

УДК 534.7

О ВЛИЯНИИ НИЗКОЧАСТОТНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ НА ЖИВЫЕ ОРГАНИЗМЫ

А. В. СОКОЛ, Г. И. СОКОЛ

*Днепропетровский национальный университет**Получено 26.03.2001, пересмотрено 2.07.2001*

Рассмотрено специфическое действие низкочастотных акустических колебаний на живые организмы, обусловленное тем, что резонансные частоты важнейших органов человека лежат в их диапазоне. Определены резонансные частоты и жесткость тела вредителя растений (колорадского жука). В лабораторных условиях зафиксирована гибель жука под действием акустических волн.

Розглянутий специфічний вплив низькочастотних акустичних коливань на живі організми, обґрунтований тим, що резонансна частота найважливіших органів людини знаходиться в їхньому діапазоні. Визначені резонансна частота і жорсткість тіла шкідника рослин (колорадського жука). В лабораторних умовах зафіксовано загибель жука під впливом акустичних хвиль.

Specific influence of the low-frequency acoustic waves on living beings are reviewed. The theme is based on the fact that resonant frequency of the most important human organs are in this frequency range. Resonant frequency and stiffness of insects harmful for plants (Colorado beetle) are defined. In the laboratory conditions death of the beetle under the influence of acoustic waves was stated.

ВВЕДЕНИЕ

Проблема охраны окружающей среды, особенно остро вставшая в XX столетии, неразрывно связана с исследованием и ликвидацией ряда факторов, неблагоприятно влияющих на организм человека. Одними из них являются низкочастотные акустические колебания и вибрации, в частности, инфразвук (ИЗ) и инфразвуковой шум (ИЗ-шум).

В СССР первые систематические исследования инфразвука как вредного производственного фактора принадлежат Э. Н. Мальшеву (Ленинградский институт инженеров железнодорожного транспорта). В его работах описаны источники инфразвука на предприятиях железнодорожного транспорта, изучено влияние инфразвука на организм человека, а также предложен ряд новых способов уменьшения интенсивности инфразвука [1]. Исследования, проведенные в различных странах мира – Франции [2–5], СССР [1, 5–8], США [9], Германии [10], Англии [11, 12], Японии [13], Китае [14], – и показавшие специфическое влияние ИЗ-волн на организм человека, вызвали широкий интерес к изучению ИЗ. В связи с этим следует отметить обзоры [1, 5, 7, 11, 12, 15–18]. В работах [1, 6, 13, 15–21] исследуется влияние ИЗ-шума на работников промышленности и разрабатываются его методы глушения.

В работах авторов Л. Римонов, V. Gavreu, Э. Н. Мальшева, М. А. Исаковича, А. В. Римского-Корсакова, В. Темпеста, Е. И. Андреевой-Галаниной, Н. И. Карповой [1–16] приведены дан-

ные о вредном воздействии низкочастотных акустических колебаний на обслуживающий персонал научных лабораторий промышленных и транспортных объектов.

С целью уменьшения влияния низкочастотных акустических колебаний на человеческий организм были разработаны и приведены к исполнению нормы безопасности при работе людей в условиях воздействия на них инфразвуковых колебаний “Гигиенические нормы инфразвука на рабочих местах” N 2274-80 [17]. Обычно воздействие акустических колебаний на живые организмы оценивается величиной звукового давления или уровнем звукового давления, выраженным в дБ (УЗД) [18, 22]. Нормы безопасности устанавливают следующие предельно допустимые уровни звукового давления: 110 дБ с включенной коррекцией шумомера “линейно” [18] по общему уровню, 105 дБ в октавных полосах со среднегеометрическими частотами 2, 4, 8, 16 Гц и 102 дБ в октавной полосе со среднегеометрической частотой 31.5 Гц. Согласно разработанным нормам, при уровне звукового давления 100 дБ и выше следует ограничивать время пребывания людей в зоне распространения ИЗ-волн. На рис. 1 приведен график зависимости уровней болевого порога и слухового восприятия от частоты [6]. Для измерений УЗД успешно применяется аппаратура бельгийской фирмы “Брюль и Кьер” [23] и немецкой фирмы, выпускающей измерительные приборы типа RFT [18].

Принято считать, что постоянный ИЗ-фон интенсивностью 34÷45 дБ не оказывает влияния на

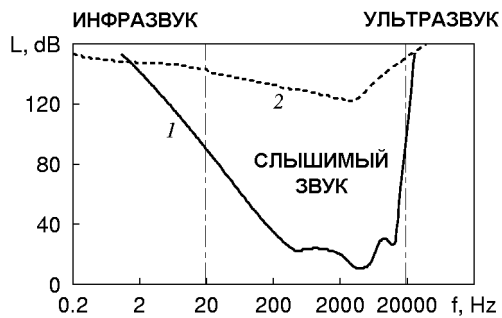


Рис. 1. Кривые слухового восприятия звуков
1 – болевой порог, 2 – порог слухового восприятия

здоровье и жизнедеятельность человека [16]. Органы слуха человека такие ИЗ-волны не воспринимают.

1. НИЗКОЧАСТОТНЫЙ АКУСТИЧЕСКИЙ ФОН

Рассмотрим, какой низкочастотный акустический фон в окружающей человека среде создают природные и промышленные источники. Согласно работе [18], низкочастотным считается шум, основные спектральные составляющие которого лежат в пределах октавных полос со среднегеометрическими частотами $2 \div 125$ Гц, а ИЗ-шумом – шум, спектр которого попадает в диапазон $2 \div 16$ Гц. С точки зрения решения практических задач охраны труда удобно принять следующее деление границ частот: верхняя частотная граница инфразвука равна 22.6 Гц, а нижняя – 1.4 Гц. Дело в том, что частотная полоса слышимых и неслышимых акустических колебаний у каждого человека индивидуальна. Л. Рimonov [5] предлагает раздвинуть частотную область ИЗ следующим образом: в качестве верхней границы ИЗ-частот полагается не 16 Гц, а $20 \div 30$ Гц.

Можно привести многочисленные примеры [15], в которых исследованы ИЗ-волны высокой интенсивности от природных и промышленных источников. Например, микросейсмические колебания земной поверхности с частотой $0.1 \div 1$ Гц создают постоянный ИЗ-фон над всей континентальной поверхностью планеты [16]. ИЗ, порождаемый штормом, имеет интенсивность от 50 до 90 дБ. Рождение ИЗ в результате срыва потока воздуха с гребней волн моря при возникновении минивихрей с тыльной стороны волн было обнаружено акад. В. В. Шулейкиным и названо “головом моря” [16, 24]. Во многих местах Тихого и

Атлантического океанов зарегистрирован периодический звук на частоте примерно 20 Гц [25]. Впервые запись этих сигналов была сделана в 1951 году в районе Бермудских островов. Их природа осталась неизвестной. При обтекании ветром неровной поверхности, в частности, горных массивов, генерируются ИЗ-волны. Явление такого рода названо “горными волнами” (см. [15]). ИЗ-волны присутствуют в атмосфере среди любого вида построек (Р. Ю. Винокур, см. [15]). ИЗ генерируется в атмосфере при наличии в ней грозových разрядов (J. L. Bahannon, K. Davies, T. M. Georges (см. [15])). Исследование ИЗ, порождаемых полярными сияниями, представлено в работах J. Chimonas и др. (см. [15]). ИЗ, генерируемый выстрелами, описан у Л. Рimonov [5].

Были проведены экспериментальные исследования наличия ИЗ на рабочих местах возле строительных машин. Экспериментальное и теоретическое исследования излучения ИЗ-волн при вибрациях шоссеиных мостов было выполнено N. K. Balachandran, K. Imaichi и др. (см. [15]). Исследования ИЗ при движении метеоров, скоростных поездов, электропоездов метрополитена, автомобильного городского транспорта можно найти в [15]. При преодолении летательным аппаратом барьера сверхзвуковой скорости в атмосфере возникают ударные волны, в спектре которых присутствуют ИЗ-частоты [5, 11, 15]. Генерация ИЗ в атмосфере при сверхзвуковом вертикальном движении источника типа летательного аппарата описана у А. П. Сливинского, порождаемый полетом ракет, – у Г. Р. Кашака (см. [15]). Задача оценки и снижения уровня ИЗ от пролетающих самолетов и вертолетов рассмотрена в работах Н. В. Горшкова, Ю. Г. Матвеева и др. Высокий уровень составляющих ИЗ в общем спектре шума авиационного двигателя был выявлен в помещении испытательной лаборатории во время испытаний реактивного двигателя самолета “Конкорд” в Англии (см. [15]).

Одним из источников НЧ-шумов авиационных, ракетных и автомобильных двигателей является шум горения топлива. Зарегистрировано, что жидкостные реактивные двигатели, которые можно рассматривать и как тепловые источники, генерируют в атмосфере волны с частотой $0.1 \div 2$ Гц, а реактивные двигатели твердотопливных ракет – волны значительно более высокочастотного диапазона [5]. Из работ академика В. В. Пилипенко и его соавторов [26–28] следует, что инфразвуковые колебания при движении ракет обусловлены продольными виброускорениями конструкции жидкостной ракеты.

Оценка НЧ-шума автомобильных двигателей

Табл. 1. Уровни интенсивности инфразвука от промышленных источников

ИСТОЧНИК	ЧАСТОТА, Гц	УРОВЕНЬ ИЗ, дБ
газотурбинные установки	2÷6	120÷133
поршневые компрессоры	4÷20	112÷123
тепловозы (выхлоп)	2÷32	123÷131
грузовые автомашины (выхлоп)	2÷32	117÷128
вибростенды, грохоты	2÷25	113÷127
промышленные воздуходувки	3÷12	110÷130
газотурбинные установки	2÷6	120÷133
поршневые компрессоры	4÷20	112÷123
тепловозы (выхлоп)	2÷32	123÷131

проведена в работах В. П. Докучаева, Ю. М. Заславского, Накаю Аритомо, Икегами Южи, Р. У. Бенсона (см. [15, 29]). Опубликованы данные по измерению уровней ИЗ от буровых вышек [4] или турбин [5]. Крупногабаритные машины и механизмы, работающие на промышленных предприятиях и транспорте, имеют вращающиеся звенья или лопасти большой массы. При определенной круговой частоте вращения этих звеньев в атмосфере генерируются инфразвуковые колебания [1]. Уровни интенсивности ИЗ-составляющих для ряда промышленных источников по данным [16] приведены в табл. 1.

На производстве часто встречаются случаи, когда общий уровень шума промышленной установки меньше допустимого, однако уровень ИЗ-составляющей превышает свою норму [16]. Так, измеренный уровень ИЗ около воздухозаборных шахт поршневых компрессоров с производительностью 10 м³/мин и давлением, превышающим 0.6 МПа, составил 108÷110 дБ, хотя общий уровень шума не превышал 97 дБ.

Отмечено наличие ИЗ-шумов на судах при работе нагнетательного трубопровода осевого и центробежного компрессора газотурбинной установки и топливного насоса (см. [15]). Был измерен ИЗ-шум с частотой 8÷12 Гц и уровнем интенсивности 130 дБ от газотурбинных установок с камерами сгорания, применяемых в качестве вспомогательных и аварийных двигателей на судах морского флота.

Физическая природа ИЗ, его действие на производственный персонал предприятий черной металлургии и методы его измерений исследованы в работе В. Н. Бринзы и его соавторов [18]. Здесь же рассмотрены методы защиты от воздействия ИЗ, разработаны способы снижения НЧ-акустических колебаний в источнике возникновения и на рабочих местах. Отмечено, что источники ИЗ имеются во всех основных и некоторых вспомогательных

цехах предприятий черной металлургии.

2. НИЗКОЧАСТОТНЫЙ ЗВУК И ВИБРАЦИИ КАК ФАКТОР БИОЛОГИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

2.1. Реакция биологических объектов на инфразвуковые колебания

В докладах по биоакустике, физиологической акустике и смежным направлениям, представленных на IX Международном конгрессе в Мадриде в 1977 г. было отмечено, что современные биоакустические исследования направлены, в основном, на изучение вредного воздействия шумов, в частности низкочастотных, на организм человека. У. Tokita рассматривает ИЗ как загрязнитель окружающей среды. N. Broner, R. T. Alfredson, T. T. Triggs предложили систему тестов, позволяющих проанализировать воздействие НЧ-шумов на человека при экспериментальных исследованиях. Те же авторы разработали критерии для прогнозирования мешающего действия ИЗ-шума высокого уровня.

Экспериментально удалось установить, что домашние животные слышат ИЗ-частоты в диапазоне 8÷12 Гц [16]. Ученые Корнельского университета (США) доказали, что домашние голуби слышат ИЗ-колебания частотой ниже 1 Гц. Высказано предположение, что таким образом птицы ориентируются в пространстве при дальних перелетах и обходят зоны штормов и извержений вулканов. Несколько лет тому назад выяснено, что слоны общаются между собой на расстояниях 50÷100 км с помощью ИЗ-сигналов, частота которых составляет 14÷24 Гц [16]. Есть предположение о генерировании ИЗ-волн мембраной, расположенной на голове слона в месте соединения хобота с черепом.

Механизмы генерации и восприятия ИЗ-волн

выяснены не у всех представителей животного мира. Тем не менее, те факты, что обитатели морей заблаговременно “знают” о приближении шторма, а животные чувствуют приближение землетрясений и извержений вулканов, свидетельствует о наличии у зверей, рыб и птиц органов, улавливающих ИЗ. В пользу этого предположения свидетельствует и тот факт, что аномальное поведение животных начинается за некоторое время до начала стихийных явлений, поскольку им предшествует генерация ИЗ-волн. Например, ИЗ от появления микротрещин в земной коре вполне может служить сигналом о предстоящей стихии. По этой причине японцам рекомендуется дома иметь аквариум со специальной белой рыбкой, которая за несколько часов до начала землетрясения начинает беспокойно себя вести [16]. В настоящее время выяснено, как улавливает ИЗ медуза. Она имеет маленький пузырек-колбочку, заполненный студенистой массой и висящий на стебельке тела медузы. В центре колбочки имеется маленький известковый шарик. Колебания воды, предшествующие стихии, вызывают изменение положения тела медузы, шарик смещается и соприкасается со стенкой колбочки, раздражая имеющиеся там нервные окончания. Улавливая ИЗ задолго до начала шторма, медуза уплывает в глубины моря, спасаясь от бури [16].

При полете саранчи генерируются звуковые волны с частотами $17 \div 20$ Гц, которые имеют важное значение для поведения насекомых. Воспроизведение этих звуков, записанных на магнитную ленту, приводит к тому, что стая саранчи взлетает. Насекомые с поврежденными органами слуха не поднимаются в воздух при действии такого звука. Это означает, что звук полета стаи является акустическим раздражителем, определяющим поведение насекомых (см. [15]).

Экспериментально выведена зависимость болевого порога и порога слышимости от частотного диапазона в Гц и уровня интенсивности звука в дБ [5, 30–32].

Ch. W. Nixon исследовал реакцию слуховой системы человека на интенсивный ИЗ (см. [15]). В работе японского ученого Nishiwaki Niichi [13] представлены данные по инфразвуковой шумовой восприимчивости и шумовому порогу человеческого уха в диапазоне частот $1.5 \div 50$ Гц. Результаты исследований показали, что при изменении уровня интенсивности от 100 до 130 дБ в области частот $0 \div 4$ Гц восприимчивость человеческого уха падает.

Исследования влияния ИЗ на организмы людей показали, что низкочастотные волны могут вы-

зывать сильную боль в ушах, нарушение работы вестибулярного аппарата [32]. Воздействие ИЗ вызывает ощущение вращения, раскачивания тела, потери равновесия, произвольные повороты глазных яблок, появление чувства дискомфорта, тревоги, иногда, страха. В ряде экспериментов [11, 16] оказывалось влияние ИЗ на органы слуха человека через наушники, представляющие собой два микрофона мощностью по 15 Вт диаметром около 30 см. Эксперименты подтвердили отрицательное действие ИЗ на организм – появлялись головная боль, тошнота, головокружение.

Эксперименты по изучению влияния ИЗ на людей показали, что воздействие колебаний с частотами $2 \div 15$ Гц и интенсивностями $95 \div 105$ дБ вызывает замедление зрительной реакции, увеличивает число ошибок при слежении за измерительными приборами, нарушает функции вестибулярного аппарата [5, 6, 11, 16]. В научно-исследовательском институте строительной физики (НИИСФ) исследования по изучению действия ИЗ на организмы людей проводились в специальных камерах. Камера представляла собой кабину объемом около 8 м^3 , изготовленную из стали (лист толщиной 2 мм) и оклеенную изнутри листовой резиной [15, 16]. Электродинамическим или гидродинамическим способом в камере генерировался ИЗ одной частоты или шум с ИЗ-составляющей. Результаты воздействия определялись по субъективным данным испытуемого. Установлено, что шум в частотном диапазоне $2 \div 15$ Гц с интенсивностью 105 дБ замедляет зрительную реакцию в два раза у половины проверяемых. При уровне шума 95 дБ возрастает количество ошибок при слежении за стрелочным индикатором на 10 %. Замечено также судорожное подергивание глазного яблока и нарушение функции вестибулярного аппарата. W. J. Donn (см. [15]) описал такие же симптомы у летчиков и космонавтов при воздействии ИЗ на их организмы. И. А. Вартамян [32] описывает появление болезненных ощущений во внутренних органах людей, длительное время находившихся вблизи аэродромов и ракетных полигонов. Появление таких симптомов обусловлено наличием сверхнизких звуковых частот в спектре шума реактивных двигателей.

Обширные исследования источников инфразвука проводятся в НИИ строительной физики (Москва), а исследования влияния инфразвука на человека – в Ленинградском санитарно-гигиеническом медицинском институте [6] и НИИ гигиены труда и профзаболеваний Российской АМН (Москва) [18]. По данным, представленным в работе [18], при воздействии инфразвука возникают

разнообразные симптомы, которые проявляются как в виде вегетативных, так и психологических дискомфортных ощущений. При воздействии инфразвука возникают сотрясения грудной клетки и брюшной полости, появляется состояние, напоминающее морскую болезнь, страдает вестибулярный аппарат, появляются головокружение, тошнота. В результате длительного воздействия НЧ-колебаний развивается значительная астения, приводящая к физическому упадку сил, в отдельных случаях снижается способность к умственной деятельности, появляются раздражительность, нарушения сна. У некоторых лиц добавляется нейровегетативные нарушения и даже возникают психические нарушения, выражающиеся в виде беспокойства, тревоги. Есть данные о скрытом влиянии длительного инфразвука на миокард. Отмечается, что чувствительность людей к инфразвуку в значительной мере индивидуальна.

Наиболее частыми последствиями воздействия ИЗ на организм являются такие его функциональные расстройства, как изменение ритмов дыхания и биений сердца, расстройства работы желудка и центральной нервной системы, головные боли. Инфразвук больших уровней (более 140 дБ) при кратковременном воздействии вызывает тошноту, боли в желудке, головные боли, головокружение, чувство беспокойства. Воздействие на человека, занимающегося умственной деятельностью, едва воспринимаемым на слух ИЗ вызывает у него тошноту и приводит к утомлению уже через два часа [33–35].

Моделирование генерации шума стенозом, образовавшимся в сосуде, выполнил А. А. Борисяк [35]. В работе приведены спектры акустической мощности звукового поля, генерируемого потоком крови в сосуде со стенозом. Пики акустической мощности находятся в диапазоне $1 \div 20$ Гц.

Физиологи Уивер и Брей [16] установили прямую связь между частотой звука, воздействующего на слуховой нерв человека, и частотой изменения биопотенциала этого нерва. Предполагается, что интенсивное воздействие ИЗ может вызвать угнетение нормальных ритмов мозга (например, альфа-ритмов) через воздействие на биопотенциал слухового нерва, что отрицательно сказывается на психике. Полученные результаты совпадают с данными работы Т. И. Батуриной (см. [15]).

А. Г. Щеглов и Е. М. Баранов рассмотрели влияние ИЗ на функциональное состояние клеток центральной нервной системы и пришли к выводу, что ИЗ действует на них угнетающе (см. [15]). О схожести нервных процессов при восприятии звука и ощущении вибрации доложил Г. Бекеш. Пси-

хологические эффекты при воздействии на живые организмы звуком и ИЗ изучались в экспериментах с глухими животными (см. [15]).

Ультраструктурные изменения печени и поджелудочной железы в результате действия ИЗ описали в своей работе С. В. Алексеев, А. В. Кадыскин, А. В. Рейсканен (см. [15]). Плохое самочувствие у людей при воздействии ИЗ высокой интенсивности зафиксировано не только в специальных экспериментах, но и в высотных жилых зданиях [16], где на верхних этажах измерен ИЗ высокого уровня (до 130 дБ). При появлении ветра и шумных перемещений групп людей зафиксирована вибрация с частотой $0.1 \div 10$ Гц. Этим обусловлено наличие дискомфорта у людей, живущих на верхних этажах.

Создан экспериментальный комплекс для изучения воздействия НЧ-колебаний на организм человека, а также дан анализ колебательных характеристик черепа человека (см. [15]). Динамика клеточных реакций при действии ИЗ на клетки представлена в работах Н. И. Карповой и ее соавторов [6]. Влияние на динамику потребления человеком кислорода при воздействии на него ИЗ-волн исследовала А. Г. Санова (см. [15]). В работе [18] было показано, что при частотах $1 \div 3$ Гц возможна кислородная недостаточность и, в некоторых случаях, удушье. При воздействии на организм инфразвука этих частот нарушается естественный ритм дыхания, вследствие чего легкие работают с неполной нагрузкой.

Вопросы, связанные с возникновением ИЗ-шума внутри шоссейного транспорта и его влиянием на людей, рассматривались А. И. Иванниковым [36], В. К. Рао и Т. К. Демпси (см. [15]). Так, при уровне ИЗ-шумов в машинном отделении судна 118 дБ на частоте 7 Гц (пиковое значение) у мотористов выявлены головокружение, вялость, потеря равновесия.

В работе [16] описана серия экспериментов, демонстрирующих влияние ИЗ-волн на крыс, собак и овец. Частота колебаний лежала в диапазоне $6 \div 8$ Гц. Отмечено, что при повышении интенсивности воздействия у животных появлялось учащенное сердцебиение, а затем происходила остановка сердца. Вскрытие показало наличие разрыва кровяных сосудов.

Как известно, органы *in vivo* могут рассматриваться как колебательные системы и, следовательно, обладают собственными резонансными частотами. Диапазоны значений этих частот для органов и частей тела человека по данным [16] представлены в табл. 2. Вредное влияние ИЗ на живые организмы особенно ощутимо при совпаде-

Табл. 2. Резонансные частоты органов и частей тела человека

ОРГАН (ЧАСТЬ ТЕЛА)	ЧАСТОТА, Гц
голова	20 ÷ 30
глаза	40 ÷ 100
вестибулярный аппарат	0.5 ÷ 13
сердце	4 ÷ 6
позвоночник	4 ÷ 6
желудок	2 ÷ 3
кишечник	2 ÷ 4
почки	6 ÷ 8
руки	2 ÷ 5

нии резонансных частот отдельных органов и ИЗ-частот [5]. Установлено, что в диапазоне частот 5 ÷ 9 Гц наибольшие амплитуды колебаний имеют внутренние органы, расположенные под диафрагмой, что приводит к болезненным ощущениям как в нижней части живота, так и в грудной клетке. Чтобы уменьшить болевой синдром, человек пытается ограничить подвижность органов за счет сдавленного дыхания.

Боли в пояснице наступают в диапазоне частот 8 ÷ 12 Гц, а при более высоких частотах появляются болезненные симптомы, например, в полости рта, гортани, мочевом пузыре, прямой кишке, а также в некоторых мышцах. Если человека подвергать воздействию этих колебаний неоднократно в течение длительных периодов времени, то можно ожидать, что в его организме разовьются значительные патологические изменения.

В работе О. Окаі (см. [15]) отмечено, что воздействие на организм ИЗ-волн с частотой 10 и 25 Гц и уровнем интенсивности 80 и 100 дБ ведет к уменьшению частоты сокращений сердца. Отмечено также вредное влияние ИЗ-частот на состояние периферического кровообращения (см. [15]).

Профессор V. Gavreu [2, 3, 17] полагает, что наиболее опасны для человека ИЗ-волны с частотой 4 ÷ 8 Гц. Во время работы над новой конструкцией генератора ИЗ-волн сотрудники лаборатории научно-исследовательского центра в Марселе (Франция) почувствовали на себе действие ИЗ [2–5, 16, 30]. Они испытывали настолько сильную вибрацию желудка, сердца, легких, что это вызвало резкие болевые ощущения.

Следует отметить, что в некоторых исследованиях не замечено какого-либо существенного вредного воздействия ИЗ на живые организмы. Авторы работы [15], сравнивая состояния организма после действия ИЗ и алкоголя, утверждают, что ИЗ оказывает значительно меньшее влияние

на организм, чем алкоголь. Имеются также данные, свидетельствующие о полезном действии ИЗ-колебаний на организмы людей. ИЗ с очень высоким уровнем интенсивности (до 170 дБ) применяли в офтальмологии для массажа тканей глаза после операции. Замечено, что такой массаж способствует заживлению без последующего отслоения прооперированных тканей, причем процент больных, на которых сказалось положительное действие массажа инфразвуком, очень высок.

2.2. Защита от вредного воздействия инфразвука

В настоящее время ведется активный поиск всевозможных путей защиты от вредного воздействия ИЗ и НЧ-вибраций [1–16, 37]. Специалисты пришли к выводу, что в данном случае традиционные средства и меры борьбы малоэффективны или вообще непригодны [1–8, 11, 14]. Определены основные направления работ по снижению уровней интенсивности ИЗ и НЧ-вибраций: ослабление ИЗ в источнике, создание глушителей и звукопоглощающих материалов, создание индивидуальных средств защиты, медицинская профилактика.

В зависимости от конкретной ситуации используются различные методы ослабления НЧ-шума в источнике его возникновения [18]. Приведем ряд примеров. Созданы способы гашения ИЗ в источнике при работе виброплощадок [16]. В лаборатории V. Gavreu экспериментально опробована система клапанов для “выпрямления” (сглаживания амплитуд) НЧ-волн [34]. Для глушения ИЗ при всасывании воздуха компрессорной станцией используется глушитель шума Э. Н. Малышева [1]. Снижение интенсивности ИЗ происходит внутри камеры за счет изменения ее внутреннего объема в противофазе с основной ИЗ-волной. В случае применения глушителей такого типа в системах двигателей внутреннего сгорания интенсивность ИЗ снижается более, чем на 10 дБ.

Следует также отметить, что источник излучения ИЗ не должен находиться в пределах замкнутого производственного помещения относительно небольшого объема. Виброактивные агрегаты (грохоты и др.), в особенности установленные не на фундаменте нулевого цикла, должны снабжаться виброизоляторами. Пол над ними должен быть по возможности перфорированным [18].

Наряду с подавлением НЧ-шумов в источнике их возникновения следует располагать рабочие места обслуживающего персонала возможно дальше от таких источников [18]. В частности, воздухозаборные отверстия мощных газодинамиче-

ских установок должны быть расположены на расстоянии, не менее $15 \div 20$ м от постоянных рабочих мест и возможно дальше от административно-бытовых помещений, причем увеличение расстояния в два раза снижает УЗД инфразвука примерно на 6 дБ [18]. В данном случае важно чисто геометрическое удаление, а выделение источников инфразвука в отдельное помещение имеет второстепенное значение [18].

В мероприятиях по снижению уровня НЧ-шумов важное значение имеют герметизация и звукоизоляция помещений обслуживающего персонала. В ряде экспериментов замеры, проведенные в этих помещениях, показали, что уровень ИЗ здесь может быть выше, чем в зоне шумящих машин. Так, в одном из замеров на частоте 12 Гц уровень ИЗ около механизмов в машинном зале составил 79 дБ и 100 дБ, а в пультовой, расположенной на расстоянии в несколько десятков метров – 110 дБ [37]. Данное явление объясняется наличием щелей в окнах и дверях. Замкнутое помещение может рассматриваться как резонатор Гельмгольца, в который через щели проникают звуковые волны и там усиливаются. Поэтому для снижения НЧ-шума следует герметизировать помещения обслуживающего персонала.

Снижение шума достигается также за счет использования акустических резонансных поглотителей, разработанных К. А. Велижаниной из МГУ и ее коллегами из НИИСФ [16, 37]. Поглотители подвешиваются к потолкам помещений и представляют собой резонаторы с жесткими стенками, в лицевой панели которых есть щель. На некотором расстоянии от щели внутри полости резонатора или снаружи него устанавливается жесткий (дифракционный) экран. Потери энергии звуковой волны происходят за счет вязкости и теплопроводности воздуха в зазоре между экраном и лицевой панелью. Коэффициент звукопоглощения достигает 0.68.

Для работы обслуживающего персонала используются звукоизолирующие кабины [1, 16], представляющие собой металлические тонкостенные конструкции, в которые можно вводить дополнительные ребра жесткости через каждые 0.5 м [18]. Разработанная инфразвукоизолирующая замкнутая оболочка представляет собой коробчатую конструкцию почти прямоугольной формы с размерами $4 \times 6 \times 2$ м, изготовленную из сварных листов алюминий-магниевого сплава толщиной 30 мм. Углы оболочки скруглены, правая и левая части имеют шаровую поверхность радиуса 4.8 м. Внутри к оболочке приварены ребра жесткости – полосы толщиной 30 мм и высотой 160 или 300 мм

(два варианта). Между ребрами оболочка покрыта вибропоглощающими мастиками “Антивибрит-5” и “Антивибрит-7” и звукопоглощающим материалом – эластичным полиуретаном.

Таким образом, стенка оболочки имеет четыре слоя: металл, два слоя вибропоглощающих мастик и звукопоглощающий материал. Толщина вибропоглощающего покрытия составляет 70 мм, а толщина звукопоглощающего материала 100 и 200 мм (два варианта). На величину инфразвукоизоляции оказывают влияние высота ребер жесткости и толщина вибропоглощающего покрытия. Экспериментальная эффективность звукоизоляции составила на модели 50 дБ в диапазоне частот $5 \div 25$ Гц. Столь высокая инфразвукоизоляция оболочки обусловлена ее большой жесткостью, а также большими потерями энергии колебаний. Для достижения большой инфразвукоизоляции замкнутой оболочки ее размеры должны быть значительно меньше длины волн инфразвука. При этом условии оболочка при воздействии инфразвука будет испытывать деформации растяжения, а не изгиба и сдвига.

По результатам расчетов резонансных частот помещений должны приниматься конструктивные меры для расстройки собственных частот замкнутых помещений и частот действующего инфразвука. В частности, это можно осуществить изменением массы двери, ведущей в помещение [18].

К работам по исследованию поглощения и гашения низкочастотных акустических волн относятся работы по поглощению упругих волн в тонком слое зернистой среды и по моделированию нелинейной модели резонатора Гельмгольца с подвижной стенкой [38, 39].

Отметим, что индивидуальные средства защиты от инфразвука весьма ограничены. Существуют, например, специальные пояса, снижающие степень сотрясения органов брюшной полости и грудной клетки под воздействием ИЗ с частотой $4 \div 8$ Гц [16].

В дополнение к вышеизложенному, согласно рекомендациям медиков-гигиенистов, лица, поступающие на работу с оборудованием, генерирующим инфразвук и НЧ-шум, должны подвергаться предварительному и периодическим медицинским осмотрам [1, 17, 18]. Противопоказанием к такого рода деятельности являются различные нарушения вестибулярной и слуховой функций, выраженные неврозы, вегетативная дисфункция, органические заболевания центральной нервной системы, психические заболевания, заболевания сердечно-сосудистой системы, органов пищеварения. При проведении периодических медицинских осмотров

большое внимание должно уделяться субъективным жалобам рабочих (утомление, головная боль, головокружение, тошнота, страх, нарушение сна). Для работающих с инфразвуком большое значение имеет правильный режим труда и отдыха. Для отдыха рекомендуется [1] введение 20-минутного перерыва в изолированном помещении через каждые два часа работы, а также сокращение рабочего дня в зависимости от уровня инфразвука, воздействующего на работающих. Лица, моложе 18 лет, к работе на оборудовании, генерирующем инфразвук, не допускаются.

С медицинской точки зрения важны профилактические осмотры работающих в шумных цехах. Если у работников выявлены беспричинный страх, изменения в слуховой, вестибулярной, нервной, сердечно-сосудистой системах, то в цехе необходимо провести замеры уровней шума на ИЗ-частотах. В случае обнаружения уровня ИЗ, выше 100 дБ, должны быть приняты меры по снижению уровня ИЗ или введены дополнительные перерывы для работающих с переводом их в изолированное от ИЗ помещение на 20 минут [17, 40].

Следует отметить, что успешное решение проблемы снижения вредного влияния НЧ-шума на человека может быть осуществлено комплексным применением всех известных методов его подавления.

3. ГУБИТЕЛЬНОЕ ДЕЙСТВИЕ АКУСТИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ НА ВРЕДИТЕЛЕЙ РАСТЕНИЙ

Описанные эффекты являются предпосылкой для создания акустического способа, предназначенного для смертельного действия на организмы вредных насекомых, основанного на облучении их интенсивным звуком на частотах, близких к собственным частотам их жизненно важных органов. По сравнению с известными механическими, химическими, биологическими и другими способами, акустический способ обеспечивает снижение трудоемкости работ по уничтожению вредного насекомого с одновременным отсутствием эффекта токсичности.

Для разработки акустического способа уничтожения вредного насекомого необходимо знать три основных величины: массу тела вредного насекомого, жесткость и резонансную частоту тела. Исходя из этих предпосылок, авторами [41] была сформулирована цель научно-исследовательской работы: провести исследование воздействия акустических колебаний на вредное насекомое. При этом решались следующие задачи:

- определение массы, жесткости и резонансной частоты тела вредного насекомого,
- проверка акустического способа уничтожения вредного насекомого в лабораторных и полевых условиях,
- апробация разработанного устройства в виде действующего макета.

3.1. Экспериментальное определение массы, жесткости и резонансной частоты тела колорадского жука и воздействие акустическими волнами на тела вредных насекомых в условиях лаборатории

При исследовании вибрации вредного насекомого как цельного биологического объекта или отдельных его органов под действием внешних механических возмущений (акустических колебаний) тело следует рассматривать как систему, состоящую из механических элементов, обладающих инерционными, упругими и демпфирующими свойствами. Упругое поведение тела моделируется с помощью пружины, а вязкое – с помощью поршня в цилиндре. Поведение реальной системы представляется и математически моделируется с помощью различных вязких и упругих элементов. Поэтому разрыв тел, органов или тканей вредного насекомого, ведущий к его уничтожению, можно осуществить, применив воздействие колебательного характера [42, 43] (посредством возбуждения вибрационных или акустических колебаний).

Уравнение, описывающее движение вязкоупругой системы с массой m и жесткостью k , является типичным уравнением колебаний вида

$$\ddot{\gamma} + (c/m)\dot{\gamma} + (k/m)\gamma = a(t),$$

где c – коэффициент демпфирования; γ – деформация; a – заданное ускорение тела; t – время. Резонансная частота слабо демпфированной системы очень близка к

$$f = 1/2\pi\sqrt{k/m}.$$

В литературе приводятся данные об экспериментальных исследованиях, позволяющих определить массу m , жесткость k и резонансную частоту f воздействующих колебаний [44]. Очевидно, что разрыв тканей и биологическая смерть вредного насекомого при воздействии на него вибрационных колебаний должны свидетельствовать о том, что найдена резонансная частота тела f . Жесткость тела k определяется расчетным путем после определения массы тела m и резонансной частоты.

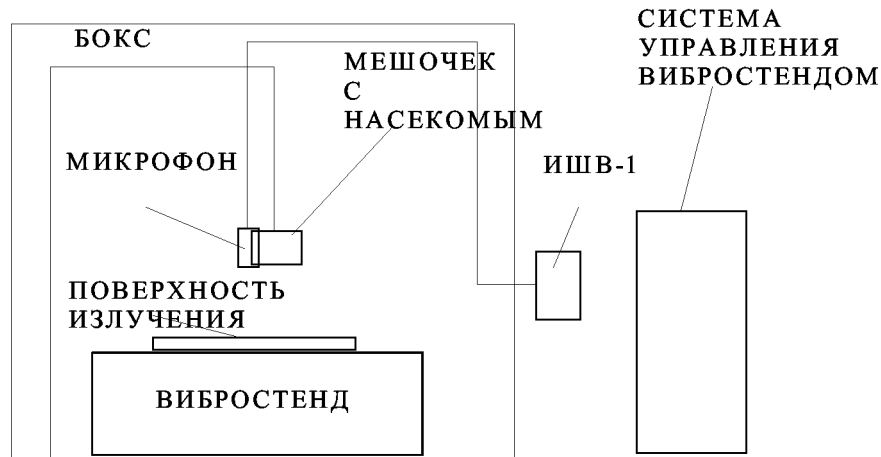


Рис. 2. Блок-схема испытательного стенда

Экспериментальное определение жесткости и резонансной частоты тела колорадского жука в лаборатории проводились следующим образом. В качестве измерительного оборудования использовались весы и вибростенд УВЭ-100/5-3000. Предварительно каждое из испытуемых насекомых было взвешено с точностью ± 0.005 г и маркировано красной краской. Каждое испытуемое насекомое находилось в марлевом мешочке, который крепился к столу вибростенда. После воздействия вибраций каждое насекомое осматривалось и раскладывалось по емкостям с двумя другими насекомыми не подвергавшихся испытаниям (контрольными экземплярами). Испытанию в виде вибрационного воздействия в помещении лабораторного бокса подверглись 8 вредных насекомых массой $100 \div 200$ мг. Частота воздействующих колебаний для отдельных насекомых была фиксирована и задавалась последовательно в пределах частотного диапазона от 500 до 2500 Гц. Продолжительность воздействия вибраций составляла около двух минут.

На основе данных внешнего осмотра насекомых биологическая смерть испытуемого насекомого массой 100 мг была зарегистрирована через 4 часа после воздействия на него вибраций с частотой 1500 Гц. Непосредственный осмотр этого насекомого сразу после воздействия вибраций показал, что все его органы движения были сильно травмированы.

На основе этих данных рассчитана жесткость тела насекомого, величина которой составила: $k \approx 8.86 \cdot 10^3$ Н/м (прикидочный расчет величины жесткости печени человека дал величину $4 \cdot 10^3$ Н/м).

Для лабораторного опробования акустического метода уничтожения вредных насекомых использовались вибростенд и весы. На рис. 2 представлена блок-схема испытательного стенда [42, 43, 45].

Масса вредных насекомых, подвергнутых воздействию акустическими волнами, составляла $100 \div 120$ мг. Время воздействия было ограничено $2 \div 3.5$ минутами при фиксированной частоте в диапазоне $900 \div 1100$ Гц. Насекомое подвешивалось в марлевом мешочке со стороны стола вибростенда на расстоянии от поверхности стола, равном $0.2 \div 0.7$ м. Уровень звукового давления измерялся микрофоном шумомера ИШВ-1. Микрофон находился рядом с телом вредного насекомого. Зафиксированный микрофоном уровень звукового давления составил $95 \div 120$ дБ.

Осмотр вредных насекомых непосредственно после воздействия показал отсутствие признаков жизни у жука массой 110 мг, подвешенного на расстоянии 0.2 м от стола вибростенда и подвергнутого воздействию акустических волн частотой 1000 Гц в течение 2 мин. При этом уровень звукового давления составлял 120 дБ. Осмотр вредного насекомого через 6 часов окончательно подтвердил наступление биологической смерти указанного насекомого.

Проведенный осмотр вредных насекомых через 24 часа выявил, что наступила биологическая смерть всех вредных насекомых, подвергшихся акустическим воздействиям. Полученные результаты подтвердили возможность уничтожения вредных насекомых акустическими волнами. При этом важно подчеркнуть, что частотный диапазон эффективного воздействия на колорадского жука лежит в безопасной для человека области.

3.2. Акустический способ уничтожения вредных насекомых и устройство для его осуществления

Авторами разработан и защищен патентом Украины акустический способ уничтожения вредного колорадского жука и устройство для его осуществления [46]. С целью определения патентной чистоты акустического способа был составлен обзор патентной литературы по имеющимся способам и устройствам, предназначенным для уничтожения насекомых – вредителей сельскохозяйственных растений. В результате был сделан вывод о том, что акустический способ уничтожения вредных насекомых является новым и до настоящего времени не был разработан.

Акустический способ уничтожения колорадского жука заключается в механическом воздействии на тело и ткани органов жука давлением, приводящим к их разрыву. Способ от разработанных ранее отличается тем, что воздействие производится акустическими колебаниями с амплитудой звукового давления, равной отношению силы разрыва соединительных тканей и органов жука к их площади сечения, и частотой, равной собственной частоте тела жука или одного из его жизненно важных органов.

Запатентованное устройство [46] содержит генератор сигналов и динамик, соединенных электрически. Устройство отличается от ранее разработанных тем, что оно снабжено усилителем сигналов и концентратором акустического поля. Генератор генерирует тональные сигналы. При этом усилитель сигналов электрически связан с генератором тональных сигналов и динамиком, а концентратор акустического поля жестко связан элементами крепления в виде рамы и стоек с динамиком. Концентратор сигналов выполнен в виде колпака с жесткими стенками. Высота и диаметр наибольшего поперечного сечения колпака соответствует высоте и диаметру куста картофеля с колорадским жуком.

Устройство работает следующим образом. Генератор сигналов, смонтированный на раме, вырабатывает электрические сигналы определенной амплитуды и частоты, усиливаемые усилителем сигнала и передающиеся кабельной сетью на динамик, излучающий в воздушную среду акустические волны с заданными амплитудно-частотными параметрами. Акустическое поле создается внутри жесткого колпака, в малом доньшке которого установлен динамик. Жесткие стенки колпака не позволяют рассеиваться акустической энергии за пределами внутреннего пространства колпака,

концентрируя ее под колпаком. Колпак накрывает куст картофеля и сидящих на нем вредных насекомых. Акустические волны с силой избыточного давления действуют на тело и органы жука, что приводит к их разрыву, и, как результат, к гибели жука. Акустические волны, распространяясь до поверхности почвы, эффективно воздействуют также на упавших насекомых.

Описанное устройство имеет значительно меньше элементов и составляющих частей, чем уже работающие установки, уничтожающие жука чисто механическим способом. Здесь исключен ряд операций, таких как сбор насекомых в специальные контейнеры. Ненужными становятся приспособления в виде вентиляторов и вибраторов для сдува или стряхивания насекомых в контейнеры. Исключена возможность выживания жука при его падении на поверхность почвы. Не нужна также операция сбора жука с земли.

4. Экспериментальное исследование действия акустических волн на вредителей сельскохозяйственных растений в полевых условиях

Для проведения экспериментальных исследований с целью подтверждения предложенного способа [47, 48] осуществлено проектирование и изготовление действующего макета акустического генератора (АГ).

Испытание воздействия акустических волн на вредных насекомых проводилось в условиях дачного участка. Для проведения испытаний и осуществления необходимых измерений была собрана схема, состоящая из генератора (АГ) и измерительных приборов, представленная на рис. 3.

Куст картофеля, на котором находились вредители, полностью накрывался концентратором акустической энергии, входящим в конструкцию АГ. Это позволяет использовать акустическую энергию наиболее рационально, а также дает выигрыш в весе и в габаритах. Сечение кабеля НК выбрано достаточно большим, чтобы снизить электрические потери мощности. Применение в схеме согласующего устройства СУ дало возможность использовать усилитель DISCO 240E. Задающий генератор ГЗ (промышленный образец генератора типа ГЗ-33) способен работать в диапазоне частот $20 \div 200$ Гц. Анализирующий и вычислительный комплекс включал в себя МК и запитывался от сети с напряжением 220 В.

Микрофон устанавливался на расстоянии 0.35 м от излучающей поверхности динамиков. Это расстояние выбиралось из тех соображений, что измерение уровней звукового давления должно быть

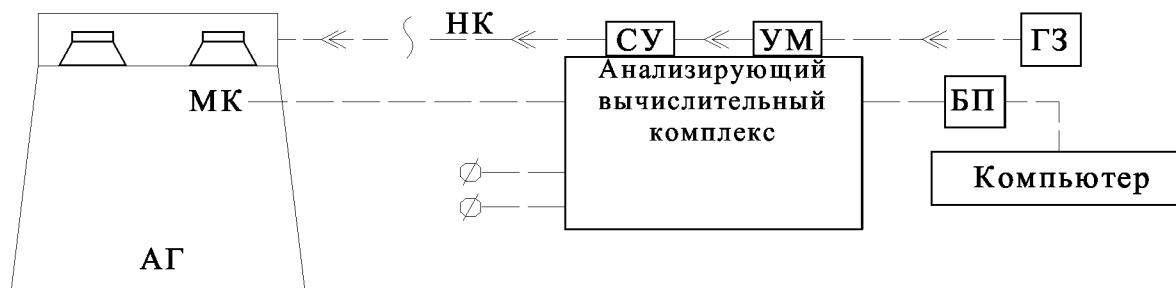


Рис. 3. Схема акустической установки для борьбы с колорадским жуком:
 АГ – акустический генератор, НК – низкочастотный кабель, СУ – согласующее устройство,
 УМ – усилитель мощности, ГЗ – генератор задающий, МК – микрофон, БП – блок питания

проведено в дальнем поле. На практике дальним считают акустическое поле на расстоянии свыше длины волны, которая для частоты 1000 Гц составляет 0.34 м.

На рис. 4 представлен типичный спектр звукового давления, зафиксированного в процессе экспериментов. Анализ данных контроля измерений показал, что звуковое давление в процессе облучения насекомых не превысило 6 Па, что соответствует уровню 110 дБ. Измеренная электрическая мощность, потребляемая акустическим излучателем, оказалась в 3.5 раза ниже ожидаемой и составила 5 Вт.

Внешний осмотр колорадских жуков непосредственно после облучения, а также через 2, 5 и 12 часов показал, что все вредные насекомые остались живы. Причиной этого может служить недостаточность уровня звукового давления, достигнутого при полевых испытаниях. Следует отметить вялость вредных насекомых, подвергнутых акустическому воздействию.

Никакого влияния акустических волн на посадки картофеля не было обнаружено на протяжении всего периода, включающего момент уборки урожая.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Природные, промышленные и транспортные источники ИЗ-волн создают в окружающей среде низкочастотный фон, уровень звукового давления в котором носит неравномерный характер и может оказывать неблагоприятное воздействие на биологические объекты.
2. Согласно разработанным нормам, при уровне звукового давления 100 дБ и выше следует ограничивать время пребывания людей в зо-

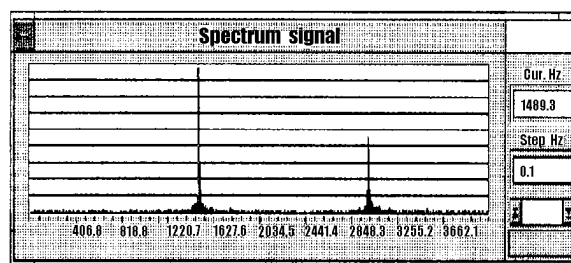


Рис. 4. Частотный спектр звукового давления, зафиксированного в полевых экспериментах

не распространения ИЗ-волн. Согласно установленному регламенту проверок, необходимо проводить измерения уровня ИЗ-волн в окружающей среде, распространяющихся от работающих промышленных объектов, и применять меры, позволяющие снизить высокие уровни ИЗ. Лица, работающие в зоне допустимых уровней ИЗ, должны проходить периодические медицинские осмотры.

3. Определены основные направления работ по снижению уровней интенсивности ИЗ и НЧ вибраций: ослабление ИЗ в источнике, создание глушителей и звукоизолирующих материалов, разработка индивидуальных средств защиты.
4. На основе анализа данных об угнетающем воздействии ИЗ-волн на живые организмы разработан способ и создано устройство для борьбы с насекомыми – вредителями сельскохозяйственных растений на основе резонансного акустического воздействия на их жизненно важные органы. В ходе этих работ экспериментально получены оценочные значения массы, жесткости и резонансной частоты тел

вредных насекомых.

5. В лабораторных условиях опробовано губительное действие акустических волн на колорадского жука. Эффект гибели насекомого получен для особей массой 100 мг при воздействии звуком с частотой 1500 Гц и уровнем звукового давления 120 дБ.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают свою признательность академику НАН Украины, проф. В. Т. Гринченко, докт. физ.-мат. наук, проф. И. В. Вовку и канд. физ.-мат. наук В. Н. Олійнику за ряд полезных советов и замечаний, высказанных в ходе подготовки и обсуждения статьи.

1. *Малышев Э. Н.* Исследование инфразвука как вредного фактора и пути снижения его интенсивности на предприятиях железнодорожного транспорта.– Л.: Дисс. канд. техн. наук, 1972.– 176 с.
2. *Gavreu V.* Infra-sons: generated, detecteurs, proprietes physiques, effects biologiques // 5th Congress Internationele of Acoustics.– 1965.– N 1.– P. 1–4.
3. *Gavreu V.* Infrasound // *Sci. J.*– 1968.– 4, N 1.– P. 33–37.
4. *Contple renolu du Colloque international sur les infra-sons (Colloq. Int. CNRS, N 232).*– Paris: CNRS, 1973.– 435 p.
5. *Pimouov L.* Les infra-sons.– Paris: CNRS, 1976.– 277 p.
6. *Карпова Н. И., Малышев Э. Н.* Низкочастотные акустические колебания на производстве.– М.: Медицина, 1980.– 160 с.
7. *Исакович М. А., Шмакова Н. Е.* Инфразвук. Обзор литературы за период 1968–1977 гг.– М.: ЦНИИ “Румб”, 1978.– 93 с.
8. *Акин М.* Акустика в промышленности // Тр. 1 сессии Рос. акуст. общ-ва, 10–11 ноября 1992.– ВОС, 1992.– С. 2–4.
9. *Johnson D. L.* Infrasound, its sources and effects of man // *Electro. Eng.* 176 Profess. Programm. Boston–New York.– 1976.– 4/1–12.4/9, N 12.– P. 2–8.
10. *Leiber C. O.* Zur Wirkung das Infraschalles auf Menschen // *Acustica.*– 1976.– 34, N 4.– P. 251–252.
11. *Tempest W.* Infrasound and low frequency vibration.– London: Acad. Press, 1977.– 364 p.
12. *Thomas J. E., Pierce A. D., Tlinn E. A., Graine L. B.* Bibliography on infrasonic waves // *Geophys J. Roy. Astron. Soc.*– 1971.– 26, N 1–4.– P. 399–401.
13. *Nischiwaki Niichi* Noise pollution generated by inaudible the sounds–infrasounds noise and testing for its effects // *Vib. Noise Control Eng., Sydney.– Ser. A.*– 1976.– P. 56–60.
14. *Судзуки Ч.* Инфразвук и мероприятия по устранению его вредных воздействий // *Кикай ю кэнкю (Sci. Mach.).*– 1980.– 32, N 6.– С. 693–698.
15. *Сокол Г. И.* Особенности инфразвуковых процессов в инфразвуковом диапазоне частот.– Днепропетровск: Промінь, 2000.– 136 с.
16. *Новгородский Е. Е., Шульгин А. И., Валулин А. А.* Инфразвук: враг или друг?– М.: Машиностроение, 1989.– 64 с.
17. *Гигиенические нормы инфразвука на рабочих местах.*– М.: Минздрав СССР, 1981.– 11 с.
18. *Бринза В. Н., Подлевских М. Н., Слободяник Т. М.* Защита от инфразвука на предприятиях черной металлургии.– М.: Металлургия, 1992.– 65 с.
19. *Велижанина К. А., Лебедева Н. О.* Исследование резонансных звукопоглотителей при высоких уровнях звука // *Акуст. ж.*– 1980.– 26, N 5.– С. 667–672.
20. *Велижанина К. А., Оборотов В. А.* Новый низкочастотный и инфразвуковой резонансный звукопоглотитель // *Акуст. ж.*– 1983.– 29, N 1.– С. 5–10.
21. *Гігієна праці: підручник / Під ред. професора А. М. Шевченка А. М.*– К.: Вища школа, 1993.– 583 с.
22. *Римский-Корсаков А. В., Ямщиков В. С., Жулин В. И., Рехтман В. И.* Акустические подводные низкочастотные излучатели.– Л.: Судостроение, 1984.– 184 с.
23. *Брох Е. Т.* Применение аппаратуры фирмы “Брюль и Кьер” для измерений акустического шума.– Дания: Брюль и Кьер, 1971.– 224 с.
24. *Шулейкин В. В.* Физика моря.– М.: АН СССР, 1953.– 230 с.
25. *Урик Р. Дж.* Основы гидроакустики.– Л.: Судостроение, 1978.– 448 с.
26. *Пилипенко В. В.* Кавитационные автоколебания.– К.: Наук. думка, 1989.– 316 с.
27. *Пилипенко В. В., Довготько Н. И., Николаев А. Д., Долгополов С. И., Хоряк Н. В., Серенко В. А.* Теоретическое определение динамических нагрузок (продольных виброускорение) на конструкцию жидкостной ракеты РС-20 на активном участке траектории ее полета // *Техн. мех.*– 2000.– N 1.– С. 3–18.
28. *Пилипенко В. В., Задонцев В. А., Натанзон М. С.* Кавитационные автоколебания и динамика гидросистем.– М.: Машиностроение, 1977.– 352 с.
29. *Мясников Л. Л.* Неслышимый звук.– Л.: Изд-во судостроит. пром-ти, 1963.– 70 с.
30. *Андреева-Галанина Е. Ц., Пронин А. П., Скородумов Т. Е., Малышев Э. Н.* К вопросу о действии ИЗ на человеческий организм // VII Всесоюз. акуст. конф.– Тезисы докладов.– 1970.– С. 15–17.
31. *Okai O.* Infrasound generated by human body // *Proc. 2-nd Conf. Noise Control Eng.*– Edinburgh, 1983.– P. 75–77.
32. *Вартанян И. А.* Звук–слух–мозг.– Л.: Наука, 1981.– 176 с.
33. *Tsing H.* Zur Wirkung von Infraschall auf den Menschen // *Acustica.*– 1980.– 44, N 7.– P. 173–181.
34. *Хорбенко И. Г.* Звук, ультразвук, инфразвук.– М.: Знание, 1986.– 192 с.
35. *Borisyk A. O.* Modelling of the Acoustic Properties of the Larger Human Blood Vessel // *Акуст. вісн.*– 1998.– 1, N 3.– С. 3–13.
36. *Иванников А. И.* Метод исследования структуры звукового поля в малых замкнутых объемах воздуха.– М.: Дисс. канд. физ.-мат. наук, 1983.– 140 с.

37. Велижанина К. А., Клименкова О. М., Сасковец Н. Г. О парадоксальном усилении инфразвука в помещениях малого объема // Строительная акустика. Проблемы борьбы с промышленными и городскими шумами. – М.: Наука, 1979. – С. 89–100.
38. Заикин А. А., Руденко О. В. Нелинейная модель резонатора Гельмгольца с подвижной стенкой // Акуст. ж. – 1996. – 42, N 3. – С. 378–382.
39. Быков В. Г. Поглощение упругих волн в тонком слое зернистой среды // Акуст. ж. – 1997. – 43, N 3. – С. 323–327.
40. Методические указания по проведению измерений и гигиенической оценки шумов на рабочих местах N 1844-78 Минздрава СССР. – М.: Минздрав СССР, 1981. – 11 с.
41. Сокол Г. И. Обоснование создания акустического способа уничтожения колорадского жука // Друга Міжнарод. конф. “Наука і освіта 99” (тези доповідей): том 15. – Дніпропетровськ: Наука і освіта, 1999. – С. 31.
42. Сокол Г. И., Сокол А. В. Определение резонансных частот тел биологических объектов // Третья міжнарод. молодіж. наук.-практ. конф. “Людина і космос”. – Дніпропетровськ: НЦАОМУ, 2000. – С. 276.
43. Дуплищева О. М., Летучая С. А., Московцев О. С., Сокол Г. И. Определение жесткости и резонансной частоты тела колорадского жука // Друга Міжнарод. конф. “Наука і освіта 99” (тези): том 8. – Дніпропетровськ: Наука і освіта, 1999. – С. 24.
44. Сокол Г. И., Летучая С. А. Методы расчета и экспериментальные данные для определения жесткости и резонансных частот тел биологических объектов // Придніпров. наук. вісн., техн. науки. – 1998. – 136, N 69. – С. 77–79.
45. Sokol A., Sokol G. The Acoustic Method for the Destruction of the Colorado Beetle // GAMM-99, Annual Meeting (abstracts). – Metz: Universite de Metz, 1999. – P. 148.
46. Сокол Г. И., Сокол А. В., Сокол Т. В. Акустичний спосіб знищення колорадського жука і пристрій для його здійснення. – Патент на винахід N 25548 А. Україна, А01М 1/4.1/08. – 1998.
47. Сокол Г. И., Святун А. А. Акустический способ уничтожения колорадского жука // Прогресивна техніка і технологія машинобудування, приладобудування і зварювального виробництва. Праці Міжнарод. наук.-техн. конф., присвяченої 100-річчю механіко-машинобудівного і 50-річчю зварювального факультетів: том 1. – К.: НТУУ “КПІ”, 1998. – С. 107–110.
48. Сокол Г. И. Разработка и исследование акустического способа уничтожения колорадского жука как элемента новой экологической технологии в методах борьбы с вредителями растений // Четвертая традиц. науч.-техн. конф. стран СНГ “Процессы и оборудование экологических производств”. – Волгоград, 1998. – С. 72–74.