла оценивать уровень громкости воспринимаемого шума [1]. Этот международный стандарт (ISO-226) был модифицирован в 2003 г. и введен в РФ в 2009 г. Однако А-взвешенная шкала имела недостатки — она давала большие погрешности при оценке уровней громкости тональных, импульсных и преимущественно низкочастотных шумов, была непригодной для измерений пиковых значений уровня звукового давления (УЗД). Поэтому сначала в 1967 г. был введен региональный немецкий стандарт (DIN 45631) [2], а потом в 1975 г. международный стандарт (ISO 532) [3] расчета громкости звуков в линейных единицах — сонах. Стандарт менялся несколько раз и в настоящее время имеет

две части. Первая часть включает описание метода расчета громкости звука, воспринимаемого слушателями с нормальным слухом, которая была предложена Цвикером [4, 5], а вторая часть — методом, предложенным Муром и Гласбергом [6, 7]. Методы пригодны для расчетов громкости тональных звуков, широкополосных и узкополосных шумов, сложных звуков. Метод Цвикера предназначен для стационарных звуков, а метод Мура—Гласберга — для изменяющихся во времени (нестационарных) звуков, включая стационарные звуки как частный случай. Последний метод также позволяет рассчитывать бинауральную громкость, воспроизводить кривые равной громкости [1] и эталонные пороги слышимости [8]. Использование методов расчетов громкости не требует специальных знаний о свойствах слухового восприятия звуков. Разные методы по-разному оценивают громкость сходных звуков, но ни один из методов не имеет преимуществ; пользователи сами выбирают нужный им метод. В РФ

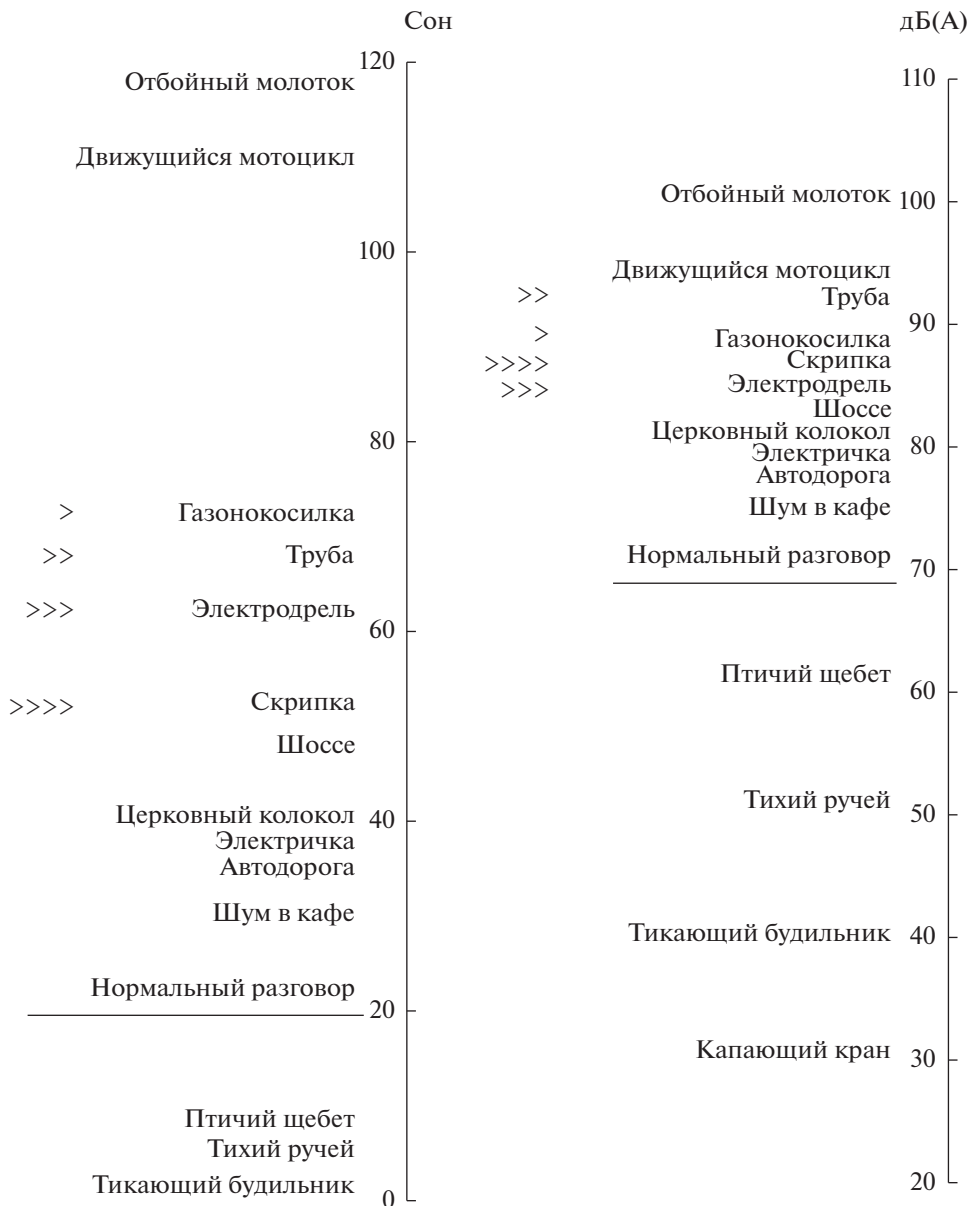


Рис. 1. Шкалы громкости сон и дБ(А) (из работы [10]).

стандарт для расчетов громкости звуков [3] не введен.

Шкала громкости шумов в сонях не полностью соответствует шкале уровней громкости в дБ(А) (рис. 1). Так, громкость скрипки в сонях меньше, чем громкость электродрели, но уровень громкости скрипки в дБ(А), наоборот, выше, чем электродрели. Такая же ситуация и со звуками газонокосилки и трубы. Прямыми линиями на рис. 1 подчеркнуты громкости и уровни громкости нормальной речи. Диапазон уровней громкостей звуков, превышающих уровень нормальной речи, сжат на А-взвешенной шкале по сравнению с диапазоном громкостей на линейной шкале. За

счет сжатия различия уровней громкости сравниваемых звуков в дБ(А) могут быть в пределах погрешности измерений, а оценки различий вызываемого раздражения — неточными. Поэтому были разработаны стандарты расчетов громкости и появились приборы для измерения громкости звуков в сонях.

Нормирование вредного воздействия звуков выходит за рамки стандартов расчетов громкости. В РФ такие нормы устанавливают санитарные правила [9]. Согласно правилам, допустимый уровень шума в пассажирских вагонах метро и кабине машиниста довольно высокий и составляет 75 дБ(А).

Учитывая информационную значимость шумов машин и механизмов, а также наличие пределов снижения уровней шумов, в настоящее время раздражающее действие шума определяют на основании не только интегральных характеристик громкости, но и оценок звуковых качеств (sound quality –  $SQ$ ).

Раздражение, помимо громкости, могут вызвать другие субъективные качества шума. В ходе психоакустических исследований были выделены независимые друг от друга субъективные качества: резкость, сила колебаний, хрипкость, тональность и др. [10]. Для них были определены меры и единицы измерений, разработаны модели слухового восприятия качеств, методы расчетов показателей качеств, введены национальные и международные стандарты методов расчетов [1–3, 11–13]. В РФ стандарты расчетов звуковых качеств не введены.

Для показателей качеств нет допустимых норм. Поэтому для выявления приятных и неприятных компонентов шумов с целью их последующего усиления или нивелирования была введена метрика краткосрочного психоакустического раздражения (ПАР), учитывающая разные показатели качеств [10]. Она была получена в ходе исследований восприятия синтетических шумов разных видов.

Еще один способ оценки раздражения и выделения раздражающих компонентов шумов – это построение модели, связывающей результат слухового ранжирования шумов по степени раздражения ( $SQ$ -ранг) с показателями субъективных качеств этих шумов [14]. Такую модель связи получают один раз перед разработкой плана по шумоподавлению и используют по ходу выполнения плана для прогноза шумового раздражения, для определения вкладов разных качеств шума в раздражение.

В данной работе сравниваются разные методы оценки шумового раздражения на основании измерений уровней громкости (дБ(А)) и громкости (единицы сон), а также измерений показателей субъективных качеств шумов. Для примеров были использованы шумы, зарегистрированные в вагонах московского метро.

## 2. ПСИХОАКУСТИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ КАЧЕСТВА И МЕТРИКИ РАЗДРАЖЕНИЯ

Вначале представим краткие сведения о том, что понимается под субъективными качествами звуков.

Слуховая система человека делит воспринимаемые звуки на частотные группы, которые в немецкой школе психоакустики названы *критическими полосами* [5, 10]. Принято, что в диапазоне слышимых частот есть 24 примыкающие друг к

другу полосы по шкале от 0 до 24 Барк (*critical band rate*). Ширины таких полос для тонов с частотами менее 500 Гц примерно постоянны и равны 100 Гц, а для тонов с частотами выше 500 Гц увеличиваются пропорционально частоте. Известна другая шкала. Согласно английской школе психоакустики шкала имеет 40 частотных групп, названных *прямоугольными полосами, которые эквивалентны слуховым (ERB-rate)* [7]. Ширины всех таких полос пропорциональны центральным частотам. В основе формирования субъективных качеств звуков лежит концепция слуховых *критических полос (КП)* или *эквивалентных прямоугольных полос*.

Важным субъективным качеством звуков является *громкость (loudness – L)* [5, 10]. Она характеризует субъективное восприятие силы/интенсивности звука. Единица измерения громкости – сон (sone). Громкость в 1 сон соответствует эталону – синусоидальному тону с частотой 1 кГц и уровнем 40 дБ.

Громкость сложным образом зависит от звукового давления (интенсивности), длительности и частоты звука. Громкость тем выше, чем больше интенсивность, длительность, ширина спектра звука [15]. При формировании громкости большее значение имеет начальная часть звука, чем его последующие части [16, 17]. Этот “начальный” эффект не зависит от продолжительности звука, имеет место при предъявлении звуков в тишине и при наличии помех [18]. Громкость звуков выше при прослушивании через два уха. Эффект называют бинауральным суммированием громкости [19, 20].

В основе расчетов громкости  $L$  звуков лежит суммирование удельных громкостей  $L'$ , которые рассчитывают в наборах КП или эквивалентных прямоугольных полос и которые связаны степенным законом с изменениями ощущения интенсивности [4]. Как указано выше, принят стандарт расчета громкости [3].

Субъективное качество – *резкость (sharpness – S)* звука воспринимается отдельно от громкости [10]. Более высокочастотный шум воспринимается как более неприятный, агрессивный и раздражающий, чем равный по громкости низкочастотный шум. Резкость связана с восприятием спектральной огибающей звука. Ее сравнивают с “центром тяжести” звука: чем выше “центр тяжести” на частотной шкале, тем резче звук.

Единица измерения резкости – акум (от латинского *acum* – острый). Эталонный звук в 1 акум соответствует узкополосному шуму с уровнем 60 дБ, центральной частотой 1 кГц и полосой, не превышающей 150 Гц. Ощущение резкости коррелирует с ощущением громкости: чем больше громкость, тем резче звук. При увеличении уровня звука от 30 до 90 дБ его резкость возрастает

примерно в два раза. Однако, если разница уровней сравниваемых звуков не велика, то связью резкости с уровнем звука пренебрегают.

Метод расчета резкости  $S$  основан на расчетах удельных громкостей звука в наборах КП. Общая резкость представляет собой отношение интеграла свертки удельной громкости с весовым коэффициентом  $g$  к общей громкости звука [10]. Весовой коэффициент  $g$  связан с номером КП и равен единице для номеров КП меньших 16 Барк, но возрастает до 4 пропорционально увеличению номера КП от 16 до 24 Барк.

Модуляции звуков вызывают разные и независимые друг от друга слуховые ощущения (субъективные качества) [10]. При очень низких частотах амплитудной модуляции (менее 20 Гц) слушатели ощущают изменения громкости звука. Эти ощущения связывают с субъективным качеством звука, называемым *силой флуктуаций* (*fluctuation strength* –  $FS$ ). Максимальное ощущение  $FS$  возникает при действии тонов, а также широкополосных и узкополосных шумов с частотой модуляции в 4 Гц.

Единицей измерения  $FS$  является “васил” (*vacil*) (от латинского *vacillare* – колебания). Ощущение в 1 васил вызывает 100% синусоидальный амплитудно-модулированный (АМ) тон с частотой несущей в 1 кГц, частотой модуляции 4 Гц и интенсивностью 60 дБ. При увеличении уровня звукового давления модулированных звуков от 40 до 80 дБ  $FS$  увеличивается в  $\sim 2.5$  раза. Зависимость  $FS$  от частоты несущей слабая для АМ тонов, но более заметная для частотно-модулированных (ЧМ) тонов. Узкополосные немодулированные шумы обладают качеством  $FS$ . В этом случае  $FS$  определяется шириной полосы шума  $dF$ , а эффективная частота модуляции  $f_{mod}$  составляет  $\sim 0.64 dF$ .

Показатель качества  $FS$  рассчитывают согласно слуховой модели [10], учитывающей изменение во времени профиля слуховой маскировки тестового импульса, предъявляемого на фоне 100% амплитудно-модулированного тона (помехи). Профиль маскировки соответствует зависимости порога обнаружения импульса от времени появления импульса на периоде модуляции тона и обнаруживает изменение громкости тестового импульса в присутствии помехи. На форму профиля влияют процессы пре-, одновременной и пост-маскировки. По профилю определяют глубину слуховой маскировки  $\Delta L$ , равную разности между максимальным и минимальным значениями порогов обнаружения. Выражение для определения показателя  $FS$  имеет вид:

$$FS = \Delta L / [(f_{mod} / 4 \text{ Гц}) + (4 \text{ Гц} / f_{mod})], \quad (1)$$

где  $\Delta L$  – глубина слуховой маскировки;  $f_{mod}$  – частота модуляции помехи. Считается [10], что при частотах  $f_{mod} > 4$  Гц ощущение  $FS$  формируется под влиянием эффектов временной маскировки,

а при частотах  $f_{mod} < 4$  Гц – эффектов кратковременной памяти. При действии широкополосных амплитудно-модулированных шумов или сложных АМ и ЧМ звуков в расчете показателя  $FS$  вместо глубины маскировки  $\Delta L$  учитывают сумму глубин маскировки  $\Sigma \Delta L$ , полученных в наборе возбужденных звуком КП.

При частотах модуляций, превышающих 15–20 Гц, у слушателей вместо ощущения силы флуктуаций ( $FS$ ) формируется другое ощущение, называемое *хрипlostью* (*roughness* –  $R$ ) [10]. Максимальное ощущение хрипlosti возникает при действии 100% амплитудно-модулированного тона с несущей частотой в 1 кГц и частотой модуляции в 70 Гц. При частотах модуляции в 150 Гц и выше ощущение хрипlosti снижается, и слушатель выслушивает три отдельных тона.

Единицей измерения хрипlosti является “аспер” (латинское слово “asper” означает грубый). 1 аспер соответствует ощущению 100% синусоидального АМ тона с несущей частотой в 1 кГц, частотой модуляции  $f_{mod}$  в 70 Гц и интенсивностью 60 дБ.

Для 100% амплитудно-модулированных тонов зависимость хрипlosti  $R$  от частоты модуляции  $f_{mod}$  имеет горб, величина которого зависит от частоты несущей  $f_c$ . Самый большой горб регистрируют при  $f_c$  в 1 кГц и  $f_{mod}$  в 70 Гц.

Зависимость хрипlosti от частоты модуляции для широкополосного АМ шума совпадает с таковой, полученной для АМ и ЧМ тонов с высокими частотами  $f_c$  (более 1 кГц). Максимум хрипlosti также приходится на  $f_{mod}$  в 70 Гц, независимо от ширины полосы шума и типа его модуляции.

Хрипло звучат узкополосные шумы из-за случайных изменений огибающих. Шумы с полосой в 100 Гц и частотой  $f_{mod}$  в 64 Гц обладают наиболее заметной хрипlostью. Кроме того, хрипlostь присуща звукам, огибающие которых не имеют периодической модуляции, но спектры имеют пики в диапазоне 15–300 Гц.

При увеличении уровня звукового давления на 40 дБ хрипlostь  $R$  увеличивается примерно в 3 раза, как и ощущение силы флуктуаций  $FS$ . Изменение хрипlosti ощущается при увеличении глубины модуляции на  $\sim 10\%$ . Большую хрипlostь имеют звуки с частотной, а не амплитудной модуляцией. Хрипlostь звуков, имеющих частотную модуляцию во всем слуховом частотном диапазоне, может достигать  $\sim 6$  аспер. Такую же хрипlostь могут иметь широкополосные АМ шумы.

Расчетные модели силы колебаний  $FS$  и хрипlosti  $R$  похожи [10, 21]. В основе модели хрипlosti также лежат профили временной маскировки, определяющие глубину маскировки  $\Delta L$ . При этом хрипlostь  $R$  пропорциональна произведению  $f_{mod} \times \Delta L$ . Это произведение имеет макси-

мальное значение при частотах  $f_{\text{mod}} \sim 70$  Гц, но уменьшается при снижении  $f_{\text{mod}}$  ниже 70 Гц (несмотря на увеличение  $\Delta L$ ) и при повышении  $f_{\text{mod}}$  выше 70 Гц за счет снижения временного разрешения громкости и стремления  $\Delta L$  к нулю.

В расчетах показателя хриплости  $R$  сложных АМ и ЧМ звуков, а также широкополосных шумов вместо глубины маскировки  $\Delta L$  используют сумму глубин маскировки  $\Sigma \Delta L$ , вычисленных в наборе возбужденных звуком КП.

Еще одно субъективное качество шумов, способное вызвать раздражение, — это *тональность* (*tonality*  $T$ ). Данный термин появился в 19 веке для описания высотной организации звуков в музыке. В акустике этот термин имеет другое значение. Звук воспринимается как тональный, если он содержит выраженный частотный компонент. Шум с тональными компонентами в зависимости от их свойств может быть как приятным, так и раздражающим.

Обычно тональность оценивают весом тональных компонентов в спектре шума. Расчеты весов предполагают сравнение амплитуды некоторого тонального компонента с амплитудами соседних компонентов. Для количественной оценки тональности используется отношение тон/шум или показатель заметности. Такие показатели не учитывают особенностей слуховой обработки, поэтому Соттек предложил “психоакустический” метод расчета тональности [22, 23].

В основу расчета тональности была положена модель слухового восприятия высоты звука, включающая оценку общей громкости как сумму удельных громкостей в наборе КП и учитывающая пороги слышимости и эффекты слуховой маскировки. Расчет предусматривал сравнение громкости в одной из КП с громкостями в прилегающих КП. Мерой оценки тональности была выбрана единица “ту” или “tuHMS”: “tu” от английского слова turbidity — мутность, а “HMS” от английского сочетания Hearing Model by Sottek. По шкале тональности HMS 1 ту соответствует звуку с сильно выраженной и сильно раздражающей тональностью; 0.5 ту — звуку с выраженной и раздражающей тональностью; 0.1 ту — звуку со слабой и нераздражающей тональностью. Метод расчета тональности представлен в стандарте ЕСМА-74, регламентирующем шумы ИТ-оборудования [13].

Звуковое качество шума в целом, его приятность или его раздражающее действие оценивает слушатель. Отношение слушателя к шуму определяют не только субъективные качества, но и его эстетические и когнитивные предпочтения, а также психофизиологическое состояние. Последние факторы оценить сложно, однако можно учесть особенности восприятия акустических характеристик звуков, описав их комбинацией субъективных качеств. Учитывая эти качества,

было введено количественное выражение для анализа краткосрочного психоакустического раздражения (ПАР) [10]. Выражение было получено на основании результатов слуховых экспериментов по восприятию синтетических модулированных и немодулированных шумов, отличающихся спектральным составом. Полученная для заданных шумов связь ПАР с показателями громкости  $L$ , резкости  $S$ , силы флуктуаций  $FS$  и хриплости  $R$  имела следующий вид:

$$\text{ПАР} = L[1 + \sqrt{W_S^2 + W_{FSR}^2}], \quad (2)$$

где

$$W_{FSR} = (2.18/L^{0.4})(0.4FS + 0.6R);$$

$$W_S = 0.25(S - 1.75)\log_{10}(L + 10), \text{ если } S > 1.75;$$

$$W_S = 0, \text{ если } S \leq 1.75.$$

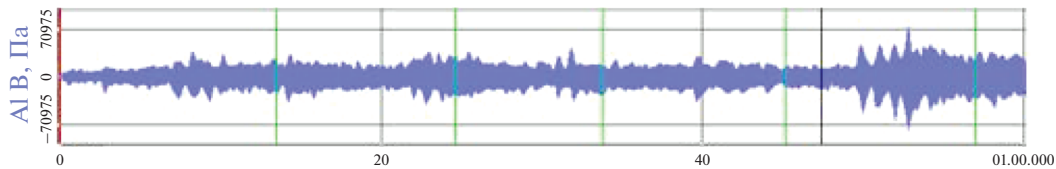
Показатель ПАР востребован на этапе проектирования изделий. Особенно это актуально для изделий, генерирующих интенсивные шумы (например, для самолетов), когда необходимо сравнить разные подходы к выбору конструкции и материалов изделия [24, 25] или возможен расчетный прогноз шумов изделия [26, 27], но еще нецелесообразна времязатратная слуховая экспертиза прогнозируемых шумов. Поэтому для количественной оценки раздражающего действия авиационных шумов показатель ПАР был модифицирован [28]. Он учитывал не только вышеупомянутые показатели  $L$ ,  $S$ ,  $FS$  и  $R$ , но и показатель качества — тональность  $T$ , являющийся весьма раздражающим для авиашумов:

$$\text{ПАР} = L[1 + \sqrt{\gamma_0 + \gamma_S W_S^2 + \gamma_{FSR} W_{FSR}^2 + \gamma_T W_T^2}], \quad (3)$$

где  $\gamma_0 = 0.16$ ,  $\gamma_S = 11.48$ ,  $\gamma_{FSR} = 0.84$ ,  $\gamma_T = 1.25$ ,  $W_T = (1 - e^{-0.29L})(1 - e^{-5.49T})$ ,  $W_S$  и  $W_{FSR}$  — то же, что в формуле (2).

Более универсальный и широко используемый метод оценки шумового раздражения, применяемый на стадии разработки и совершенствования самых разных изделий от кофеварок до ветряных турбин, предполагает создание математической модели, связывающей субъективное мнение слуховых экспертов о качестве шумов с вычисленными показателями качеств таких шумов [14]. Для построения такой модели связи первоначально формируют набор шумов и вычисляют для них показатели субъективных качеств. Далее, набирают и обучают слуховых экспертов, которые затем проводят ранжирование выбранных шумов по степени вызываемого раздражения.

Для ранжирования шумов, чаще всего, используют один из трех методов: (1) метод парного сравнения; (2) метод “категория—суждение”; (3) метод семантического дифференциала. Первый метод предусматривает сравнение пар шумов, и выбор шума с наилучшим заданным качеством.



**Рис. 2.** Пример временного профиля шума длительностью 1 мин, зарегистрированного при прямолинейном движении вагона со скоростью 45 км/ч. Для последующего анализа шумов выбирались отрезки длительностью ~3 с. Ось ординат – амплитуда в единицах Па.

По результатам сравнения шумам из набора присваивают ранги, пропорциональные числу предпочтений. Достоинство метода – его простота и возможность включения модельных шумов для определения вызывающих раздражение характеристик. Недостаток – сложность ранжирования большого числа шумов, поскольку для проверки согласованности результатов одна и та же пара звуков прослушивается слушателем многократно.

Метод “категория–суждение” предполагает прослушивание звуков один раз, а эксперт, например, по шкале от 1 до 10 определяет, насколько звук был громкий, резкий, неприятный и т.д. Чтобы определить категорию шума по степени раздражения, слушатели должны быть заранее ознакомлены с тестируемыми шумами.

Метод семантического дифференциала аналогичен методу определения категорий, однако вместо оценки свойств звука с помощью одной категории (например, шум “громкий”), слушателю предлагают сделать выбор из пары категорий с противоположными атрибутами, например, из пары “громкий против тихого”.

По результатам слуховой экспертизы формируют шкалу раздражения заданного набора шумов. Каждому шуму приписывают слуховой ранг (*SQ*-ранг), который связывают с вычисленными показателями качеств шумов (*L*, *S*, *R*, *FS*). Модель связи получают методами множественной линейной регрессии в виде:

$$SQ\text{-ранг} = b_1L + b_2S + b_3R + b_4FS + b_0, \quad (4)$$

где  $b_1$ ,  $b_2$ ,  $b_3$ ,  $b_4$  и  $b_0$  – коэффициенты регрессии.

На следующем этапе проводят статистический анализ качества модели связи, оценивают достоверность коэффициентов регрессии. Правильно составленная модель связи (уравнение (4)) включает в себя уникальную комбинацию статистически значимых вызывающих раздражение субъективных качеств шумов. Данное уравнение помогает планировать мероприятия по корректировке шумов конкретных изделий или окружающей среды, позволяет контролировать степень раздражения в ходе выполнения плана мероприятий.

### 3. РЕГИСТРАЦИЯ ШУМОВ В ВАГОНАХ МОСКОВСКОГО МЕТРО

Для сравнения разных способов оценок раздражения были использованы шумы вагонов московского метро. Шумы регистрировали в разных режимах эксплуатации вагонов: на холостом ходу или движении, при работе систем – двигателя, кондиционера, компрессора. Длительность записей составляла несколько минут. Временные профили шумов были нестационарными и имели выраженные компоненты, вызванные вибрациями при взаимодействии колес с рельсами (рис. 2).

Интегральные уровни звукового давления (УЗД) шумов без (дБ(лин)) и с *A*-взвешиванием (дБ(*A*)) при времени накопления в 1 с измеряли по фрагментам записей таких шумов, которые не содержали стуки колес. В табл. 1 указаны номера шумов в разных режимах эксплуатации вагонов, описание режимов, а также измеренные значения УЗД шумов.

Для анализа громкости и других качеств шумов записи конвертировали в wav-формат с нормировкой по пиковым значениям, присущим стукам колес. Из каждой записи вырезали по 4–5 стационарных отрезков, не содержащих стуки колес. Длительность отрезков составляла ~3 с. Примеры спектрограмм таких отрезков шумов показаны на рис. 3. Частотные характеристики отрезков были широкополосными и имели хорошо выраженные НЧ компоненты.

Для вычисления показателей звуковых качеств существуют стандартные методы [8–13], которые реализованы в программных продуктах разных фирм, и могут быть использованы для разработки собственных программ. В данной работе расчеты показателей качеств проводили в среде LabView.

### 4. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ И РАСЧЕТОВ

#### 4.1. Оценка раздражения, вызванного шумом, на основании его громкости

Данные на рис. 4 позволяют сравнить раздражение, вызванное действием шумов в вагонах в разных режимах эксплуатации, на основании разных интегральных характеристик. На рисунке представлены измеренные УЗД шумов в дБ(лин)

**Таблица 1.** Номера шумов, скорость движения и работающее оборудование вагонов, измеренные значения уровней звукового давления (УЗД)

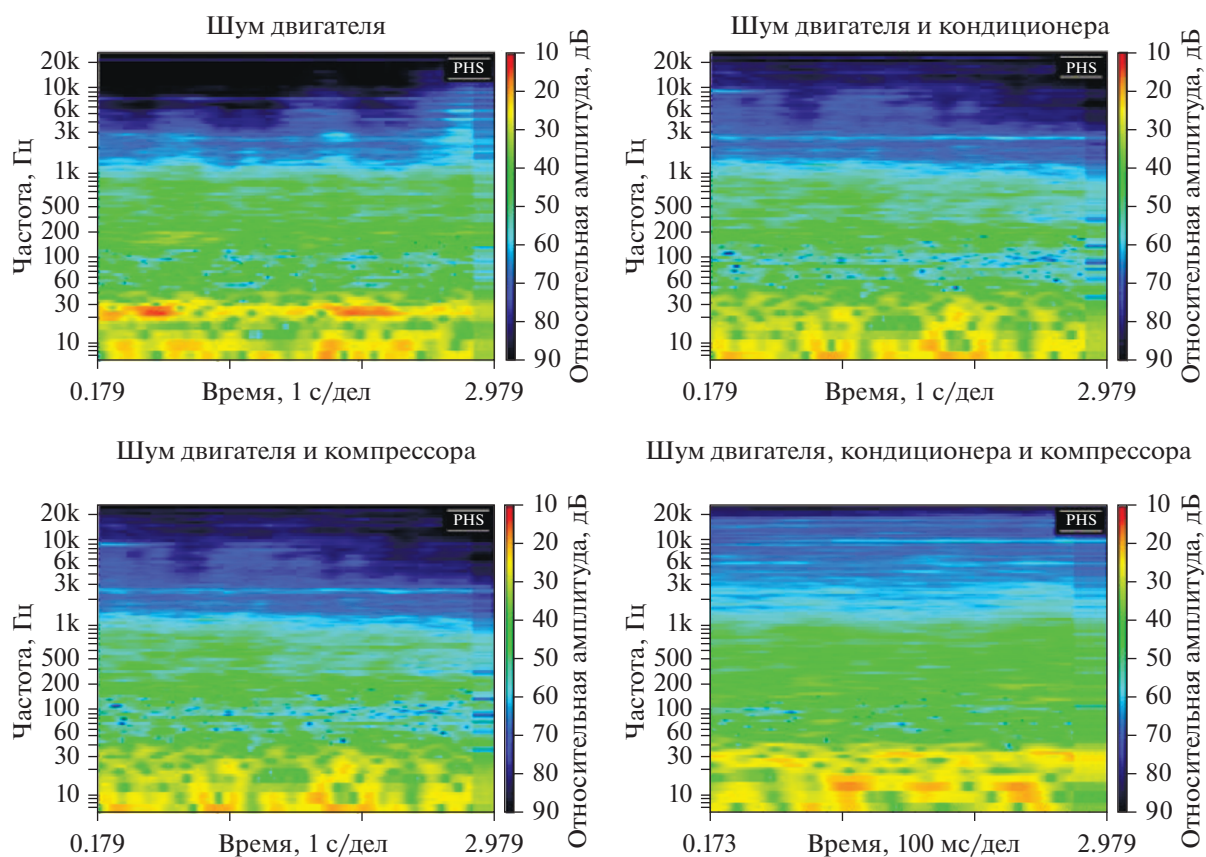
Номер шума	Скорость движения вагона и работающее оборудование	УЗД, дБ(лин)	УЗД, дБ(А)
1	0 км/ч, Кондиционер	79	64.3
2	45 км/ч, Пассивная тяга	86.4	67.8
3	45 км/ч, Двигатель	88.1	67.6
4	45 км/ч, Двигатель + Кондиционер	86.2	68.8
5	45 км/ч, Двигатель + Кондиционер + Компрессор	87.8	71.5
6	45 км/ч, Двигатель + Компрессор	90.8	78.2

и дБ(А), а также вычисленные среднеквадратичные значения (СКЗ) в дБ и показатели громкости  $L$  в единицах сон для фрагментов шумов.

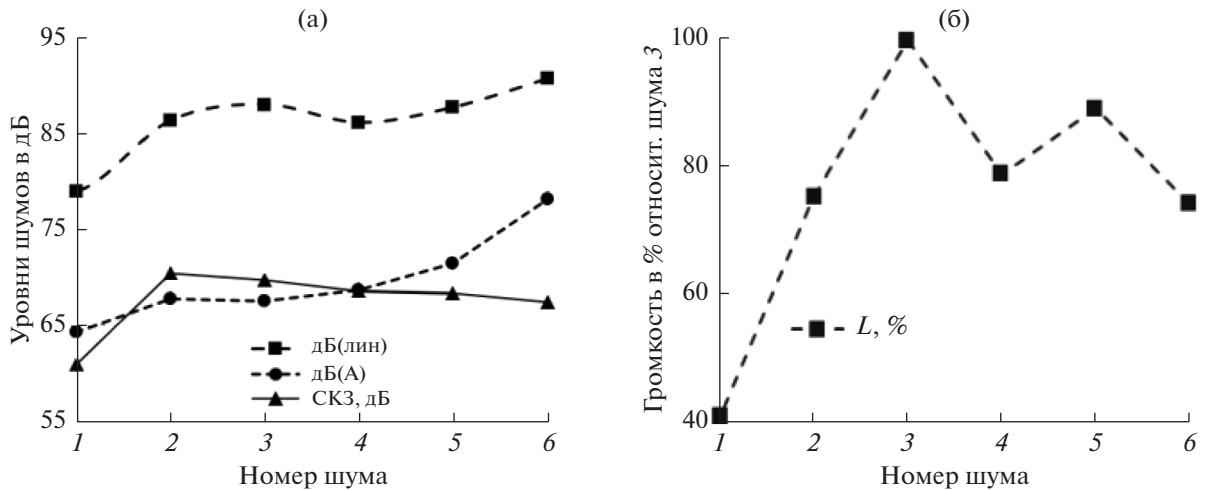
Если значения УЗД шумов, измеренные в дБ(лин) в разных режимах, обнаружили изменчивость, то таковые в дБ(А) плавно нарастают (рис. 4а). Шумы в вагонах имели ярко выраженные низкочастотные составляющие (рис. 3), это накладывает ограничения на применение А-взвешенной шкалы УЗД в анализе свойств шумов вагонов в

разных режимах эксплуатации. Поэтому были вычислены значения СКЗ в дБ для фрагментов шумов.

Значения СКЗ для большей части фрагментов шумов оказались сходными (рис. 4). При этом значения коэффициентов корреляции скорее указывали на связь СКЗ с УЗД в дБ(лин) ( $R_{СКЗ*дБ(лин)} = 0.84$ ), но не на связь с УЗД в дБ(А) ( $R_{СКЗ*дБ(А)} = 0.41$ ). Анализ шумов, полученных в



**Рис. 3.** Примеры спектрограмм отрезков шумов вагонов. Скорость движения вагона 45 км/ч. Указано работающее оборудование.



**Рис. 4.** (а) – Сравнение уровней звукового давления (УЗД) и (б) – сравнение относительных громкостей шумов вагонов в разных режимах эксплуатации. На (а) – значения УЗД, измеренных в дБ(лин) и дБ(A), а также вычисленные среднеквадратичные значения (СКЗ) фрагментов шумов. По горизонтали – номер шума (табл. 2); по вертикали: (а) – УЗД шумов и (б) – громкости шумов в % относительно громкости шума 3.

разных режимах, был продолжен с учетом громкости, вычисленной в сонах.

Изменения относительной громкости шумов представлены на рис. 4б. Относительную громкость в % получали путем приведения громкостей в сонах к громкости шума 3 (табл. 1). Шум 3 был зарегистрирован в вагоне, движущемся со скоростью 45 км/ч только при работающем двигателе.

Изменения громкости шумов в сонах (рис. 4б) не соответствовали изменениям УЗД в дБ(A) (рис. 4а), но коррелировали с УЗД в дБ(лин) ( $R_{дБ(лин)*L} = 0.78$ ) и СКЗ в дБ ( $R_{СКЗ*L} = 0.75$ ). Есть основания полагать, что для анализа раздражающего действия шумов вагонов в разных режимах эксплуатации лучше использовать оценки громкости в сонах, чем оценки УЗД (или уровней громкости) в дБ(A).

Громкость шума 3 вагона, движущегося со скоростью 45 км/ч при работе двигателя, была самой высокой. Она превышала громкости шумов 4, 5, 6, которые были зарегистрированы при совместной работе двигателя с дополнительным оборудованием (компрессора и/или кондиционера). Эти данные подтверждают известное правило [29]: показатели качества шумов (в нашем случае громкость), имеющих несколько источников, нельзя предсказать на основании показателей качества шума отдельных источников. В этом случае результирующий шум и его воздействие на слушателя является результатом сложного процесса взаимодействия шумов отдельных источников. Это одна из причин того, почему для показателей качества разрабатывают стандартные методы расчетов, вводят показатели раздражения типа ПАР или SQ-ранг, но не применяют нормирование.

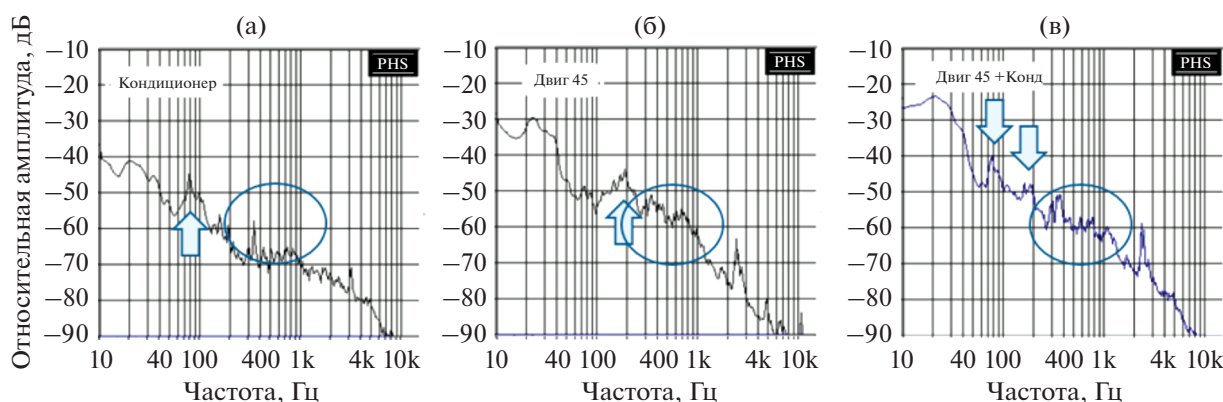
Слуховые различия громкости шумов вагонов в разных режимах эксплуатации (рис. 4) побуждают к поиску соответствующих физических свойств шумов. Так, на рис. 5 сравниваются спектры шумов вагонов, полученных (а) на стоянке и при работе кондиционера, (б) при движении со скоростью 45 км/ч и работе двигателя, (в) при движении вагона со скоростью 45 км/ч и работе двигателя и кондиционера. Кружки и стрелки указывают на различия узких участков спектров и промежуточных максимумов. Полагаем, что совместный анализ данных рис. 4б и рис. 5 может быть полезным как в части определения причин вызываемого шумом раздражения, так и в части разработки мер по устранению этого раздражения. Прямой способ выявления причин раздражения связан с учетом разных показателей качества шумов.

#### 4.2. Оценка раздражения, вызванного шумом, с учетом разных показателей звуковых качеств

**4.2.1. Вычисление показателей психоакустического раздражения.** Наряду с громкостью, раздражающими могут быть и другие субъективные качества шумов. На рис. 6 сравниваются значения показателей громкости  $L$ , резкости  $S$ , хриплости  $R$ , а также шумового раздражения ПАР, вычисленные для шумов 2–6 (табл. 1). Для расчета показателя ПАР использовалось уравнение (2), которое выведено при использовании синтетических шумов разных видов.

Обращает на себя внимание сходная заметная изменчивость показателей громкости  $L$ , хриплости  $R$  и ПАР, но не соответствующая им изменчивость показателя резкости  $S$ . Последний показатель считается раздражающим. Его среднее зна-





**Рис. 5.** (а) – Спектры шумов в вагонах при работе кондиционера на стоянке, (б) – при работающем двигателе, при движении со скоростью 45 км/ч и (в) – при работающих двигателе и кондиционере, при движении со скоростью 45 км/ч. Кружки и стрелки отмечают различия участков спектров и промежуточных максимумов.

чение для всех фрагментов шумов довольно высокое и достигает  $\sim 2$  акум. Спектрограммы и спектры (рис. 3 и 5) также выявляют заметную долю высокочастотных составляющих.

Средние значения показателей хриплости  $R$  шумов небольшие, они не превышают  $\sim 0.2$  аспер. Вполне можно предположить, что для выбранных фрагментов шумов показатель ПАР в наибольшей степени связан с громкостью  $L$ .

Рис. 6, также как и рис. 4, указывает на то, что значения показателей качества шума, имеющего несколько источников, сложно предсказать по показателям качества шума отдельных источников.

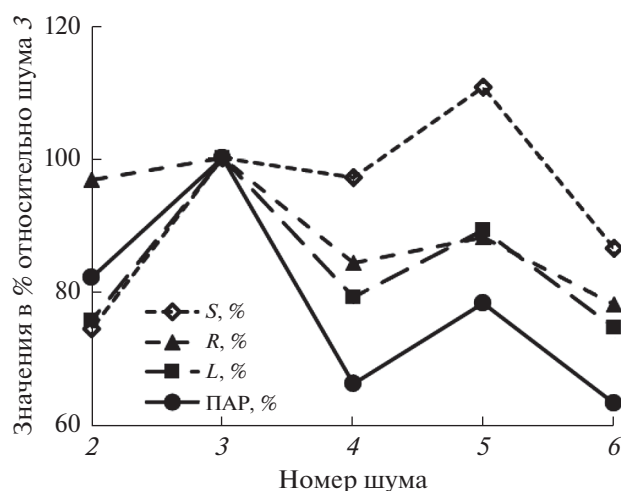
**4.2.2. Определение показателей психоакустического раздражения на основании слуховой экспертизы фрагментов шумов.** Показатель ПАР для оценки раздражения может быть применен не для всех видов шумов. Более универсальным способом оценки раздражения является слуховое экспертное тестирование и построение модели связи результатов тестирования с вычисленными показателями субъективных качеств.

В данной работе был использован метод парного сравнения как наиболее простой для начинающих экспертов. Задача слушателей состояла в определении того шума из пары, который был либо более громким ( $L$ -ранг), либо более неприятным ( $SQ$ -ранг). В слуховом ранжировании участвовали два слушателя, данные которых потом были усреднены. Слушатели прослушивали фрагменты шумов 1–5, которые были измерены в вагонах при разных режимах эксплуатации (табл. 1).

Полученные субъективные шкалы громкости ( $L$ -ранг) и слухового раздражения ( $SQ$ -ранг) представлены на рис. 7а. На том же рисунке для сравнения представлены УЗД шумов в дБ(лин). Динамики изменений  $L$ - и  $SQ$ -рангов были сход-

ными (рис. 7а) и соответствовали изменениям УЗД, измеренным в дБ(лин).

Сравнение шкал громкости и слухового раздражения ( $L$ - и  $SQ$ -ранги) с расчетными показателями громкости  $L$  и психоакустического раздражения ПАР также обнаруживает удовлетворительное сходство (рис. 7а и 7б). Противоречивые значения показателей для шумов 3 и 5 можно объяснить малым числом участвующих в экспертизе слушателей и отсутствием у них большого опыта по выделению конкретных субъективных качеств на фоне других. Тем не менее, есть основания полагать, что показатель ПАР может быть использо-



**Рис. 6.** Вычисленные показатели относительной резкости  $S$ , хриплости  $R$ , громкости  $L$  и краткосрочного психоакустического раздражения ПАР для шумов 2–6 (табл. 1). По горизонтали – номер шума, по вертикали – значения показателей  $L$ ,  $R$ , ПАР в % относительно таковых для шума 3. Шум 3 зарегистрирован в вагоне при работе только двигателя.

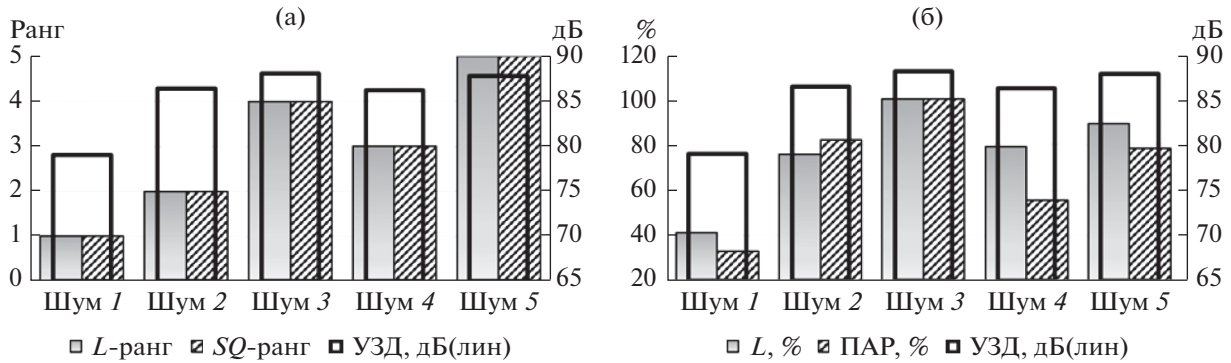


Рис. 7. (а) – Сравнение уровней звукового давления шумов в дБ(лин) с данными слуховой экспертизы громкости (*L*-ранг) и раздражения (*SQ*-ранг), а также (б) – с расчетными показателями громкости *L* и психоакустического раздражения ПАР. По горизонтали – номер шума. По вертикали: левая шкала – (а) – ранг шума и (б) – относительные показатели качеств в % относительно таковых для шума 3; правая шкала – (а, б) – дБ.

ван для оценки раздражающего действия шумов в вагонах метро.

Таким образом, определению причин раздражения помогает построение модели связи слухового раздражения (*SQ*-ранг) с показателями качеств (*L*, *S*, *R* и *FS*) (см. уравнение (4)). Для построения такой модели используют метод линейной множественной регрессии, а также последующий статистический анализ качества такой модели связи.

Меру зависимости одной случайной величины от другой устанавливает коэффициент детерминации  $R^2$ . Если  $R^2 > 0.8$ , то зависимость признают статистически значимой. Согласно расчетам (табл. 2), для выбранного набора фрагментов шумов показатель *SQ*-ранг имеет достоверную связь с показателями *L* и *R*. При этом связь *SQ*-ранга с показателями *S* и *FS* была либо статистически незначимой, либо отсутствовала. Это указывает, что для выбранных шумов слуховое раздражение связано с качествами *L* и *R*, но не связано с качествами *S* и *FS*.

В табл. 3 представлены две возможные модели связи 1 и 2, в которых качества *S* и *FS* не учтены (см. уравнение (4)). В таблице также указаны показатели, оценивающие статистическую достоверность этих моделей: коэффициент детерминации  $R^2$ , расчетное значение *F*-критерия Фишера и значения вычисленных коэффициентов регрессии.

Так, для обеих моделей коэффициенты детерминации  $R^2$  превышали значение 0.8. Однако расчетные значения *F*-критерия Фишера были больше критического значения  $F_{кр}$  при уровне значимости в 5% только для модели 2. В этой модели также статистически значимым был коэффициент регрессии  $b_1$ . Таким образом, модель 2 следует принять как статистически значимую, а модель 1 следует отклонить.

Построенная модель связи 2 полностью определяется выбранным набором фрагментов шумов для слуховой экспертизы, качеством регистрации этих шумов, а также квалификацией слуховых экспертов. Согласно модели 2, раздражение пассажиров в вагонах метро на 87% связано с громкостью *L* шумов ( $R^2 = 0.87$ ). Эта модель подтверждает факт того, что, прежде всего, громкость ответственна за раздражение пассажиров в вагонах московского метро.

Уместно отметить, что измеренные УЗД шумов в дБ(А) были ниже принятых в РФ допустимых санитарных норм, но по оценкам экспертов были раздражающими.

Следует отметить, что модель 2 не является слишком информативной с точки зрения выделения раздражающих качеств шумов и построения конкретных планов по шумоподавлению. Чтобы выявить достоверную связь психоакустического раздражения (*SQ*-ранг) с другими показателями качеств шума, такими как резкость *S* или хриплость *R*, нужен совсем другой набор шумов. Воз-

Таблица 2. Корреляция между полученной в ходе слуховой экспертизы меры раздражения (*SQ*-ранг) и вычисленными субъективными показателями

	<i>L</i>	<i>S</i>	<i>R</i>	<i>FS</i>
Коэффициент детерминации $R^2$	0.9316*	0.7918	0.8611**	0.3678

\*  $p < 0.01$ , \*\*  $p < 0.05$

**Таблица 3.** Модели количественной связи меры раздражения ( $SQ$ -ранг) с показателями качества, а также значения коэффициентов регрессии  $b_0$ ,  $b_1$ ,  $b_3$ , коэффициента детерминации  $R^2$  и значения  $F$ -критерия Фишера

Модели связи	$b_0$	$b_1$	$b_3$	$R^2$	$F$
(1) $SQ$ -ранг = $b_1L + b_3R + b_0$	1.76	0.59	-24.16	0.91	10.7
(2) $SQ$ -ранг = $b_1L + b_0$	-0.04	0.29*	—	0.87	19.69*

\*  $p < 0.05$

можно, для этого нужны шумы, зарегистрированные при движении вагонов на разных скоростях, шумы высококачественных изделий других производителей, синтетические шумы со специально подобранными качествами и т.д. Полезными также могут быть специальные манипуляции с шумами для снижения влияния их громкости при проведении слуховой экспертизы.

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Цель работы состояла в сопоставлении разных методов анализа раздражающего действия шумов. В РФ классическим методом оценки раздражения являются измерения УЗД шумов в дБ(А), что примерно соответствует уровню воспринимаемой громкости. Однако этот метод может быть пригодным лишь для шумов некоторых конкретных видов. Более универсальным интегральным методом является измерение и расчет громкости шума в линейных единицах сон, но этот метод не нашел своего применения в РФ.

Измерения громкости используют в ходе реализации мер, направленных на ее снижение ниже допустимых пределов. Однако информационная значимость шумов, а также уже достигнутое заметное снижение уровней последних, привели к появлению других методов оценки вызываемого шумом раздражения, дополняющих традиционный метод. К ним относят расчет краткосрочного психоакустического раздражения (ПАР) на основании разных субъективных качеств шумов, а также слуховую экспертизу раздражения ( $SQ$ -ранг) и построение модели связи между раздражением и отвечающими за раздражение субъективными качествами шумов. Эти методы направлены на определение степени раздражения и причин его вызывающих. С учетом показателей ПАР и модели связи  $SQ$ -ранг могут быть разработаны планы по дальнейшему снижению уровней шумов машин и механизмов, по смягчению их раздражающего воздействия и созданию заданного звукового ландшафта помещений. Сами показатели ПАР и  $SQ$ -ранг применяются для контроля эффективности реализации таких планов.

В работе показано, что:

1. Для оценки громкости в качестве показателя раздражающего действия шумов вагонов метро

лучше подходит линейная шкала громкости в сонах, чем А-взвешенная шкала УЗД в дБ(А). Последняя шкала широко используется для оценки уровней воспринимаемой громкости, однако при наличии низкочастотных составляющих в спектрах шумов такая шкала может давать ошибки. В РФ измерения громкости в единицах сон широко не применяются.

2. Раздражение, помимо громкости, способны вызывать другие субъективные качества шумов. Оценить раздражение в вагонах метро можно, используя показатель краткосрочного психоакустического раздражения ПАР. Этот показатель вычисляют, используя разные показатели субъективных качеств, включая громкость, резкость, хриплость, силу колебаний. В РФ оценки раздражения на основании показателя ПАР широко не применяются.

3. Оценить раздражение, вызываемое шумами, а также определить причины его возникновения, позволяет метод построения модели связи между слуховым раздражением ( $SQ$ -ранг) и субъективными качествами. Построенная для выбранного набора шумов вагонов метро модель связи показала, что шумовое раздражение пассажиров на 87% было связано с громкостью. Чтобы выявить зависимость раздражения пассажиров от других показателей качеств (резкости, хриплости, силы колебаний), следует использовать другие дополнительные наборы шумов вагонов. В РФ оценки раздражения путем построения моделей связи между слуховым раздражением и субъективными качествами шумов широко не используются.

4. Громкость шумов, зарегистрированных в вагонах метро и имеющих несколько источников, т.е. двигатель плюс кондиционер плюс компрессор, нельзя предсказать на основе анализа громкости шума отдельных источников, т.е. только двигателя, кондиционера и компрессора по отдельности.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ISO 226: 1961-2003. Acoustics – Normal equal-loudness-level contours / ГОСТ Р ИСО 226-2009. Кривые равной громкости.
2. DIN 45631/A1-2010. Calculation of loudness level and loudness from the sound spectrum – Zwicker method –

- Amendment 1: Calculation of the loudness of time-variant sound.
3. ISO 532-1/2: 2017. Acoustics – Methods for calculating loudness – Part 1: Zwicker method; Part 2: Moore-Glasberg method.
  4. Zwicker E., Feldtkeller R. Das ohr als nachrichtenempfänger / Stuttgart. S. Hirzel verlag. 1967. Цвикер Э., Фельдкеллер Р. Ухо как приемник информации. Перевод с нем. Под ред. Белкина Б.Г. М.: Связь, 1971.
  5. Zwicker E. Procedure for calculating the loudness of temporally variable sounds // J. Acoust. Soc. Am. 1977. V. 62. P. 675–682. Erratum: J. Acoust. Soc. Am. 1978. V. 63. P. 283.
  6. Moore B.C.J., Glasberg B.R. A model for the prediction of thresholds, loudness and partial loudness // J. Audio Eng. Soc. 1997. V. 45. № 4. P. 224–239.
  7. Moore B.C., Glasberg B.R. Revision of Zwicker's loudness model // Acta Acustica. 1996. V. 82. P. 335–345.
  8. ISO 389-7: 2011. "Acoustics – Reference zero for the calibration of audiometric equipment – Part 7: Reference threshold of hearing under free-field and diffuse-field listening conditions" / ГОСТ Р ИСО 389-7: 2011. Акустика. Опорный порог слышимости при прослушивании в условиях свободного и диффузного звуковых полей.
  9. Санитарные правила РФ СП 2.5.3650-20 Санитарно-эпидемиологические требования к отдельным видам транспорта и объектам транспортной инфраструктуры.
  10. Fastl H., Zwicker E. Psychoacoustics: Facts and Models. Berlin Heidelberg: Springer. Springer-Verlag, 2007.
  11. ANSI/ASA S3.4-2007 Procedure for the computation of loudness of steady sounds (includes loudness program).
  12. DIN 45681-2005. Determination of tonal components of noise and determination of a tone adjustment for the assessment of noise immissions.
  13. ECMA-74. 2019. Measurement of airborne noise emitted by information technology and telecommunications equipment.
  14. Sato S., You J., Jeon J.Y. Sound quality characteristics of refrigerator noise in real living environments with relation to psychoacoustical and autocorrelation function parameters // J. Acous. Soc. Am. 2007. V. 122. P. 314–325.
  15. Теленев В.И. Громкость / В кн. Слуховая система. Под ред. Альтмана Я.А. Л.: Наука, 1990. С. 87–96.
  16. Namba S., Kuwano S., Kato T. The loudness of sound with intensity increment // Japanese Psychological Research. 1976. V. 18. P. 63–72.
  17. Pedersen B., Ellermeier W. Temporal weights in the level discrimination of time-varying sounds // J. Acoust. Soc. Am. 2008. V. 123. P. 963–972.
  18. Oberfeld D., Hots J., Verhey J.L. Temporal weights in the perception of sound intensity: Effects of sound duration and number of temporal segments // J. Acoust. Soc. Am. 2018. V. 143. P. 943–953.
  19. Moore B.C.J., Glasberg B.R. Modeling binaural loudness // J Acoust. Soc. Am. 2007. V. 121. P. 1604–1612.
  20. Moore B.C.J., Glasberg B.R., Varathanathan S., Schlittenlacher J. A loudness model for time-varying sounds incorporating binaural inhibition // Trends in Hear. 2016. V. 20. P. 1–16.
  21. Aures W. Ein Berechnungsverfahren der Rauigkeit (Метод расчета хриплости – ред.) // Acta Acustica united with Acustica. 1985. V. 58. P. 268–281.
  22. Sottek R. Progress in calculating tonality of technical sounds Proceed // Inter-Noise 2014. Melbourne, Australia, 2014.
  23. Sottek R. Psychoacoustically based tonality model for the evaluation of noise with tonal components // J. Acous. Soc. Am. 2015. V. 137. P. 2320–2320.
  24. Greco G., Bertsch L., Ring T., Langer S. Sound quality assessment of a medium-range aircraft with enhanced fan-noise shielding design // CEAS Aeronautical Journal. 2021. P. 12. P. 481–493.
  25. Зверев А.Я. Механизмы снижения шума в салоне самолета // Акуст. журн. 2016. Т. 62. № 4. С. 474–479.
  26. Копьев В.Ф., Остриков Н.Н., Яковцев М.А., Ипатов М.С., Кругляев А.Е., Сидоров С.Ю. Излучение звука из открытого конца канала, моделирующего воздухозаборник авиадвигателя в статических условиях и в потоке // Акуст. журн. 2019. Т. 65. № 1. С. 59–73.
  27. Муравейко А.С. Расчетное исследование газодинамических и аэроакустических характеристик вентилятора // Акуст. журн. 2020. Т. 65. № 4. С. 446–452.
  28. More S.R. Aircraft noise characteristics and metrics. PhD thesis, Purdue University, West Lafayette, Indiana, December 2010.
  29. Genuit K. Objective evaluation of acoustic – quality based on a Relative Approach // Conference Proc. Inter-Noise 1996. Liverpool, England, 1996.