



И.К. РАЗУМОВ

ОСНОВЫ
ТЕОРИИ
ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО
ДЕЙСТВИЯ
ВИБРАЦИИ
НА ЧЕЛОВЕКА

АКАДЕМИЯ МЕДИЦИНСКИХ НАУК СССР

И. К. РАЗУМОВ

ОСНОВЫ ТЕОРИИ
ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО
ДЕЙСТВИЯ
ВИБРАЦИИ
НА ЧЕЛОВЕКА



МОСКВА • МЕДИЦИНА • 1975

613.6

P 17

УДК 613, 644

✓ 138223

Издание одобрено и рекомендовано к печати
Редакционно-издательским советом
при Президиуме АМН СССР

Автор монографии — профессор, доктор биологических и кандидат технических наук — много лет отдал изучению взаимосвязи механического и биологического действия вибрации на человека как основы для гигиенической оценки и нормирования производственных вибраций и профилактики профессиональных заболеваний, возникающих среди промышленных и строительных рабочих. В книге излагаются результаты этих исследований. Устанавливаются физический критерий и условия измерения вибраций для их гигиенической оценки. Формулируются принципы гигиенического нормирования вибрации.

Книга рассчитана на профпатологов, инженеров-конструкторов машин, работников техники безопасности, научных работников и студентов санитарно-гигиенических и биологических факультетов высших учебных заведений.

Razumov I. K. Bases of the Theory of Energy Effect of Vibration on Man.

The author prof. Bio. D. and Techn. Sci. Cand., dedicated many years of his scientific activity to studies of interconnections between mechanical and biological effects of vibration on man as a basis for hygienic evaluation and rating of industrial vibration and for prophylaxis of occupational diseases among industrial workers and builders. The book presents results of these studies and suggests physical criteria and methods for measuring vibration levels for hygienic evaluation. Principles of establishing hygienic norms of vibration are set forth.

The book is intended for occupational pathologists, engineers-designers, workers in safety measures development, research workers, students of faculties of sanitary hygiene and biology, specialists concerned with safety measures in industry.

Библиотека
Государственного
медицинского института
гор. Алматы

ADTI
AXB-BEGRS MAR

INV № 6762

50200—470
P 039(01)—75 285—75 © Издательство «Медицина» 1975

ГЛАВА I

ВИБРАЦИЯ И ЕЕ ГИГИЕНИЧЕСКОЕ, СОЦИАЛЬНОЕ И ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ЗНАЧЕНИЕ

Вибрацией обычно называют механические колебания твердых тел. В тех случаях, когда колебания совершаются в слышимом диапазоне частот, вибрации называют звуковыми. Вибрации могут быть полезными, когда колебательный процесс применяют в технологических целях — для транспортирования материалов, их сепарации, резания и др. или в медицине — для лечебного или восстановительного массажа, а могут оказывать неблагоприятное действие, длительно и систематически воздействуя на человека в производственных или в бытовых условиях.

В этой работе рассматриваются вибрации, возникающие при работе технологического оборудования и воздействующие на человека в процессе его трудовой деятельности.

В гигиене труда такие вибрации принято условно разделять на «локальные», воспринимаемые ладонными поверхностями рук, и «общие», воздействующие через опорные поверхности тела в положении стоя, сидя или лежа.

Действие вибрации на человека зависит как от физических характеристик колебательного процесса, возникающего в участках тела, соприкасающихся с вибрирующими поверхностями, так и от продолжительности контакта с ними. Оно может быть легко переносимым и не вызывать в организме каких-либо неблагоприятных последствий, и может приводить к стойким необратимым нарушениям физиологических функций, сопровождающимся болевыми ощущениями и морфологическими изменениями в тканях.

Клинические исследования состояния здоровья стажированных рабочих разных профессий, повторно подвергавшихся длительному действию интенсивных вибраций, показывают, что вибрационное воздействие не ограничи-

вается морфо-функциональными изменениями в структурах тела, непосредственно соприкасающихся с вибрирующей поверхностью, а способствует вовлечению в болезненный процесс других органов и систем. Это говорит об общебиологическом действии вибраций и позволяет классифицировать симптомокомплекс наблюдаемых нарушений как особую форму профессионального заболевания — вибрационную болезнь. Эти же исследования показывают, что вибрационная болезнь среди стажированных рабочих диагностируется у более или менее значительного числа обследованных трудоспособного возраста и они подлежат во избежание полной утраты трудоспособности переводу на работы, не связанные с вибрационным воздействием, что приводит к потере квалифицированных кадров и связанным с этим экономическим затратам.

Прогресс техники машиностроения с перманентным ростом продуктивности технологического оборудования и увеличением быстроходности и грузоподъемности средств транспорта приводит к увеличению интенсивности вибраций, а развитие экономики страны с увеличением промышленного потенциала и широкой механизацией ручного труда в сельском хозяйстве, строительстве и добывающей промышленности обуславливает прогрессирующий рост контингента лиц, подвергающихся вибрационному воздействию, создавая тем самым предпосылки для распространения вибрационной патологии, занявшей за последние годы третье место в структуре хронических заболеваний профессиональной этиологии.

Все это свидетельствует не только о большом гигиеническом, социальном и экономическом значении проблемы вибрации, но и об актуальности разработки и внедрения мер, направленных на ее успешное решение.

КЛИНИЧЕСКИЕ ПРОЯВЛЕНИЯ ОТДАЛЕННЫХ ПОСЛЕДСТВИЙ ДЕЙСТВИЯ ВИБРАЦИИ

Вибрации механизированного инструмента, технологического оборудования или средств транспорта всегда действуют на человека в каких-либо конкретных условиях: рабочей позы и статического напряжения тела; микроклимата и пыле-газового состава воздушной среды; сопутствующего шума или каких-либо иных факторов. Кроме того, они характеризуются конкретным способом

и режимом воздействия в течение рабочего дня. Поэтому на особенности проявления биологического действия вибраций, определяемые главным образом их характеристикой как колебательного процесса, оказывают влияние и указанные факторы.

Степень выраженности нарушений физиологических функций, которые могут наблюдаться в результате продолжительного повторного действия вибраций, определяется также суммарной длительностью воздействия и индивидуальными особенностями организма и, в частности, состоянием нервных процессов — их силой, уравновешенностью и подвижностью.

Многообразие сопутствующих факторов и сложность количественной оценки их влияния побудили исследователей изучать особенности вибрационного воздействия по профессиям, имея в виду аналогию в условиях труда одинаковых профессий и возможность на этой основе некоторого обобщения результатов исследований.

Изучение действия вибраций на человека проводилось за последние 35 лет как в Советском Союзе, так и за рубежом. Отечественные исследования, как правило, осуществлялись либо в клинических условиях, либо с выездом на предприятия комплексной бригады врачей. Состояние здоровья лиц, подвергавшихся систематическому длительному действию вибраций, обследовалось клиницистами — терапевтом, невропатологом и отоларингологом с привлечением при необходимости специалистов иного профиля. Дополнительные исследования характера изменения некоторых физиологических функций в динамике рабочего дня с изучением гигиенических условий труда и сопутствующих факторов внешней среды осуществлялись врачами-гигиенистами.

В отдельных случаях в научно-исследовательских институтах в условиях эксперимента с кратковременным действием синусоидальных вибраций изучались особенности влияния амплитуды смещения и частоты колебаний на направленность и величину изменений некоторых интересующих физиологических функций.

Во всех этих исследованиях вибрация характеризовалась наибольшим смещением или ускорением, измеряемым в зоне контакта вибрирующей поверхности с телом человека, и секундным числом оборотов или циклов технологического оборудования или механизированного инструмента, называемым обычно частотой вибрации.

Реже регистрировалось изменение смещения или ускорения во времени, т. е. записывались виброграммы колебательного процесса с их последующим ограниченным гармоническим анализом до нескольких первых гармоник.

Весьма редко измерялись спектры смещения или ускорения в полосах частот той или иной ширины.

По способу воздействия, как было указано, вибрации в этих исследованиях условно разделяли на «общие» — действующие через опорные поверхности тела в положении стоя, сидя или лежа, и «локальные» — действующие через ладонные поверхности рук.

Режимы вибрационного воздействия определялись хронометрированием длительности контакта работающих с вибрирующими поверхностями за рабочую смену и последующим выявлением ее процентного отношения к продолжительности рабочего дня. Суммарная длительность повторно действующих вибраций оценивалась по стажу работы в данной профессии. Изучение сопутствующих факторов включало оценку: микроклимата — (измерялась температура либо окружающей среды, либо вибрирующей поверхности или воздушной струи на выходе пневмоинструмента), пыле-газового состава (оценивался дисперсионный и химический состав с определением компонентов примесей и их концентрации в единице объема), шума (измерялся общий уровень звукового давления по линейной характеристике шумомера с оценкой его состава на слух, в градациях субъективного ощущения по высоте как низкого, среднего или высокочастотного. Реже измерялись спектры шума в октавных полосах частот).

В указанных исследованиях, как правило, изучалось состояние сенсорных систем (кожной и слуховой чувствительности, определяемых методами паллестезиометрии, альгезиметрии и тональной аудиометрии) сердечно-сосудистой системы и периферического кровоснабжения (с использованием артериальной барометрии и электрокардиографии, артериальной осциллографии или пульсометрии, плетизмо- и реовазографии, термометрии и капилляроскопии), двигательного нервно-мышечного аппарата (по показателям: двигательной хронаксии, миографии и динамометрии с выявлением выносливости к статическим усилиям), костно-суставного аппарата (по данным рентгенографических исследований), централь-

ной и вегетативной нервной системы (с помощью электроэнцефалографии, хронорефлексометрии и др.).

Степень неблагоприятного действия вибрации на организм человека оценивалась по направленности и выраженности изменений функций и показателям стойких нарушений комплекса физиологических функций, наблюдаемых в отдаленные периоды.

Гигиенические условия труда и особенности биологического действия вибрации изучались отечественными гигиенистами на больших контингентах лиц следующих профессий: бурильщики и отбойщики горнорудной промышленности; вальщики и раскряжевщики лесной промышленности; бетонщики в промышленности строительных материалов; формовщики, обрубщики, клепальщики, сверловщики, рихтовщики, шлифовщики, полировщики в машиностроении; трактористы и комбайнеры в сельском хозяйстве; водители тепло- и электровозов и поездные бригады железнодорожного транспорта. Общее количество обследованных составляло более 7500 человек.

Во всех обследованных профессиональных группах у стажированных рабочих были обнаружены стойкие нарушения исследуемых физиологических функций, сопровождающиеся периодически возникающими болевыми ощущениями и характеризующиеся различной в зависимости от профессии симптоматикой и степенью выраженности, что обусловлено как характером вибрации, способом и длительностью ее воздействия, так и влиянием сопутствующих факторов и индивидуальными особенностями организма.

В 1961 г. в Советском Союзе была издана монография Е. Ц. Андреевой-Галаниной, Э. А. Дрогичиной и В. Г. Артамоновой «Вибрационная болезнь». Эта книга, рассчитанная на врачей широкого профиля и освещающая вопросы этиологии, клиники и патогенеза заболеваний, вызываемых длительным систематическим воздействием вибрации, являлась в то же время первой попыткой систематизации и обобщения главным образом отечественных и немногих зарубежных исследований в этой области за более чем тридцатилетний период.

Оценивая действие вибрации на человека в целом, авторы книги констатируют, что «при объективном исследовании отмечаются изменения со стороны многих органов и систем» и что «выраженность отдельных симптомов

значительно варьирует. В одних случаях более выражены сосудистые расстройства, в других — нарушения функций опорно-двигательного аппарата».

Значительные изменения обнаруживаются в вегетативной нервной системе. В разное время поражения, вызванные вибрацией, называли по-разному. В 1955 г. было предложено называть симптомокомплекс, возникающий в результате действия вибрации, вибрационной болезнью.

При воздействии вибрации механизированного инструмента на организм человека возникают следующие нарушения физиологических функций. Прежде всего нарушается вибрационная чувствительность — она может быть изменена уже в то время, когда других признаков вибрационной болезни еще нет. У значительного большинства лиц виброопасных профессий пороги вибрационной чувствительности повышены. Вибрация с небольшой частотой, до 30 Гц, вызывает преимущественно нарушения болевой чувствительности. Ее изменения начинаются с кончиков пальцев, охватывают всю кисть и нижнюю часть предплечья по типу короткой или длинной перчатки.

При одновременном действии вибрации и шума среди лиц с большим стажем могут наблюдаться случаи выраженной формы профессиональной тугоухости.

Сосудистые нарушения принадлежат к числу наиболее ярковыраженных симптомов вибрационной болезни. Они возникают постепенно, протекают фазно и достигают тяжелой степени после длительного воздействия интенсивной высокочастотной вибрации.

В начале изучения воздействия вибрации доминирующим симптомом заболевания был спазм сосудов, что и послужило основанием считать заболевание аналогом болезни Рейно. В этом случае при охлаждении или холодовой пробе выявляется побеление пальцев рук. При прогрессировании заболевания феномен «мертвых пальцев» становится более четким. Однако спазм сосудов не является единственным типом реакции сосудов на вибрационное воздействие. Наряду со спазмом наблюдалось расширение сосудов, а иногда спастико-атоническое их состояние. Изменяется также внешний вид кисти: у одних они отечны, у других — становятся багрово-цианотичными. Многие исследователи указывали на трофические расстройства кожного покрова, чаще в виде

гиперкератоза, стертости кожного рисунка на фалангах пальцев кистей, изменения окраски и формы ногтей.

Нарушение гемодинамики в периферическом сосудистом русле сопровождается замедлением тканевого кровотока. Артериальное давление у рабочих некоторых профессий имеет тенденцию к гипотонии.

При тяжелых формах вибрационной болезни наблюдаются ангиоспастические кризы, сопровождающиеся болями в области сердца и общей слабостью.

Вибрация оказывает также несомненное влияние на нервно-мышечный аппарат. В мышцах изменения той или иной степени имеют место почти во всех случаях вибрационной болезни. Поражение опорно-двигательного аппарата может приобретать и довлеющее значение в клинической картине заболевания. При этом в мышцах пальпируются болезненные тяжи и уплотнения. Необходимость применения значительных мышечных усилий при работе приводит в последующем к снижению мышечной силы, развитию утомления и снижению выносливости к статическому усилию, причем нередко мышечная сила у рабочих снижается до 25—15 кг при норме 39 кг.

Костно-суставные поражения встречаются наиболее часто у бурильщиков и отбойщиков, реже — у обрубщиков литья. Они чаще развиваются в кистях, несколько реже в области лучезапястных и еще реже в локтевых или плечевых суставах. Наиболее часто встречаются кисты и остеопорозы, деформирующие артрозы мелких суставов кистей и локтевого сустава, трофические нарушения в концевых фалангах пальцев. По данным эксперимента на животных, структурным нарушениям в костях предшествуют изменения в них минерального и ферментного обмена, наблюдаемые еще тогда, когда морфологическими и рентгенологическими исследованиями ничего не удается обнаружить.

При вибрационной болезни обычно имеют место функциональные расстройства центральной нервной системы. Нервный аппарат на периферии является источником процесса, который, воздействуя на центры, вызывает в них нарушения. Эти нарушения в свою очередь могут приводить к вазомоторным, секреторным и трофическим расстройствам в первичном очаге возбуждения. В результате могут появиться патологические процессы в тех тканях и органах, которые непосредственно не подвергаются действию раздражителя. При вибрационной бо-

лезни функциональные расстройства центральной нервной системы протекают по типу астенических и астено-невротических состояний. Больные жалуются на головные боли, нарушения сна, повышенную утомляемость, раздражительность.

На электроэнцефалограммах у 50% лиц, страдающих вибрационной болезнью, обнаруживается плохая выраженность альфа-ритма, в 25% случаев регистрируются патологические признаки в виде острых волн.

Наблюдаемые нарушения физиологических функций, возникающие от вибраций, воздействующих на организм через опорные поверхности тела в положении стоя или сидя, указанные ранее авторы¹ характеризуют так: «Несмотря на то что патология редко возникает от общей вибрации, реакции на нее со стороны организма весьма разнообразны». В клинической картине заболевания преобладают нарушения со стороны центральной нервной системы. Наблюдения указывают на возможность нарушения основных нервных процессов — возбуждения и торможения. Поскольку действие общей вибрации сказывается на функциональном состоянии вестибулярного аппарата, у таких больных иногда возникают явления вестибулопатии: приступы головокружения, упорные головные боли, астеническое состояние, отмечается тремор пальцев рук. Работоспособность после длительного действия вибрации падает.

При вибрации с низкой частотой не обнаруживается значительных изменений в сердечно-сосудистой системе. Общая вибрация с частотой 40—70 Гц вызывает сужение сосудов, усиливающееся с возрастанием частоты. Энцефалографические исследования показывают, что при действии общей вибрации наступают более резкие изменения, чем при действии локальной вибрации. Характерно значительное угнетение альфа-ритма, доминируют быстрые колебания низкой амплитуды, что свидетельствует о наличии очагов возбуждения в коре больших полушарий. При наличии хронических заболеваний внутренних органов действие общей вибрации способствует обострению этих заболеваний.

Резюмируя, можно отметить, что клинический симптомокомплекс при вибрационной болезни весьма полимор-

¹ Все цитаты взяты из монографии Е. Ц. Андреевой-Галаниной, Э. А. Дрогичиной и В. Г. Артамоновой «Вибрационная болезнь», (М., 1961).

фен. Это указывает на вовлечение в болезненный процесс ряда органов и систем, и поэтому нет оснований считать вибрационную болезнь только местным процессом. Кроме того, вибрационная болезнь относится к группе заболеваний, при которых обратное развитие патологического процесса возможно только в ранних стадиях, причем восстановление нарушенных функций протекает очень медленно. При выраженных формах заболевания, несмотря на отстранение больного от работ, связанных с воздействием вибрации, и проведение соответствующего лечения, патологический процесс может прогрессировать. Необходимо также указать, что действие вибрации сопровождается обычно интенсивным шумом, способным вызывать функциональные нарушения в нервной системе и тем самым создавать условия для более быстрого развития вибрационной болезни.

Анализируя приведенные материалы об отдаленных последствиях действия на человека интенсивной вибрации и сведения по этому вопросу из научного обзора Всесоюзного научно-исследовательского института медицинской и медико-технической информации по влиянию шума и вибрации на организм человека, можно констатировать также, что наиболее обстоятельно, с большим охватом различных профессиональных групп, изучено действие на человека вибраций механизированного инструмента. Это обусловлено большей частотой поражения при этом способе воздействий вибраций и более выраженным специфическим действием, проявляющимся в расстройствах сосудистой системы и нервно-мышечного аппарата, которые в поздних стадиях развития являются необратимыми.

Это убедительно свидетельствует о необходимости ограничения параметров вибраций в зоне контакта человека с вибрирующими поверхностями с целью предупреждения возникновения профессиональных заболеваний. Что касается вибрации рабочих мест на производстве, на средствах транспорта и самоходных машинах, т. е. вибрации, воспринимаемой человеком в положении сидя или лежа, то ее действие, судя по опубликованным материалам, изучено в меньшем числе профессий и, на наш взгляд, менее обстоятельно, поскольку работы по оценке воздействия низкочастотных вибраций на висцеральные органы — желудочно-кишечный тракт, женскую половую сферу и др. — единичны.

Патология при действии «общих» вибраций возникает реже и проявляется в неспецифических реакциях центральной нервной системы. Это обстоятельство, подтверждая необходимость ограничения параметров «общих» вибраций в зоне контакта тела человека с вибрирующими плоскостями, указывает на целесообразность выбора иных физиологических критериев для их нормирования.

Обращает на себя внимание, что при изучении действия на человека вибраций звукового диапазона, как правило, сопровождающихся шумом приблизительно такой же интенсивности, исследователи в поисках патогенеза вибрационной патологии не учитывали значения шумового фактора. Это нашло отражение не только в констатации того, что «влияние шума в вибрационной патологии еще не установлено», но и в самом названии «вибрационная болезнь», свидетельствуя о необходимости дополнительных исследований в этой области.

СОСТОЯНИЕ ГИГИЕНИЧЕСКОГО НОРМИРОВАНИЯ ВИБРАЦИИ В СССР И ЗА РУБЕЖОМ

Нормирование вибраций в гигиене труда имеет свою историю, и краткое ознакомление с ней позволит лучше представить себе как состояние этой проблемы, так и цели и задачи исследований в этой области.

В СССР производственные вибрации в их гигиеническом аспекте привлекли внимание медиков еще в 20-х годах, когда впервые было отмечено их неблагоприятное воздействие на организм, проявляющееся в болевых ощущениях, обусловленных нарушением некоторых физиологических функций организма. Позднее такие нарушения в наиболее выраженной форме были замечены у рабочих, подвергающихся длительному систематическому воздействию вибраций, воспринимаемых ладонными поверхностями рук при работе механизированными инструментами (отбойными молотками) и с использованием технологического оборудования, создающего в рабочем режиме вибрации повышенной интенсивности (анклопф-машины).

В последующие годы повышение скоростей движения приводных механизмов и рабочих органов высокопроизводительного технологического оборудования способствовало увеличению интенсивности вибраций, а широкое

внедрение нового оборудования и средств транспорта в различные отрасли народного хозяйства обусловило расширение контингента лиц, подвергающихся действию этого фактора.

К 1941 г. советская наука о гигиене труда уже располагала достаточно многочисленными фактами возникновения стойких и необратимых нарушений физиологических функций, выявляемых при обследовании состояния здоровья у стажированных рабочих различных профессий. Это обстоятельство, с одной стороны, стимулировало к более углубленному изучению особенностей и механизма биологического действия вибрации на организм человека, а с другой — свидетельствовало о необходимости принятия неотложных мер по ограничению параметров вибраций в зоне контакта с телом человека, что является наиболее эффективным методом профилактики профессиональных заболеваний.

Великая Отечественная война 1941—1945 гг., принесшая неисчислимые бедствия народам Советского Союза и их материальной культуре, более чем на десятилетие приостановила работы по изучению действия вибрации на человека. Только в 1955 г. основоположником учения о гигиеническом значении вибрации профессором Ленинградского санитарно-гигиенического медицинского института Е. Ц. Андреевой-Галаниной в содружестве с коллективом кафедры гигиены труда и клиники того же института и другими специалистами на основе предварительного анализа и обобщения накопленных материалов по воздействию вибрации на человека и собственных исследований в этой области были разработаны и в том же году утверждены Министерством здравоохранения СССР первые в мире «Временные санитарные нормы по ограничению влияния вибраций на работающих пневматическим инструментом в производстве» (№ 191-55). Одновременно Е. Ц. Андреева-Галанина подготовила монографию «Вибрация и ее значение в гигиене труда», изданную в 1956 г. и призванную служить руководством по гигиенической оценке вибраций для врачей санитарно-эпидемиологических станций и заводских врачебных пунктов, а также для инженерно-технического персонала, проектирующего, изготавливающего и использующего виброопасное технологическое оборудование и инструмент. Позднее Министерством здравоохранения СССР были утверждены и введены в дейст-

вие в 1959 г. «Временные санитарные нормы и правила по ограничению вибраций рабочего места» (№ 281-59), разработанные Институтом гигиены имени Ф. Ф. Эрисмана под руководством Г. И. Румянцева, а в 1961 г. — «Временные санитарные нормы и правила по ограничению вибраций подвижного состава железнодорожного транспорта» (№ 376-61), представленные Центральной научно-исследовательской лабораторией гигиены и эпидемиологии Министерства путей сообщения СССР и разработанные под руководством А. М. Волкова. Эти нормативные документы, как подчеркнуто в их названии, носили временный характер и подлежали последующему уточнению. Все они ограничивали амплитудные величины кинематических параметров вибрации в зоне контакта вибрирующей поверхности с телом человека для дискретных частот в диапазоне до 100 Гц, но различались тем, что в каждом документе нормируемые параметры были разными. Так, в нормативах для механизированного инструмента ограничивались амплитуды смещения; в нормативах для рабочих мест ограничения налагались на все три кинематических параметра колебательного процесса — смещение, скорость и ускорение; нормирование вибраций подвижного состава железнодорожного транспорта предусматривало ограничение амплитуд ускорения в зависимости от их повторяемости в процессах ко времени воздействия.

Как санитарные нормы, утвержденные Министерством здравоохранения СССР, так и монография Е. Ц. Андреевой-Галаниной способствовали привлечению к проблеме вибраций внимания широкого круга врачей гигиенистов и клиницистов и инженеров по технике безопасности, машиностроителей, строителей.

За рубежом, судя по данным литературы, первые сведения о патологии, вызываемой воздействием вибраций, воспринимаемых ладонными поверхностями рук, были опубликованы еще в 1911 г. (Loriga, 1911 — цит. по Е. Ц. Андреевой-Галаниной с соавт., 1961). Публиковались такие сведения и в более позднем периоде, однако никаких рекомендаций по ограничению параметров этих вибраций ни в технической, ни в медицинской иностранной литературе мы не находим. Первая сделанная за рубежом попытка дать оценку воздействия вибрации на человека относилась к вибрациям пола или сидений, т. е. к вибрациям, воспринимаемым человеком через

опорные поверхности тела в положении стоя или сидя (Reicher, Meister, 1931). На основе большого числа экспериментов с действием на человека синусоидальных колебаний фиксированных частот в диапазоне до 50 Гц было предложено оценивать вибрационное воздействие по амплитудам смещения или ускорения в следующих пяти градациях субъективного ощущения: неощутимо, едва осязаемо, отчетливо осязаемо, неприятно и весьма неприятно.

В последующем эти оценки уточнялись главным образом в направлении изыскания комфортных условий или приемлемых предельно допустимых величин смещений или ускорений для средств пассажирского автомобильного и железнодорожного транспорта. Таковы работы в этой области Janeway (1949), Dieckmann (1957) и др. Позднее, в 1958 г. на основе исследований Dieckmann «Союзом немецких инженеров» ФРГ были разработаны рекомендации по ограничению вибраций, воздействующих на человека в положении сидя или стоя для диапазона частот до 90 Гц.

Годы после второй мировой войны характеризовались как в Советском Союзе, так и за рубежом резко возросшим интересом к инженерным вопросам вибраций, в том числе к совершенствованию измерительной техники для изучения амплитудно-частотного состава и статистического анализа сложных колебательных процессов, возникающих в различных условиях их возбуждений. Изучаются вопросы усталостной прочности материалов и конструкций, подвергающихся интенсивной вибрации. Разрабатываются теории и способы виброизоляции и вибродемпфирования. Развивается новая отрасль машиностроения — вибрационная техника, использующая колебательные процессы в технологических целях. Исследуются динамические характеристики тела человека. Изучается динамика нарушений физиологических функций организма человека, возникающих в процессе его трудовой деятельности от действия вибрационного фактора. Разрабатываются схемы электрических измерений и анализа быстро меняющихся механических величин и создаются различные конструкции измерительных комплексов для замеров и регистрации колебательных процессов как в узком диапазоне частот — для задач частных исследований или нужд контроля продукции производственных предприятий, так и в широком частотном

диапазоне — для целей анализа колебательных процессов.

В 1947 г. на мировом рынке появляется получившая широкое распространение продукция датской фирмы «Брюль и Кьер» — транспортабельная прецизионная виброакустическая аппаратура для измерения, регистрации и последовательного полосового спектрального анализа колебательных процессов, а позднее — и для статистического анализа шумов и вибраций.

В СССР в это же время организуется выпуск стационарных спектрометров для полосового анализа колебательных процессов в звуковом, инфра- и ультразвуковом диапазоне частот.

Анализ вибраций, возникающих при работе различного технологического оборудования и механизированного инструмента, проведенный с помощью аппаратуры этого класса, показал, что вибрационные процессы характеризуются широким, почти сплошным спектром частот, иногда с выраженными дискретными составляющими, но всегда с флюктуирующими во времени величинами кинематических параметров. Из этого явствовало следующее: характеризовать вибрации следовало спектром частот, а не «основной частотой», нормировать же следует не амплитудные величины параметров на дискретных частотах, а их среднеквадратичные величины в полосах частот той или иной ширины; спектры вибраций, измеренные с помощью новой аппаратуры, могут существенно отличаться в области высоких частот от спектров, получаемых ранее ограниченным гармоническим анализом виброграмм, регистрируемых такой малочувствительной аппаратурой, как вибрографы ВР-1, нашедшие широкое распространение в измерении вибраций для их гигиенической оценки.

Это свидетельствовало о том, что ограничение нормируемого диапазона частот областью до 100 Гц не исключало возможности возникновения патологии за счет воздействия ненормируемой высокочастотной части спектра, что и было подтверждено последующими наблюдениями.

Выяснившиеся обстоятельства послужили основанием для предприятий, проектирующих и изготавливающих оборудование и инструмент, подлежащие контролю вибраций на соответствие требованиям санитарных норм, высказать сомнение в обоснованности гигиенического

нормирования вибраций как по дискретным частотам и величине частотного диапазона, так и по выбору различных параметров в трех действующих санитарных нормах.

Таким образом, в 1962 г. возникла необходимость пересмотра санитарных норм вибрации как по проверке и уточнению нормируемых величин, так главным образом по установлению научно обоснованного нормируемого параметра вибраций и расширению частотного диапазона нормирования.

В 1965 г. в составе Международной организации по стандартизации (ISO) создается Технический комитет № 108 — «Механическая вибрация и удар» (ISO-TK-108) с рабочей группой (P-7) «по допустимым пределам вибрации и удара, воздействующих на человека». Этим комитетом в 1966 г. с последующей коррекцией в 1968 г. были разработаны на основе рекомендаций «Союза немецких инженеров» и других материалов зарубежных исследований и предложены для стран-участниц, в том числе для Советского Союза, «кривые оценки вибраций, воздействующих на человека».

Кривыми ограничивались среднеквадратичные величины ускорений в диапазоне частот до 90 Гц исходя из условий «комфорта» и «снижения производительности труда за счет усталости», а также «предельно допустимые величины вибраций, воздействующих на человека через опорные поверхности тела в положении сидя или стоя». В качестве последних были приняты величины, составляющие половину величин, характеризующихся как непереносимые.

Небезынтересно отметить высказывание об оценке действия вибрации на организм человека проф. Gierke (1965) в опубликованной им статье «О критериях воздействия шума и вибрации»: «Что касается критерия вибрационного воздействия, то национальные и международные усилия по их стандартизации все еще находятся в начальной стадии. Потребность в единой оценке вибраций и в установлении приемлемых ее уровней велика, но материалов, на которых можно было бы базироваться, совершенно недостаточно, и это главным образом следствие отсутствия какого-либо явного и постоянного признака, обусловленного действием вибраций. Профессиональное заболевание от вибрации всего тела, сравнимое с потерями слуха от шума, едва ли существует. Хронические незначительные поражения в крест-

цово-подвздошной области водителей грузовых машин и тракторов и, может быть, незначительные поражения почек могут считаться профессиональными заболеваниями, но они возникают весьма не часто, а длительность воздействия слишком неопределенна, чтобы можно было сделать какое-либо количественное заключение об опасной или безопасной длительности вибрационного действия. То же справедливо и относительно уровней, частот и длительности воздействия вибраций, вызывающих или способствующих развитию синдрома Рейно. Влияние длительности и повторности воздействия как жизненно важные во всех случаях воздействия производственных вибраций совершенно неизвестны».

Резюмируя изложенное, мы можем заключить, что до недавнего времени ни в одной из капиталистических стран и стран социалистического лагеря, исключая СССР, не существовало законодательных актов, ограничивающих параметры вибраций, воздействующих на человека в процессе его трудовой деятельности, так же как не существовало работ по физиолого-гигиеническому обоснованию параметра вибраций для их гигиенической оценки и нормирования.

Целью нашей работы на протяжении ряда лет являлось изыскание физически и физиологически обоснованного критерия для гигиенической оценки и нормирования вибраций, т. е. выявление такой физической характеристики воздействующего на человека колебательного процесса, количественное изменение которой вызывало бы пропорциональные изменения показателей нарушения той системы организма, которая непосредственно воспринимает воздействие вибраций и обуславливает возникновение ответных реакций всего организма на ее действие, а структура которой позволяла бы качественно прогнозировать преимущественные проявления последствий вибрационного воздействия.

При изыскании такой характеристики мы исходили из того, что:

- изменение стабильного состояния живой или неживой материи не может происходить без воздействия энергии;

- вибрация является физическим фактором внешней среды, действие которого сопровождается передачей колеблющимся структурам тела энергии, поступающей от источника колебаний;

— специфика биологического действия вибраций, вызывающего перестройку энергетического и материального баланса организма, не может быть не связана с особенностями ее первичного механического действия.

Эти положения предопределяли необходимость рассмотрения в физико-биологическом аспекте как воздействующих на человека характерных колебательных процессов, так и явлений, вызываемых при колебании тела человека как механической колебательной системы. Кроме того, анализ колебательных процессов и колебаний механических систем при характерных условиях их возбуждения мог способствовать как объяснению основных причин некоторых характерных нарушений физиологических функций и раскрытию патогенеза вибрационной патологии, так и уточнению программы экспериментальных исследований по проверке адекватности выбранного критерия. В проведении последних нашей задачей было получение относительных показателей зависимости между изменением физической характеристики воздействующего колебательного процесса и ответной реакцией адекватной системы организма без детального изучения механизма этих реакций, относящегося к компетенции общей физиологии и биохимии. Такой методический прием, как известно, широко распространен в практике физиолого-гигиенических исследований и апробирован многолетним опытом развития в СССР науки о гигиене труда.

В соответствии с констатируемым наибольшим распространением и большей специфичностью патологии, вызываемой воздействием вибраций, воспринимаемых ладонными поверхностями рук при работе механизированным инструментом, основное внимание в нашей работе было уделено именно этому способу вибрационного воздействия.

Учитывая, что вопросы анализа колебательных процессов и колебаний механических систем, лежащие в основе воздействия вибраций на организм человека, являются наиболее сложными разделами механики и мало знакомы врачам, биологам, физиологам и инженерам по технике безопасности, мы считали целесообразным рассмотреть некоторые основные понятия и определения и стремились к более доступной и простой форме математического изложения.

ГЛАВА II

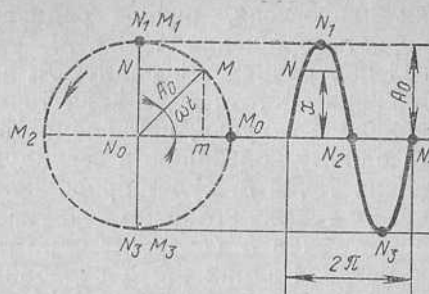
КОЛЕБАТЕЛЬНЫЕ ПРОЦЕССЫ, ИХ ХАРАКТЕРИСТИКИ И УСЛОВИЯ ИЗМЕРЕНИЙ В ГИГИЕНИЧЕСКИХ ЦЕЛЯХ

В этой главе мы рассмотрим физические и главным образом энергетические характеристики различных колебательных процессов, в том числе вибраций, воздействующих на человека, отмечая все то, что является существенным или может представлять частный интерес как в применении к измерению вибраций и их гигиеническому нормированию, так и в оценке особенностей биологического действия вибраций на организм человека. В общем случае вибрации, возникающие при работе технологического оборудования и механизированного инструмента, движении средств транспорта или сотрясении зданий, представляют собой сложные колебательные процессы, характеризующиеся широким диапазоном частот и флюктуирующих во времени амплитуд. В частных случаях экспериментального изучения действия вибраций на организм человека обычно пользуются синусоидальными колебаниями, создаваемыми механическими, электродинамическими или гидравлическими стендами, поэтому рассмотрение колебательных процессов следует начать с простейшего случая гармонического колебания, являющегося физической основой любого сложного колебательного процесса.

ГАРМОНИЧЕСКОЕ КОЛЕБАНИЕ И ЕГО КИНЕМАТИЧЕСКИЕ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Колебания механических систем, упругих тел или частиц, составляющих упругое тело, около положения их устойчивого равновесия могут возникать как при непрерывном действии переменной во времени внешней силы, так и при резком кратковременном действии постоянной силы. При этом либо вся механическая система или упругое тело колеблются в пространстве как единое целое, не изменяя формы своей внешней поверхности, либо

1. Математическая модель гармонического колебания.



колеблются частицы, образующие упругое тело, изменяя его внешнюю форму с образованием чередующихся выступов и впадин. Оба вида колебаний могут существовать и раздельно, и совместно. Кроме того, колебания могут совершаться одновременно вдоль каких-либо направлений и вокруг них.

Среди колебательных процессов особый интерес представляют периодические колебания, когда движение тела или его частиц полностью повторяется через равные промежутки времени T , называемые периодом колебаний.

Простейшим колебательным процессом является гармоническое колебание, получившее такое название за одинаковую закономерность изменений во времени характеризующих его параметров. Наглядное представление о кинематике такого процесса можно получить, рассматривая возвратно-поступательное движение (вдоль вертикального диаметра) точки N , являющейся проекцией на этот диаметр другой точки, M , перемещающейся с постоянной угловой скоростью вращения ω_0 по окружности радиуса A_0 , в направлении, указанном стрелкой на рис. 1.

Если за положение равновесия принять положение точек M и N на горизонтальном диаметре и вести отсчет времени от начала смещения точки M из ее положения M_0 , а точки N из ее положения N_0 , совпадающего с центром окружности, то за время t точка M_0 переместится по окружности в положение M , т. е. на величину $A_0\omega_0 t$, а точка N_0 сместится вверх вдоль диаметра в положение N на величину:

$$x = A_0 \sin \omega_0 t, \quad (2-1-1)$$

где x — смещение колеблющейся точки; A_0 — амплитуда смещения, т. е. наибольшее отклонение точки от положе-

ния равновесия, равное радиусу круга; ω_0 — угловая скорость вращения точки M , указывающая, на какой угол поворачивается радиус A_0 за 1 с ($\omega_0 = 2\pi f$, где f — линейная частота колебания точки N , т. е. число ее колебаний в секунду, измеряемое в герцах, один герц равен одному колебанию в секунду); t — текущее время.

Если точка M будет продолжать движение по окружности с той же угловой скоростью, то за один ее полный оборот точка N совершит одно полное колебание вдоль диаметра. Размах этого колебания, равный расстоянию между крайними верхним (N_1) и нижним (N_3) положениями точки N будет равен $2A_0$, т. е. удвоенной амплитуде смещения.

Равенство (2-1-1) является основным уравнением гармонического колебания, показывающим, что в любой момент времени t , отсчитываемый от начала движения, смещение колеблющейся точки от положения равновесия пропорционально амплитуде смещения A_0 , задаваемой условиями возбуждения колебаний, и изменяется во времени по синусоидальному закону. Смещение максимально и равно амплитуде, когда

$$t = 1/4 T (2n - 1),$$

где $n = 1, 2, 3, \dots$ любое число.

Дифференцируя уравнение (2-1-1) по времени, найдем выражение для скорости (v) колебательного движения:

$$v = \frac{dx}{dt} = \omega_0 A_0 \cos \omega_0 t = A_v \sin \left(\omega_0 t + \frac{\pi}{2} \right), \quad (2-1-2)$$

где $A_v = \omega_0 A_0$ — амплитуда колебательной скорости.

Вторичным дифференцированием получаем выражение для ускорения (a) колебательного движения:

$$a = \frac{dv}{dt} = -\omega_0^2 A_0 \sin \omega_0 t = A_a \sin (\omega_0 t + \pi), \quad (2-1-3)$$

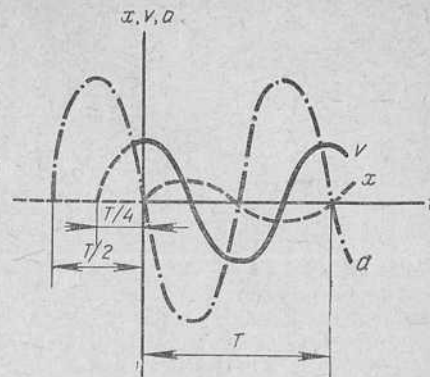
где $A_a = \omega_0^2 A_0$ — амплитуда ускорения колебательного движения. Заменяя в равенстве (2-1-3) $A_0 \sin \omega_0 t$ через x , найдем, что

$$a = -\omega_0^2 x. \quad (2-1-4)$$

Это означает, что ускорение колебательного движения пропорционально смещению, но всегда противоположно ему по направлению, т. е. находится с ним в противофазе.

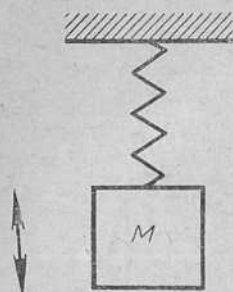
2. Характеристика изменения по времени смещения, скорости и ускорения гармонического колебания.

x — смещение; V — колебательная скорость; a — ускорение колебательного движения.



Эта особенность определяет возвратно-поступательный характер колебательного процесса, отличая его от других видов движения. Сопоставляя правые части полученных уравнений, убеждаемся, что смещение, скорость и ускорение колебательного движения изменяются во времени по одному и тому же синусоидальному закону, но с разными начальными фазами ($\frac{\pi}{2}$ и π), т. е. по кривым одинаковой формы, но смещенным одна относительно другой влево по оси времени на угол $\frac{\pi}{2}$ или на четверть периода колебаний. Кроме того, можно видеть, что амплитуда колебательной скорости в ω_0 раз больше амплитуды смещения, а амплитуда ускорения колебательного движения во столько же раз больше амплитуды скорости.

Изменение во времени смещения, скорости и ускорения гармонического колебательного процесса показано на рис. 2. Можно видеть, что максимумы смещения и ускорения совпадают во времени, но противоположны по направлению, т. е. имеют различные знаки, а максимум скорости совпадает с нулевыми величинами смещения и ускорения, или, иначе говоря, колебательная скорость максимальна тогда, когда колеблющаяся точка проходит через положение устойчивого равновесия, и равна нулю при наибольшем отклонении точки от этого положения. Таким образом, колебательный процесс в рассматриваемом случае протекает в следующем порядке. Колеблющееся тело или его частица, будучи выведены из положения равновесия, имеют наибольшую скорость, совпа-



3. Физическая модель колебательной системы.

дающую по направлению со смещением. По мере движения эта скорость за счет ускорения, действующего в обратном направлении, постепенно уменьшается до нуля при наибольшем смещении. В этот момент отрицательное ускорение изменяет направление скорости на обратное, совпадающее теперь с ускорением, вследствие чего скорость возрастает до максимума при обратном движении тела или его частиц к положению устойчивого равновесия. За это же время ускорение и смещение, оставаясь противоположными друг другу по направлению, сначала постепенно возрастают до максимума, а потом с приближением тела к положению равновесия, уменьшаются до нуля.

Смещение, колебательную скорость и ускорение колебательного движения называют кинематическими характеристиками колебательного процесса, так как они описывают движение, устанавливая связь пространства и времени, но не содержат информации о причинах, обуславливающих движение, т. е. о действующих силах и энергии колебательного процесса.

Рассмотрим динамическую и энергетическую характеристики гармонического колебания. Если при анализе кинематики движения мы пользовались математической моделью — движением точки по окружности, то для рассмотрения динамики колебательного процесса нам необходимо перейти к модели физической, т. е. рассматривать колеблющуюся точку как точку материальную, имеющую размеры, вес и упругие пространственные связи. В качестве простейшего варианта такой модели воспользуемся механической системой, изображенной на рис. 3 и состоящей из груза с массой M , подвешенного к неподвижной опоре на цилиндрической пружине с жесткостью K .

Напомним, что массой называют меру инерции тела к действию силы, определяемую как частное от деления веса тела на ускорение силы тяжести, а жесткостью пружины — меру ее упругости, измеряемую отношением силы нажима на пружину к величине ее осадка под действием силы.

При изучении реакции организма на вибрационное воздействие, тело человека можно рассматривать как механическую систему, в которой масса отождествляется с массой работающих структур или их плотностью, а жесткость — с упругостью тканей или мышечным напряжением. Для упрощения анализа поведения колеблющейся системы предположим, что система колеблется в линейном режиме, т. е. ее смещения пропорциональны действующим силам и тем самым соблюдается закон Гука «*ut tensio sic vis*». При этом груз будем считать настолько жестким по сравнению с пружиной, что его упругостью можно пренебречь, а пружину настолько легкой, по сравнению с грузом, что можно пренебречь ее массой. Такие системы из элементов массы без упругости и упругости без массы называют системами с сосредоточенными параметрами. Далее условимся, что центр массы груза расположен на вертикальной оси пружины и груз может перемещаться только вдоль оси, т. е. система имеет одну степень свободы перемещения, и что при движении груза не возникает сопротивления движению в виде трения о воздух, вязкого трения в материале пружины или сухого трения в местах сочленения груза с пружиной и пружины с неподвижной опорой.

Если при указанных условиях слегка толкнуть груз в направлении снизу вверх, сообщив ему некоторую начальную скорость v_0 , а затем предоставить систему самой себе, то груз начнет колебаться, а так как по условию трение при движении отсутствует, то, очевидно, колебания должны длиться бесконечно. Поскольку мы вызвали колебание толчком с начальной скоростью v_0 , то, вероятно, в момент времени $t=0$ скорость будет наибольшей и ее амплитуда будет равна $A_v = v_0 = \omega_0 A_0$, а следовательно, амплитуда смещения определится как $A_0 = \frac{v_0}{\omega_0}$ и смещение, скорость и ускорение будут изменяться во времени так, как указано на рис. 2 и в соответствии с формулами, приведенными выше.

Поскольку на систему, выведенную из положения равновесия и предоставленную самой себе, никакие внешние силы в процессе колебания не действуют, то единственными силами являются внутренние силы: сила инерции груза, получившего толчок, равная произведению его массы на ускорение Ma , и сила упругости пружины, равная произведению ее жесткости на смещение

Kx . Поэтому баланс сил или уравнение движения колебательной системы для любого момента времени можно записать в виде

$$Kx + Ma = 0, \text{ откуда } -Kx = Ma. \quad (2-1-5)$$

Равенство указывает, что как только груз сместится относительно положения равновесия, в колебательной системе возникнет внутренняя сила Kx , равная силе упругости пружины, но действующая в направлении, обратном смещению, т. е. стремящаяся вернуть груз в исходное положение. Эту силу называют «возвращающей», и она является динамической характеристикой гармонического колебания. Заменяя в равенстве (2-1-5) ускорение его выражением из уравнения (2-1-4), найдем, что

$$K = \omega_0^2 M, \text{ откуда } \omega_0 = \sqrt{\frac{K}{M}}. \quad (2-1-6)$$

Это означает, что система, выведенная из равновесия и предоставленная самой себе, будет колебаться с определенной частотой ω_0 , не зависящей от того, каким способом система была приведена в движение, а обусловленной только свойствами самой системы — ее жесткостью и массой. Эту частоту называют частотой свободных или собственных незатухающих колебаний.

Из равенства (2-1-6) можно видеть, что частота свободных гармонических колебаний тем больше, чем больше жесткость системы и чем меньше ее масса. Заметим, что любая более сложная механическая система, в том числе и тело человека, имеет большое число собственных частот колебаний, определяемое в общем случае числом элементов системы и степеней свободы их перемещений.

При определенных условиях вибрационного воздействия некоторые из этих частот могут оказывать существенное влияние на субъективные ощущения человека и эффект биологического действия вибраций.

Рассмотрим энергетические характеристики свободного гармонического колебательного процесса и прежде всего энергию колебания E , т. е. работоспособность колеблющейся системы в любой момент времени. Напомним, что работоспособность в данный момент всегда является следствием накопления энергии за предшествующий период и что в механике различают два вида

энергии: потенциальную энергию $E_{\text{п}}$, зависящую от положения колеблющейся точки в пространстве, и кинетическую энергию $E_{\text{к}}$, определяемую скоростью движения колеблющейся точки. Умножив уравнение движения (2-1-5) на колебательную скорость v , получим:

$$Kx \frac{dx}{dt} + Mv \frac{dv}{dt} = 0.$$

Интегрируя полученное уравнение по времени, найдем полную энергию колебания ($E_{\text{полн}}$) как постоянную интегрирования:

$$E_{\text{полн}} = \frac{1}{2}Kx^2 + \frac{1}{2}Mv^2 = E_{\text{п}} + E_{\text{к}} = \frac{1}{2}Mv_0^2,$$

где в соответствии с уравнениями (2-1-1), (2-1-2) и (2-1-6)

$$E_{\text{п}} = \frac{1}{2}Kx^2 = \frac{1}{4}M\omega_0^2 A_0^2 \cdot (1 - \cos 2\omega_0 t); \quad (2-1-7)$$

$$E_{\text{к}} = \frac{1}{2}Mv^2 = \frac{1}{4}M\omega_0^2 A_0^2 \cdot (1 + \cos 2\omega_0 t)$$

$$A_0^2 = \frac{v_0^2}{\omega_0^2}.$$

Равенства показывают, что полная энергия гармонического колебания в любой момент времени постоянна, равна сумме кинетической ($E_{\text{к}}$) и потенциальной ($E_{\text{п}}$) энергии колеблющейся точки и соответствует той энергии, которую мы сообщили колебательной системе начальным толчком, т. е. $\frac{1}{2}Mv_0^2$. Кроме того, из уравнения следует, что как потенциальная, так и кинетическая энергия изменяется во времени около своего среднего значения $\frac{1}{4}M\omega_0^2 A_0^2$, равного половине максимального, но с частотой 2ω , которая вдвое больше частоты колебания. При этом каждая из энергий обращается в нуль, когда другая достигает максимума. На рис. 4 показано изменение во времени потенциальной и кинетической энергии гармонического колебания, кинематические параметры которого изменяются так, как это указано на рис. 2.

Введем понятие мощности колебательного процесса, т. е. работы, совершаемой в системе в единицу времени. Как известно, мощность определяется произведением силы на вызванную ею скорость движения в направлении действия силы. В рассматриваемом случае на систему в процессе колебания никакие внешние силы, в том числе силы трения, не действуют; следовательно, работы, влекущей за собой отдачу энергии во внешнюю среду, в колебательной системе не совершается. Но поскольку

груз перемещается в пространстве, очевидно, в системе совершается внутренняя работа и этой работе соответствует колебательная мощность, определяемая произведением возвращающей силы на колебательную скорость.

Перемножая равенства (2-1-5) и (2-1-2) и заменяя x и a их значениями из уравнений (2-1-1) и (2-1-4), найдем, что

$$W_p = -Kxv = -M\omega_0^2 A_0^2 \sin \omega_0 t \cos \omega_0 t = -\frac{1}{2} \omega_0 M v_0^2 \sin 2\omega_0 t, \quad (2-1-8)$$

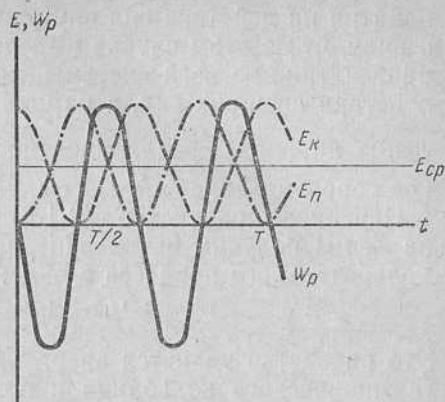
где $\frac{1}{2} \omega_0 M v_0^2$ — амплитуда колебательной мощности, а знак минус указывает, что колебательная мощность расходуется на преодоление сил внутреннего сопротивления.

Из равенства (2-1-8) следует, что мощность колебательного процесса пропорциональна колеблющейся массе, квадрату амплитуды смещения и кубу круговой частоты и изменяется во времени с удвоенной частотой колебания.

Сопоставляя равенства (2-1-7) для энергии с уравнением (2-1-8) для мощности, можно видеть, что та и другая пропорциональны квадрату колебательной скорости и изменяются во времени с удвоенной частотой колебаний. Но энергия пропорциональна только массе M и изменяется во времени около среднего положительного ее уровня, а мощность пропорциональна сопротивлению движения $\omega_0 M$ и изменяется во времени около нулевого уровня, т. е. может принимать отрицательные значения в зависимости от знаков скорости и ускорения. Изменение колебательной мощности во времени указано на рис. 4. Можно видеть, что в первой и третьей четвертях периода колебательная мощность отрицательна; это означает, что в эти интервалы времени масса отдает кинетическую энергию пружине, сжимая или растягивая ее; во второй и четвертой четвертях периода мощность положительна и масса получает кинетическую энергию от пружины. Так как отрицательные и положительные площади фигур, очерчиваемых кривой мощности, равны (рис. 4), а следовательно, их алгебраическая сумма равна нулю, то мощность гармонического колебательного процесса за полупериод колебания или кратные ему величины равна нулю. Это следовало ожидать, поскольку по условию трение при движении отсутствует и вся работа расходуется в самой системе на изменение ее со-

4. Характер изменений во времени потенциальной и кинетической энергии гармонического колебания.

E_k — кинетическая энергия;
 E_p — потенциальная энергия;
 W_p — колебательная мощность;
 E_{cp} — средняя мощность.



стояния. Такую мощность, которая не рассеивается системой, т. е. не переходит в другие виды энергии — тепловую, химическую или электрическую, а затрачивается на изменение положения колеблющейся точки в пространстве, принято называть реактивной или отражаемой и обозначать W_p в отличие от активной или поглощаемой мощности W_a , переходящей в другие виды энергии. При гармонических колебаниях реактивная мощность является одновременно и полной мощностью, поскольку активная составляющая в системах без трения равна нулю.

Обратим внимание на то, что сомножитель $\omega_0 M$ в формуле (2-1-8) может быть выражен через амплитуды возвращающей силы и колебательной скорости следующим образом:

$$\omega_0 M = \frac{KA_0}{v_0} = \frac{\omega_0^2 MA_0}{\omega_0 A_0} = Z.$$

Величину отношения амплитуды силы к амплитуде вызванной ею скорости движения в направлении действия силы (Z) называют механическим сопротивлением тела в точке приложения силы или механическим импедансом системы.

Механический импеданс является характеристикой колебательной системы и зависит только от ее свойств, т. е. от массы, жесткости и сопротивления трению. Обычно понятием импеданса пользуются при описании реакции системы на действие внешней силы, однако это не противоречит обобщению и распространению нами этого

понятия на действие сил внутренних. Надо только иметь в виду, что в этом случае импеданс Z характеризует сопротивление не всей системы, как это должно быть при действии внешних сил, а парциальное упругое сопротивление пружины $\frac{K}{\omega_0}$ или численно равное ему инерционное сопротивление $\omega_0 M$ массы.

Переписав равенство (2-1-8) с заменой в нем $\omega_0 M$ на Z , мы получим выражение мощности гармонического колебательного процесса в виде:

$$W_p = -\frac{1}{2} Z v_0^2 \sin 2\omega_0 t. \quad (2-1-9)$$

Это равенство является энергетической характеристикой гармонического колебания и показывает, что мощность колебательного процесса пропорциональна половине квадрата амплитуды колебательной скорости и механическому сопротивлению колебательному движению. Она изменяется во времени по синусоидальному закону с удвоенной ($2\omega_0$) частотой колебания. Если в равенстве (2-1-9) принять $\sin 2\omega_0 t = 1$, что соответствует амплитудному значению колебательной мощности, разделить обе части равенства на сопротивление Z и учесть, что $\frac{v_0^2}{2} = v_{\text{ск}}^2$ представляет собой, как мы увидим далее, квадрат среднеквадратичной величины колебательной скорости $v_{\text{ск}}$, то мы получим уравнение амплитуды удельной мощности $W_{\text{уд}}$ гармонического колебательного процесса в виде

$$W_{\text{уд}} = \frac{W_p}{Z} = v_{\text{ск}}^2. \quad (2-1-10)$$

Это равенство наглядно показывает, что квадрат среднеквадратичской колебательной скорости численно равен амплитуде колебательной мощности, отнесенной к единице механического сопротивления колебательному движению, и что при одинаковых механических сопротивлениях разных колебательных систем среднеквадратичное значение колебательной скорости является адекватным показателем мощности колебательного процесса, обуславливающей изменения положения в пространстве элементов колебательной системы, а следовательно, и изменения ее состояния.

Мы рассмотрели кинематические и энергетические характеристики гармонического колебания. Эти характери-

стики позволяют определить величины параметров колебательного процесса в любой момент времени, т. е. мгновенные значения, поэтому их называют амплитудно-временными характеристиками.

Для синусоидального колебания амплитудно-временная характеристика является единственно необходимой для полного представления о характере колебательного процесса. Однако в ряде случаев представляют интерес не мгновенные, а средние величины того или иного параметра колебательного процесса за какой-либо интервал времени. Существует два наиболее распространенных вида средних величин — среднеарифметические и среднеквадратичные значения.

Определение средних величин за некоторый интервал времени для непрерывно изменяющихся мгновенных значений параметров всегда сводится к вычислению ординаты прямоугольника, равновеликого площади, ограниченной: огибающей ординат, осью абсцисс и крайними ординатами интервала времени, для которого определяется средняя величина.

Математически, среднеарифметическая величина $Y_{ар}$ определяется интегрированием в заданном интервале времени функции изменения параметра с последующим делением результата на этот интервал и записывается так:

$$Y_{ар} = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} y dt, \quad (2-1-11)$$

где y — функция, характеризующая закономерность изменения любого параметра во времени; $t_2 - t_1$ — интервал времени, в пределах которого вычисляется средняя величина.

Среднеквадратичную величину $Y_{ск}$ определяют по тому же принципу определения ординаты равновеликого прямоугольника, но с той разницей, что функцию изменения параметра сначала возводят в квадрат, затем ее интегрируют в заданных пределах и полученную величину площади делят на интервал времени усреднения, после чего из результата извлекают квадратный корень.

Математически это записывается так:

$$Y_{ск} = \sqrt{\frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} y^2 dt}, \quad (2-1-12)$$

где y , $t_2 - t_1$ имеют указанные ранее значения.

Для синусоидальных колебаний равенства (2-1-11) и (2-1-12) приводятся к следующим выражениям:

$$Y_{ap} = \frac{A_0}{\pi} \frac{T}{t_2 - t_1} \sin \pi \frac{t_2 + t_1}{T} \sin \pi \frac{t_2 - t_1}{T}$$

$$Y_{ck} = \frac{A_0}{\sqrt{2}} \sqrt{1 - \frac{T}{2\pi(t_2 - t_1)} \cos 2\pi \frac{t_2 + t_1}{T} \sin 2\pi \frac{t_2 - t_1}{T}} \quad (2-1-13)$$

Можно видеть, что при усреднении любого параметра гармонического колебательного процесса за период колебаний T или за полупериод $\frac{T}{2}$ между нулевыми значениями амплитуд их среднеарифметическая и среднеквадратичная величины составят:

$$\begin{aligned} \text{при } t_2 - t_1 = T \quad Y_{ap} &= 0; \quad Y_{ck} = \frac{A_0}{\sqrt{2}} = 0,707A_0 \\ \text{при } t_1 = 0 \text{ и } t_2 - t_1 = \frac{T}{2} \quad Y_{ap} &= \frac{2}{\pi} A_0 = 0,637A_0, \\ Y_{ck} &= 0,707A_0. \end{aligned}$$

Схема определения среднеарифметических и среднеквадратичных величин приведена на рис. 5.

Рассматривая амплитудно-временные характеристики гармонического колебания, мы не указывали, в каких единицах измеряются его параметры, имея в виду, что приведенные закономерности справедливы для любой системы единиц измерения. В современной физической, технической и медицинской литературе разные авторы пользуются различными системами единиц измерения, поэтому для возможности сопоставления числовых величин по отдельным публикациям в табл. 1 указаны системы единиц измерения и их эквиваленты для рассматриваемых параметров колебательного движения.

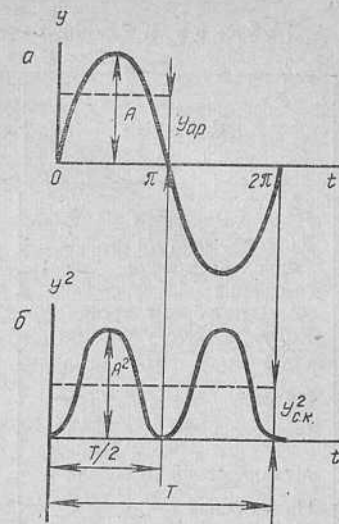
Выше для упрощения анализа колебательного процесса мы рассматривали его с некоторыми ограничениями. Поэтому теперь следует оценить, насколько эти ограничения соответствуют реальным колебательным процессам и при каких условиях. Условие пропорциональности смещений действующим силам, как правило, соблюдается только при малых амплитудах колебаний, т. е. когда напряжение в материале не превосходит его предела пропорциональности. Условие сосредоточенных параметров соблюдается для всех систем, если они колеблются как

единое целое, т. е. в диапазоне частот, которые меньше низшей частоты собственных колебаний системы. Ограничение степени свободы одним направлением практически можно считать выполненным, если амплитуды поперечных колебаний составляют не более 10% от амплитуд продольных колебаний. А вот условие «отсутствия трения» никогда не соблюдается, так как в природе не существует движения без потери энергии на преодоление сопротивлений движению. Поэтому гармонический колебательный процесс как процесс без трения, длящийся вследствие этого бесконечно долго, реально неосуществим.

Но тогда правомочен вопрос, почему же мы уделили этому процессу столько внимания. Ответ заключается в том, что, во-первых, в подавляющем большинстве колебательных процессов, исключая колебания в резонансном режиме, влияние трения на характер колебаний не столь велико, а пренебрежение им позволяет упростить анализ поведения сложных колебательных систем; во-вторых, любой сложный колебательный процесс, как мы увидим далее, можно представить состоящим из суммы простых гармонических колебаний.

Резюмируя изложенное в этом параграфе, мы можем заключить, что смещение точки, колеблющейся в пространстве относительно ее положения устойчивого равновесия, всегда сопровождается затратой энергии, пропорциональной квадрату среднеквадратичной колебательной скорости и механическому сопротивлению, оказываемому этому перемещению.

В биологическом аспекте отсюда следует, что в тех случаях когда изучаются изменения состояния физиологических функций организма, возникающие только от действия вибраций, их целесообразно характеризовать



5. Схема определения средних величин.

a — среднеарифметических;
 b — среднеквадратичных.

**Таблица 1. Единицы измерения колебательного движения
и их эквиваленты**

Наименование	Условное обозначение	Системы единиц измерения		
		физическая	техническая	международная СИ
Линейная частота	f	Гц	Гц	Гц
Круговая частота	ω	рад/с	рад/с	рад/с
Период колебания	T	с	с	с
Смещение	x	см	м	м
Колебательная скорость	v	см/с	м/с	м/с
Колебательное ускорение	a	см/с ²	м/с ²	м/с ²
Сила	F	дина	кг	Н
Масса	M	г	кг·с ²	кг
Жесткость	K	дин/см	кг/м	Н/м
Механический импеданс	Z	дин·с	кг·с	Н·с
Напряжение	σ	г/см ²	м	м
Мощность	W	эрг/с	кг/м ²	Н/м ²
Интенсивность	I	эрг	кгм/с	Дж/с
Энергия	E	см ² ·с	кгм	Дж
Импульс силы	i	эрг	м ² ·с	м ² ·с
		дина·с	кг·с	Дж
				Н·с

Примечание.
 $1 \text{ рад/с} = 6,28 \text{ Гц}$; $1 \text{ м} = 100 \text{ см} = 1000 \text{ мм} = 1\,000\,000 \text{ мкм}$;
 $1 \text{ кг} = 9,8 \text{ Н} = 0,98 \cdot 10^6 \text{ дин}$; $1 \frac{\text{кг} \cdot \text{с}}{\text{м}} = 9,8 \frac{\text{Н} \cdot \text{с}}{\text{м}} = 9,8 \cdot 10^3 \frac{\text{дин} \cdot \text{с}}{\text{см}}$;
 $1 \text{ кг/м}^2 = 9,8 \text{ Н/м}^2 = 98 \text{ дин/см}^2$;
 $1 \frac{\text{кгм}}{\text{с}} = 9,8 \cdot 10^7 \frac{\text{эрг}}{\text{с}} = 9,8 \text{ Вт}$.

не амплитудой смещения или ускорения, а среднеквадратичным значением колебательной скорости как показателем, равным амплитуде удельной (на единицу сопротивления) мощности колебательного процесса, а следовательно, энергии, воздействующей в единицу времени и являющейся первопричиной изменения состояния организма.

СЛОЖНЫЙ КОЛЕБАТЕЛЬНЫЙ ПРОЦЕСС И ЕГО АМПЛИТУДНО-ВРЕМЕННЫЕ И АМПЛИТУДНО-ЧАСТОТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Сложным называют колебательный процесс, образуемый из нескольких одновременных колебаний с разными частотами и амплитудами.

Рассмотрим такой процесс, возникающий в упругой среде, колеблющейся в линейном режиме и характери-

зующейся некоторым сопротивлением Z , оказываемым средой колебательному движению. Амплитудно-временная характеристика такого процесса, показывающая, как изменяются во времени его кинематические параметры, образуется сложением амплитудно-временных характеристик составляющих колебаний. Поскольку сумму любого числа слагаемых можно получить их последовательным попарным сложением, рассмотрим сложение только одной пары гармонических колебаний, совершающихся в одном направлении, т. е. коллинеарно. В общем случае колебания могут иметь неодинаковые частоты, различные амплитуды и разные начальные фазы. Изменения во времени любого кинематического параметра сложного колебательного процесса могут быть записаны так:

$$x_{\text{сл}} = A_1 \sin(\omega_1 t + \varphi_1) + A_2 \sin(\omega_2 t + \varphi_2); \quad (2-2-1)$$

$$v_{\text{сл}} = A_1 \omega_1 \cos(\omega_1 t + \varphi_1) + A_2 \omega_2 \cos(\omega_2 t + \varphi_2); \quad (2-2-2)$$

$$d_{\text{сл}} = -[A_1 \omega_1^2 \sin(\omega_1 t + \varphi_1) + A_2 \omega_2^2 \sin(\omega_2 t + \varphi_2)]. \quad (2-2-3)$$

Сложение можно произвести графически, как это показано на рис. 6, откладывая на одном графике в одинаковом масштабе на осях амплитуда-время каждую из слагаемых синусоид и суммируя с учетом знаков их ординаты в каждой точке абсциссы.

На рис. 6 видно, что полученная амплитудно-временная характеристика сложного колебательного процесса не является синусоидой, а следовательно, сложный колебательный процесс не является гармоническим. Кроме того, можно указать, что форма колебаний для отдельных его параметров x , v , a , из-за множителя ω для скорости и ω^2 для ускорения также не сохраняется.

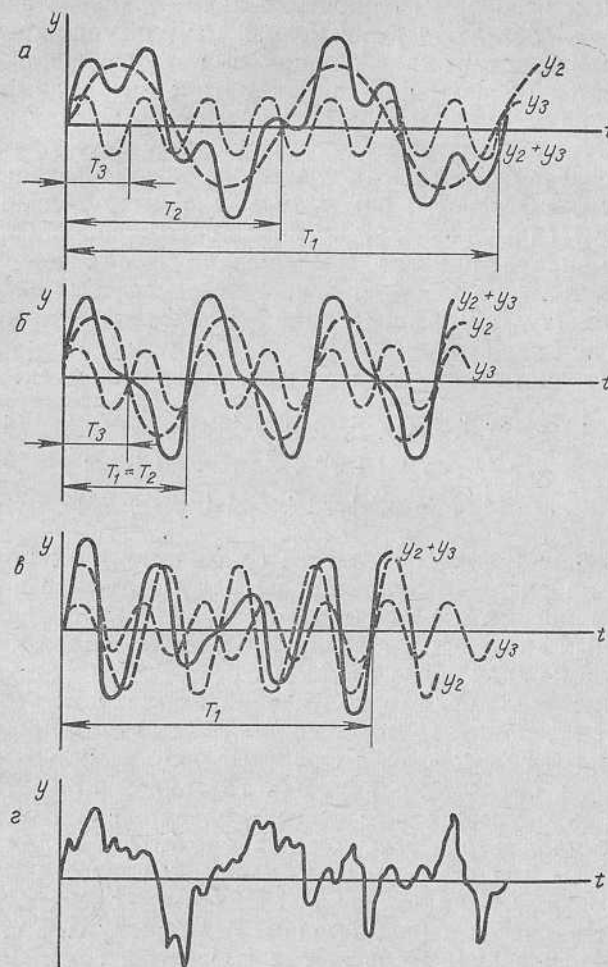
Рассмотрим, в каких случаях сложный колебательный процесс является периодическим. Если частоты, а следовательно, и периоды слагаемых колебаний соизмеримы, т. е. каждая из них равна произведению некоторого целого числа на третью величину — меру, то для двух слагаемых колебаний мы можем написать соотношения:

$$\omega_2 = m\omega_1; \quad \omega_3 = n\omega_1; \quad T_1 = mT_2 = nT_3;$$

откуда

$$T_1 = \frac{n-m}{f_3 - f_2}, \quad (2-2-4)$$

где m , n — положительные целые числа.



6. Сложение колебаний разных частот и амплитуд.
 a — соизмеримые частоты; $б$ — кратные частоты; $в$ — близкие частоты; $г$ — несоизмеримые частоты.

Равенство (2-2-4) показывает, что в интервале времени T_1 укладывается целое число m периодов T_2 и n периодов T_3 . А это означает, что форма амплитудно-временной характеристики сложного колебательного процесса будет периодически повторяться через промежутки времени T_1 , т. е. с частотой ω_1 .

Следовательно, при сложении колебаний с соизмеримыми частотами мы всегда получаем периодический колебательный процесс с периодом, равным наименьшему кратному периодов слагаемых колебаний. Так, при сложении колебаний с частотами 6 и 21 Гц период повторения формы колебаний будет равен периоду, соответствующему частоте 3 Гц.

Частоту ω_1 повторения формы сложного колебательного процесса принято называть основной частотой амплитудно-временной характеристики, а частоты слагаемых колебаний — гармониками основной частоты, им присваивают порядковый номер, численно равный показателю кратности их частот. Так, при $m=2$ ω_2 — вторая гармоника, при $n=7$ ω_7 — седьмая гармоника и т. д.

Обратим внимание на то, что частота повторения формы сложного колебательного процесса, как это следует из равенства (2-2-4), может не совпадать ни с одной из частот слагаемых колебаний.

Рассмотрим частные случаи соизмеримых частот, а именно кратные, близкие и равные частоты. Если частоты слагаемых кратны, то в равенстве (2-2-4) следует положить $m=1$ и тогда

$$\omega_2 = \omega_1; \quad \omega_3 = n\omega_2; \quad T_1 = T_2 = nT_3. \quad (2-2-5)$$

Это означает, что при сложении гармонических колебаний с кратными частотами мы получаем периодический колебательный процесс с периодом повторения формы, равным периоду T_2 слагаемого колебания с меньшей частотой ω_2 .

Так, период повторения формы при сложении колебаний с частотами 6 и 3 Гц равен периоду частоты 3 Гц.

Для близких частот в равенстве (2-2-4) $n-m=1$ и тогда

$$T_1 = \frac{1}{f_3 - f_2}. \quad (2-2-6)$$

В этом случае сложный колебательный процесс имеет форму чередующихся максимумов и минимумов с постепенно нарастающими и убывающими амплитудами. Такой процесс называют биением.

Из равенства (2-2-6) следует, что период биения тем больше, чем меньше разность частот слагаемых колебаний. Так, для частот слагаемых колебаний 12 и 15 Гц период повторения формы сложного колебания

будет равен периоду, соответствующему частоте 3 Гц. Случай равных частот слагаемых колебаний не представляет особого интереса, поскольку очевидно, что при сложении двух синусоид с одинаковыми периодами мы получим синусоиду с тем же периодом, т. е. гармоническое колебание с той же частотой, но с другой амплитудой, зависящей от амплитуд и начальных фаз слагаемых колебаний и равной

$$A_{\text{сл}} = \sqrt{A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2 \cos(\varphi_1 - \varphi_2)}, \quad (2-2-7)$$

где $A_{\text{сл}}$, A_1 , A_2 — амплитуды сложного колебательного процесса и слагаемых колебаний равных частот для любого параметра — смещения скорости или ускорения; φ_1 , φ_2 — начальные фазы слагаемых колебаний.

Отметим только, что если амплитуды слагаемых колебаний равны, т. е. $A_1 = A_2$, а начальные фазы противоположны, т. е. $\varphi_2 = \varphi_1 + \pi$, то колебания «гасят» друг друга и колебательный процесс не возникает.

Если частоты слагаемых колебаний несоизмеримы, т. е. их отношение равно какому-нибудь иррациональному числу β , например $\beta = \sqrt{2} = 1,414\dots$, тогда

$$\frac{\omega_3}{\omega_2} = \beta; \quad T_2 = \beta T_3.$$

Так как β иррационально, то число периодов T_3 , укладывающихся в интервале времени T_2 или любом, ему кратном, будет дробным, а это означает, что фазы колебаний в конце двух любых следующих друг за другом равных интервалов времени будут неодинаковы, т. е. форма колебаний не будет повторяться и рассматриваемый сложный колебательный процесс не будет периодическим. Иначе говоря, при сложении гармонических колебаний с несоизмеримыми частотами мы получаем аperiodический колебательный процесс. Обратим внимание, что аperiodические процессы, образованные сложением двух гармонических колебаний с несоизмеримыми частотами, принято называть квазипериодическими в отличие от рассматриваемых ниже аperiodических колебательных процессов, образуемых колебаниями с непрерывным рядом частот. Такое название они получили потому, что в этом случае всегда можно подобрать на амплитудно-временной характеристике такие интервалы времени, в которых укладывается «почти» целое число периодов. Так, например, при $\beta = \sqrt{2}$ $7T_2 \approx 5 \cdot \sqrt{2}T_3$. При этом раз-

ность фаз существенно не отражается на величинах амплитуд и вследствие этого процесс считают «почти» периодическим.

До сих пор мы рассматривали только периоды сложных колебаний. Уделим внимание амплитудам сложного колебания и, в частности, соотношению между максимальными ординатами амплитудно-временной характеристики, т. е. ее пиковыми величинами и среднеквадратичными величинами сложного колебания. Если для гармонического колебания отношение амплитуды колебания к ее среднеквадратичному значению, согласно равенству (2-1-13) и тексту к нему, определялось постоянной величиной, равной $\sqrt{2}=1,41$, то для сложного колебательного процесса это отношение не постоянно и может изменяться в широких пределах. Найдем среднеквадратичное значение за период повторения формы колебаний для сложного колебательного процесса, образованного сложением двух гармонических колебаний с разными амплитудами A_1, A_2 , частотами ω_1, ω_2 и начальными фазами φ_1 и φ_2 . Для этого мы должны возвести в квадрат суммарное значение любого параметра, проинтегрировать его за период повторения формы колебаний, разделив на величину периода, а затем извлечь из результата квадратный корень. На примере смещения найдем:

$$x_{\text{ск}}^2 = A_1^2 \sin^2(\omega_1 t + \varphi_1) + A_2^2 \sin^2(\omega_2 t + \varphi_2) + 2A_1 A_2 \sin(\omega_1 t + \varphi_1) \sin(\omega_2 t + \varphi_2).$$

Интегрируя это равенство почленно и разделив его на период T повторения формы колебаний, найдем для первых двух членов в соответствии с (2-1-12):

$$\frac{1}{T} \int_0^T A_1^2 \sin^2(\omega_1 t + \varphi_1) dt = \frac{A_1^2}{2} \quad \frac{1}{T} \int_0^T A_2^2 \sin^2(\omega_2 t + \varphi_2) dt = \frac{A_2^2}{2}$$

Интеграл же последнего члена за период повторения формы колебаний обращается в нуль вследствие равенства площадей положительных и отрицательных частей синусоид.

Таким образом, среднеквадратичное значение смещения сложного колебательного процесса, образованного сложением двух гармонических колебаний, определится равенством:

$$x_{\text{ск}}^2 = \frac{A_1^2}{2} + \frac{A_2^2}{2}, \quad \text{или} \quad x_{\text{ск}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{A_1^2 + A_2^2}, \quad (2-2-8)$$

где $x_{\text{ск}}$ — среднеквадратичное значение за период повторения формы сложного колебания; A_1, A_2 — амплитуды слагаемых колебаний.

Аналогично могут быть найдены среднеквадратичные величины других кинематических параметров.

Равенство (2-2-8) показывает, что среднеквадратичные величины за период повторения формы колебаний не зависят от начальных фаз слагаемых колебаний и равны квадратному корню из суммы квадратов среднеквадратичных величин слагаемых колебаний. Однако пиковые, т. е. наибольшие возможные величины амплитудно-временной характеристики сложного колебания, как это можно видеть из равенства (2-2-1), могут существенно зависеть от начальных фаз слагаемых колебаний и при одинаковых среднеквадратичных значениях какого-либо параметра сложного колебания могут иметь различные величины. Это можно видеть из рис. 7, на котором изображены формы сложного колебания, образованного сложением двух колебаний, отличающихся только начальными фазами. Однако максимально возможные пиковые значения никогда не могут быть больше суммы амплитуд слагаемых колебаний, и в этом предельном случае их отношение к среднеквадратичным величинам будет определяться неравенством:

$$\sqrt{2} \leq \frac{x_{\text{сл}}}{x_{\text{ск}}} \leq \sqrt{2} \cdot \frac{A_1 + A_2}{A_1^2 + A_2^2}, \quad (2-2-9)$$

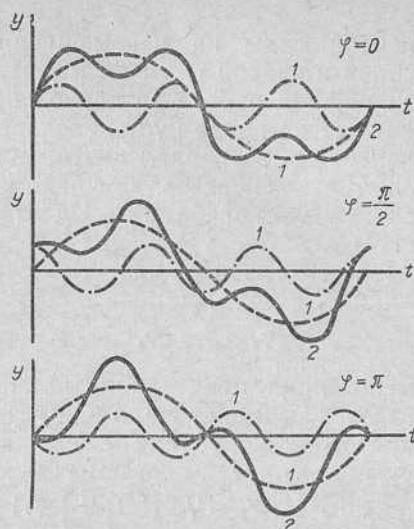
указывающим, что для сложного колебательного процесса отношение пиковых величин к среднеквадратичным может принимать любые значения в указанных пределах.

Выше мы рассматривали кинематические характеристики сложного колебательного процесса, образуемого сложением двух гармонических колебаний. Найдем теперь мгновенную реактивную мощность W_p такого колебательного процесса. Прежде всего заметим, что если система, изображенная на рис. 3, колеблется с двумя разными частотами, то это означает, что на нее одновременно действуют две разные внешние периодические силы, изменяющиеся во времени:

$$p' = p_1 \sin(\omega_1 t + \varphi_1) \quad \text{и} \quad p'' = p_2 \sin(\omega_2 t + \varphi_2).$$

7. Сложение колебаний, различающихся только начальными фазами.

1 — слагаемые колебания; 2 — сложное колебание, φ — угол сдвига фазы второго колебания относительно первого.



В системах без трения эти силы обуславливают возникновение двух разных колебательных скоростей:

$$v' = v_1 \cos(\omega_1 t + \varphi_1) \quad \text{и} \quad v'' = v_2 \cos(\omega_2 t + \varphi_2).$$

Если по-прежнему обозначить отношение амплитуд сил к амплитудам вызываемых ими скоростей колебательного движения через

$$\frac{p_1}{v_1} = Z_1 \quad \text{и} \quad \frac{p_2}{v_2} = Z_2,$$

то мощность колебательного процесса, равную произведению действующих сил на вызываемую ими скорость движения, мы можем записать в виде:

$$W_p = (p'_1 + p''_2)(v' + v''); \quad (2-2-10)$$

$$W_p = \frac{1}{2} [Z_1 v_1^2 \sin 2(\omega_1 t + \varphi_1) + Z_2 v_2^2 \sin 2(\omega_2 t + \varphi_2)] + \\ + \frac{1}{2} v_1 v_2 \{ (Z_1 + Z_2) \sin [(\omega_2 + \omega_1)t + (\varphi_2 + \varphi_1)] + \\ + (Z_2 - Z_1) \sin [(\omega_2 - \omega_1)t + (\varphi_2 - \varphi_1)] \},$$

где

$$v_1 = A_1 \omega_1 \quad \text{и} \quad v_2 = \omega_2 A_2,$$

Первый двучлен этого равенства представляет сумму мощностей слагаемых гармонических колебаний, второй же характеризует отнесенную к единице времени работу

первой силы на перемещении, обусловленном второй силой и второй силы на перемещении вызванном первой силой. Эта работа за период повторения формы колебаний всегда равна нулю; следовательно, энергия сложного колебания за период повторения его формы определяется только первым двучленом, равным сумме энергий слагаемых колебаний*. Из этого важного в биологическом аспекте уравнения следует, что — при равенстве начальных фаз φ , частот ω слагаемых колебаний и механических импедансов Z системы, т. е. при

$$\varphi_2 = \varphi_1 = \varphi, \quad \omega_2 = \omega_1 = \omega, \quad Z_2 = Z_1 = Z$$

мгновенная реактивная мощность колебательного процесса, как и следовало ожидать, равна мощности гармонического колебания с амплитудой смещения, равной сумме амплитуд слагаемых колебаний, т. е.:

$$W_p = \frac{1}{2} Z \sin 2(\omega t + \varphi) [v_1^2 + v_2^2 + 2v_1 v_2] = \\ = \frac{1}{2} Z \omega^2 (A_1 + A_2)^2 \sin 2(\omega t + \varphi), \quad (2-2-11)$$

а в частном случае противоположных начальных фаз и равенстве частот и амплитуд смещения мощность сложного колебательного процесса обращается в нуль, т. е. слагаемые колебания гасят друг друга.

Для двух сложных колебательных процессов, образованных (каждый) сложением колебаний разных частот ω_1 и ω_2 , амплитуд смещения A_1 и A_2 и одинаковых и противоположных начальных фаз слагаемых колебаний, мгновенные мощности неодинаковы и различаются знаком у второго двучлена. При

$$\varphi_1 = \varphi_2 = 0$$

$$W_0 = \frac{1}{2} [Z_1 v_1^2 \sin 2\omega_1 t + Z_2 v_2^2 \sin 2\omega_2 t] + \\ + \frac{1}{2} v_1 v_2 [(Z_2 + Z_1) \sin (\omega_2 + \omega_1)t + (Z_2 - Z_1) \sin (\omega_2 - \omega_1)t].$$

$$\text{При } \varphi_1 = 0 \text{ и } \varphi_2 = \pi$$

$$W_\pi = \frac{1}{2} [Z_1 v_1^2 \sin 2\omega_1 t + Z_2 v_2^2 \sin 2\omega_2 t] - \\ - \frac{1}{2} v_1 v_2 [(Z_1 + Z_2) \sin (\omega_2 + \omega_1)t + (Z_2 - Z_1) \sin (\omega_2 - \omega_1)t].$$

* В системах без поглощения энергии эта сумма за период повторения формы сложного колебания также равна нулю, однако в системах с поглощением она равна сумме поглощенных энергий слагаемых колебаний:

$$E = \frac{1}{2} (v_1^2 Z_1 \sin \varphi'_0 + v_2^2 Z_2 \sin \varphi''_0) T,$$

где φ'_0 и φ''_0 — угол сдвига фаз между силой и вызванной ею колебательной скоростью.

В биологическом аспекте различие формул для мгновенных мощностей колебательных процессов, образованных сложением гармонических колебаний одних и тех же частот ω_1 и ω_2 и амплитуд смещения A_1 и A_2 , но отличающихся противоположными начальными фазами $\varphi_2 = \varphi_1 + \pi$, означает, что в этих случаях, отличающихся только формой сложного колебания, мы можем ожидать при действии вибраций разных величин нарушений физиологических функций, обусловленных режимом воздействия раздражителя, и для объяснения этой разницы нет оснований изыскивать какие-либо другие критерии в виде «крутизны фронта» или «резкости толчка» и т. п., поскольку мгновенная мощность как производная воздействующей энергии по времени сама является фактором, определяющим скорость нарастания или спада энергетически действующего раздражителя, а следовательно, и режим его воздействия во времени.

Разнообразие возможных форм амплитудно-временных характеристик сложного колебательного процесса, получаемого при сложении только двух гармонических колебаний с различными частотами, амплитудами и начальными фазами, естественно, приводило к мысли, что сложением большего числа колебаний с определенным образом подобранными частотами, амплитудами и начальными фазами можно получить любую форму амплитудно-временной характеристики сложного колебательного процесса, или, наоборот, любую заранее заданную форму амплитудно-временной характеристики сложного колебания можно разложить на составляющие гармонические колебания с разными частотами, амплитудами и фазами. Это положение было доказано в начале XIX столетия французским математиком Ж. Б. Фурье, показавшим, что как периодические, так и аperiodические колебательные процессы могут быть разложены на составляющие гармонические колебания. При этом каждой форме амплитудно-временной характеристики колебательного процесса соответствует единственная комбинация частот, амплитуд и начальных фаз слагаемых колебаний.

Совокупность амплитуд колебаний разных частот, составляющих сложный колебательный процесс, называют его амплитудно-частотной характеристикой или спектром амплитуд. Амплитудно-временная и амплитудно-частотная характеристики колебательного процесса взаи-

мосвязаны, и при изменении одной из них неизбежно изменяется другая. Первая из этих характеристик показывает, как изменяются параметры сложного колебательного процесса во времени; вторая устанавливает, как распределяются величины этих параметров в любой момент времени по частотам слагаемых колебаний. Графическое изображение амплитудно-временной характеристики вибрационного процесса обычно называют осциллограммой или виброграммой процесса, а амплитудно-частотной характеристики — его спектрограммой.

Рассмотрим, как связаны между собой амплитудно-временные (виброграмма) и амплитудно-частотные (спектрограмма) характеристики сложного колебательного процесса, или, иначе говоря, основы разложения сложного процесса на составляющие его гармонические колебания. Такое разложение получило название гармонического анализа.

Амплитудно-временную характеристику сложного периодического колебательного процесса для любого момента времени можно записать так:

$$\begin{aligned} Y_t &= A_0 + \sum_1^N A_n \sin(\omega_n t + \varphi_n) = \\ &= A_0 + \sum_1^N a_n \sin \omega_n t + \sum_1^N b_n \cos \omega_n t; \\ a_n &= A_n \cos \varphi_n; \quad b_n = A_n \sin \varphi_n \end{aligned} \quad (2-2-12)$$

где Y_t — ординаты амплитудно-временной характеристики сложного периодического колебательного процесса, отсчитываемые от оси абсцисс; A_0 — средняя ордината амплитудно-временной характеристики или численно равная ей амплитуда при $\omega_n = 0$ на амплитудно-частотной характеристике; A_n , φ_n , $\omega_n = n\omega_1$ — амплитуды, начальные фазы и частоты каждого из слагаемых колебаний, для которого индекс n указывает номер гармоники, т. е. кратность ее частоты ω_n частоте ω_1 повторения формы сложного колебания; N — число слагаемых колебаний, с увеличением которого возрастает степень приближения формы амплитудно-временной характеристики суммы слагаемых колебаний к заданной форме сложного колебания, а спектр амплитуд обогащается высокочастотными гармониками.

Правая часть равенства (2-2-13), представляющая сумму колебаний, носит название ряда Фурье. Она показывает, что сложный периодический колебательный процесс может быть составлен из ряда синусоидальных и косинусоидальных колебаний. Сущность метода анализа Фурье заключается в том, что если правую и левую части равенства (2-2-13) умножить раздельно сначала на синус какой-либо гармоники, а затем на косинус той же гармоники и полученные произведения проинтегрировать за период повторения формы колебания, то из полученных результатов можно найти амплитуду и начальную фазу именно этой гармоники. Поэтому для ряда Фурье мы можем записать:

$$A_0 = \frac{1}{T} \int_0^T Y_t dt; \quad a_n = \frac{2}{T} \int_0^T Y_t \sin \omega_n t dt; \quad b_n = \frac{2}{T} \int_0^T Y_t \cos \omega_n t dt;$$

$$A_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2}; \quad \operatorname{tg} \varphi_n = \frac{b_n}{a_n}. \quad (2-2-14)$$

При этом спектр S_n амплитуд сложного периодического процесса будет состоять из ряда амплитуд, соответствующих гармоникам разложения:

$$S_n = A_0, A_1, A_2, \dots A_n. \quad (2-2-15)$$

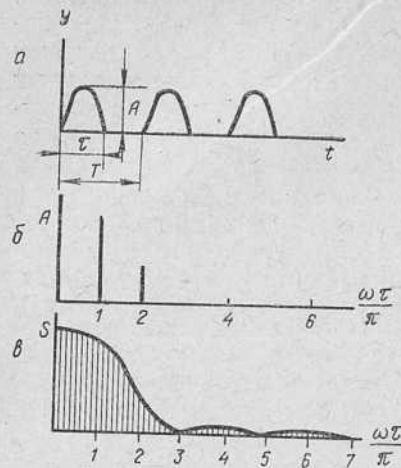
Рассмотрим характерный пример, когда амплитудно-временная характеристика какого-либо кинематического параметра (смещения, скорости, ускорения) сложного периодического колебательного процесса имеет форму, изображенную на рис. 8 и состоящую из полусинусоид длительностью τ , периодически повторяющихся через интервал времени T . Условимся называть подобные формы периодически следующими импульсами. Амплитудно-временная характеристика, изображенная на рисунке, аналитически может быть записана условиями:

$$Y_t = A \sin \frac{\pi}{\tau} t \text{ в интервале времени } 0 \leq t \leq \tau$$

$$Y_t = 0 \text{ при } t < 0 \text{ и } \tau \leq t \leq T.$$

В соответствии с приведенными выше равенствами найдем для нее среднюю ординату:

$$A_0 = \frac{1}{T} \int_0^{\tau} A \sin \frac{\pi}{\tau} t dt = 2 \frac{A}{\pi} \frac{\tau}{T}.$$



8. Амплитудно-временная и спектральная характеристики одиночного и периодически следующих полусинусоидальных импульсов.

a — временная характеристика серии импульсов; b — спектральная характеристика серии импульсов; θ — спектр одиночного импульса.

Как и следовало ожидать, она равна площади $\frac{2}{\pi} A \tau$ полусинусоиды, деленной на период T повторения формы колебаний. Соответственно амплитуда на спектрограмме при $\omega = 0$ равняется арифметически средней ординате $\frac{2}{\pi} A$ полусинусоиды, умноженной на отношение $\frac{\tau}{T}$ ее длительности τ к периоду T следования импульсов. Амплитуды слагаемых гармоник, образующих форму периодически повторяющихся полусинусоид, определяются значениями:

$$a_n = \frac{2}{T} \int_0^{\tau} A \sin \frac{\pi}{\tau} t \sin \omega_n t dt = \frac{2}{\pi} A \frac{\tau}{T} \frac{\sin \omega_n \tau}{1 - \left(\frac{\omega_n \tau}{\pi} \right)^2};$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_0^{\tau} A \sin \frac{\pi}{\tau} t \cos \omega_n t dt = \frac{2}{\pi} A \frac{\tau}{T} \frac{1 + \cos \omega_n \tau}{1 - \left(\frac{\omega_n \tau}{\pi} \right)^2};$$

$$A_n = \frac{4}{\pi} \frac{\tau}{T} \frac{\cos \omega_n \frac{\tau}{2}}{1 - \left(\frac{\omega_n \tau}{\pi} \right)^2} \quad \text{при } \omega_n \neq \frac{\pi}{\tau}. \quad (2.2.16)$$

Можно видеть, что амплитуды A_n спектра тем больше, чем больше отношение длительности τ импульса к периоду T их следования и чем меньше номер n гармоники, т. е. чем меньше ее частота.

Мы нашли выражение для амплитуд всех гармоник, частоты которых ω_n не равны $\frac{\pi}{\tau}$, т. е. полупериоды которых $\frac{T_n}{2}$ не совпадают с длительностью τ импульса. Для тех гармоник, полупериоды которых $\frac{T_n}{2}$ равны длительности импульса, равенство (2-2-16) приводит к неопределенности. Раскрывая ее по правилу Лопиталя, найдем, что при $\omega_n = \frac{\pi}{\tau}$

$$A_n = A \frac{\tau}{T}, \quad (2-2-17)$$

где $T_n = \frac{T}{n}$ — период гармоники.

Кроме того, из равенства (2-2-16) следует, что амплитуды всех гармоник, для которых $\frac{\omega_n \tau}{\pi}$ нечетно и равно 3, 5, 7 . . . , обращаются в нуль, так как в этих случаях $\cos \frac{\omega_n \tau}{\pi} = 0$. Следовательно, спектр периодически повторяющихся полусинусоид состоит из гармоник только с четным отношением

$$\frac{\omega_n \tau}{\pi} = 2, 4, 6, \dots, \text{ для которых } \cos \frac{\omega_n \tau}{\pi} = 1.$$

Начальные фазы слагаемых гармоник найдем из соотношения

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \varphi_n &= \frac{1 + \cos \omega_n \tau}{\sin \omega_n \tau} = \frac{\cos \omega_n \frac{\tau}{2}}{\sin \omega_n \frac{\tau}{2}}; \\ \varphi_n &= \frac{\pi}{2} (2n - 1) - \frac{\omega_n \tau}{2}. \end{aligned} \quad (2-2-18)$$

Если теперь подставить найденные значения амплитуд A_n и начальных фаз φ_n в равенство (2-2-13), то в результате разложения получим для периодически повто-

ряющихся полусинусоид следующий ряд гармонических колебаний и спектр S_n их амплитуд:

$$Y_t = \frac{2}{\pi} A \frac{\tau}{T} - \sum_1^N \frac{4}{\pi} A \frac{\tau}{T} \frac{\cos \omega_n \frac{\tau}{2}}{1 - \left(\frac{\omega_n \tau}{\pi}\right)^2} \cos \omega_n \left(t - \frac{\tau}{2}\right) \cos \pi n;$$

$$S_n = - \sum_1^N \frac{4}{\pi} A \frac{\tau}{T} \frac{\cos \omega_n \frac{\tau}{2}}{1 - \left(\frac{\omega_n \tau}{\pi}\right)^2} \text{ при } \omega_n \neq \frac{\pi}{\tau};$$

$$S_n = A \frac{\tau}{T} \text{ при } \omega_n = \frac{\pi}{\tau}, \quad (2-2-19)$$

В частном случае, когда длительность импульсов равна их скважности, т. е. перерывам между импульсами, или $\frac{\tau}{T} = 1/2$, гармонический анализ приводит к ряду слабых колебаний четных гармоник с $n=2, 4, 6 \dots$

$$Y_t = \frac{A}{\pi} + \frac{A}{2} \sin \omega t -$$

$$- \frac{2}{\pi} A \left(\frac{1}{3} \cos 2\omega t + \frac{1}{15} \cos 4\omega t + \frac{1}{35} \cos 6\omega t + \dots \right)$$

и спектру их амплитуд

$$S_n = A [0,637; 0,50; 0,212; 0,0425; 0,0182 \dots].$$

Равенство (2-2-19) показывает, что спектр амплитуд периодического колебательного процесса состоит из отдельных, т. е. дискретных, частот. Графически такой спектр изображается в осях амплитуда — частота в виде равноотстоящих друг от друга линий, высота которых указывает величину амплитуды для каждой частоты (см. рис. 8). Спектр, состоящий из дискретных частот, называют линейчатым в отличие от рассматриваемого ниже спектра из непрерывного ряда частот.

Апериодический колебательный процесс можно рассматривать как периодический, но с бесконечно большим периодом $T = \infty$ повторения формы колебаний. Но если период T становится бесконечно большим, то обратная ему величина — частота повторения формы колебаний — уменьшается до бесконечно малой величины $d\omega$, а дискретные частоты $\omega_n = n\omega_1$ гармоник обращаются в частоту ω , непрерывно изменяющуюся от 0 до бесконечно большой величины.

Поскольку частота повторения формы колебаний периодического процесса характеризует разность частот между отдельными кратными ей гармониками, то, очевидно, с ее уменьшением линии амплитуд в спектре периодического процесса будут сближаться и, сливаясь, образуют непрерывный ряд частот. Поэтому знак суммы в ряде Фурье (2-2-13) должен быть заменен на знак интеграла, указывающий на суммирование непрерывного частотного ряда. Соответственно этому ряд Фурье периодического процесса преобразуется в интеграл Фурье процесса аperiodического, и для определения спектра одиночного импульса мы можем написать следующий ряд уравнений:

$$Y_t = \frac{1}{\pi} \int_0^{\omega=\infty} S_{\omega} \sin(\omega t + \varphi_{\omega}) d\omega; \quad S_{\omega} = \sqrt{a_{\omega}^2 + b_{\omega}^2};$$

$$a_{\omega} = \int_0^{\tau} Y_t \sin \omega t dt; \quad b_{\omega} = \int_0^{\tau} Y_t \cos \omega t dt;$$

$$\operatorname{tg} \varphi_{\omega} = \frac{b_{\omega}}{a_{\omega}}.$$

В первом равенстве подынтегральная функция выражает отдельные колебания бесконечно малой амплитуды dA_{ω} , а величина $S_{\omega} = \pi \frac{dA_{\omega}}{\omega}$ — спектральную плотность амплитуд для частоты ω . Таким образом, если на спектрограмме любого сплошного спектра выделить полосу частот шириной $d\omega = \omega_{n+1} - \omega_n$, то спектральная плотность будет равна высоте прямоугольника с основанием $d\omega$, равновеликого площади, ограниченной кривой спектра, осью абсцисс и граничными ординатами частот выделенной полосы. Площадь же этого прямоугольника будет равна среднеквадратичному значению параметра в этой полосе.

В соответствии с изложенным для одиночного полусинусоидального импульса найдем:

$$a_{\omega} = \int_0^{\tau} A \sin \frac{\pi}{\tau} \sin \omega_n t dt = \frac{A}{\pi} \tau \frac{\sin \omega \tau}{1 - \left(\frac{\omega \tau}{\pi} \right)^2};$$

$$b_{\omega} = \int_0^{\tau} A \sin \frac{\pi}{\tau} \cos \omega t dt = \frac{A}{\pi} \tau \frac{1 + \cos \omega \tau}{1 - \left(\frac{\omega \tau}{\pi} \right)^2};$$

$$\operatorname{tg} \varphi_{\omega} = \frac{\pi}{2} - \frac{\omega \tau}{2}; \quad S_{\omega} = \frac{2}{\pi} A \tau \frac{\cos \omega \frac{\tau}{2}}{1 - \left(\frac{\omega \tau}{\pi} \right)^2}$$

при $\omega \neq 0$; $S_{\omega} = \frac{2}{\pi} A \tau$ при $\omega = 0$ (2-2-21)

Можно видеть, что спектр полусинусоидального импульса пропорционален площади $\frac{2}{\pi} A \tau$ его амплитудно-временной характеристики. Спектральная плотность обращается в нуль, когда соотношение $\frac{\omega \tau}{\pi} = 3, 5, 7 \dots$, т. е. нечетно; она максимальна, когда соотношение $\frac{\omega \tau}{\pi} = 2, 4, 6 \dots$ четно.

Кроме того, для коротких импульсов, когда $\frac{\cos \omega \frac{\tau}{2}}{1 - \left[\frac{\omega \tau}{\pi} \right]^2} \approx 1$, спектральная плотность практически постоянна и равна $\frac{2}{\pi} A \tau$ для всех частот, четверть периода которых больше длительности импульса, т. е. $\omega \leq \frac{\pi}{2} \frac{1}{\tau}$; откуда $f \leq \frac{1}{4\tau}$. После этой граничной частоты спектральная плотность уменьшается. Так, для импульса длительностью $\tau = 0,001$ с спектральная плотность постоянна до $f \leq \frac{1}{0,004} = 250$ Гц. Отметим попутно, что это справедливо для коротких импульсов любой формы. Итак, любой аperiodический колебательный процесс можно разложить в бесконечный ряд гармонических колебаний бесконечно близких частот с бесконечно малыми амплитудами и сплошным спектром (рис. 8). Сопоставляя между собой амплитуды A_n дискретного спектра периодически следующих полусинусоид со спектральной плотностью S_{ω} одиночного полусинусоидального импульса,

т. е. аperiodического процесса, найдем при равных длительностях и амплитудах импульсов, что отношение амплитуд спектров равно:

$$\frac{A_n}{S_\omega} = \frac{2}{T} = \frac{\omega_1}{\pi}, \text{ откуда } A_n = S_\omega \frac{\omega_1}{\pi}, \quad (2-2-22)$$

где ω_1 — частота, а T — период следования полусинусоид, т. е. частотная разность между гармониками. Это означает, что дискретный спектр периодически следующих импульсов всегда вписывается в сплошной спектр импульсов одиночных.

Аналитическое определение спектров сложного колебательного процесса возможно только в тех случаях, когда амплитудно-временная характеристика описывается более или менее простыми математическими выражениями. Обычно характеристики импульсов имеют неправильную асимметричную форму и их математическое выражение оказывается слишком сложным для интегрирования. В этих случаях пользуются либо ЭВМ, либо приближенными графоаналитическими способами определения спектра, заключающимися в том, что площадь, описываемая кривой формы импульса в координатах амплитуда — время, разделяют на несколько прямоугольников одинаковой ширины, но разной высоты. Высоты определяют в долях амплитуды импульса из условия, что площадь каждого прямоугольника равновелика заменяемой им части площади амплитудно-временной характеристики. Ординаты спектра A_n вычисляют для нескольких конкретных частот ω , по которым строят график в осях частота — амплитуда, соединяя точки плавной кривой.

Следует указать, что любой графоаналитический метод определения спектра имеет один недостаток — ограниченность числа точек и частот разложения, следствием чего является его неточность.

Ниже приведена вспомогательная таблица (табл. 2) для графоаналитического определения спектров импульсов по заданной форме, амплитуде и длительности с использованием формулы указанной в примечании к таблице.

Для рассмотренного выше одиночного полусинусоидального импульса, согласно рис. 9 и табл. 2, разделив площадь полусинусоиды на $n=5$ равных частей, най-

Таблица 2. Значение Φ_n и Ψ_n для графоаналитического определения спектра импульса

$n \backslash m$	Φ_n						Ψ_n					
	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1
1	1	0,97	0,90	0,78	0,73	0,46	0	0,2	0,38	0,53	0,64	0,71
2	1	0,82	0,35	-0,21	-0,66	-0,83	0	0,56	0,91	0,92	0,61	0,12
3	1	0,54	-0,41	-0,93	-0,58	0,24	0	0,84	0,89	0,13	-0,68	-0,81
4	1	0,17	-0,92	-0,46	0,70	0,63	0	0,98	0,33	-0,82	-0,57	0,55
5	1	-0,23	-0,87	0,60	0,55	-0,77	0	0,97	-0,43	-0,73	0,71	0,35
6	1	-0,59	-0,30	0,89	-0,73	0	0	0,80	-0,93	0,29	0,53	-0,84
7	1	-0,85	0,46	0,05	-0,50	0,76	0	0,51	-0,86	0,94	-0,74	0,35
8	1	-0,98	0,94	-0,86	0,76	-0,64	0	0,14	-0,27	0,39	-0,48	0,55

Примечание. $S_n = \frac{At}{n} \sqrt{(\sum Y_n \Phi_n)^2 + (\sum Y_n \Psi_n)^2}$,

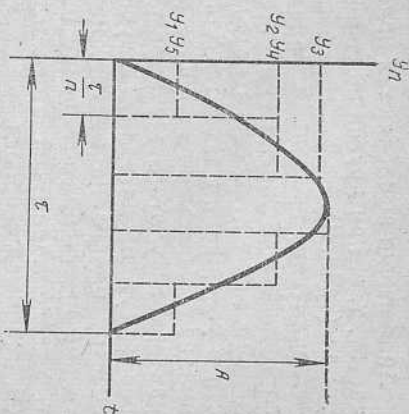
где n — число частей одинаковой ширины, на которое делит длительность t импульса (см. рис. 9); Y_n — высоты равногеликих прямоугольников в долях амплитуды A импульса, образуемых делением импульса на ча-

сти равной ширины; $m = \frac{\omega t}{2\pi}$ — параметр таблицы, ис-

ходя из которого находим частоты $\omega = \frac{2m\pi}{t}$ со спектральной плотностью S_n ; $\Phi_n \Psi_n$ — вспомогательные величины для вычисления амплитуд S_n спектра импульса; S_n — ордината спектра.

9. Схема графоаналитического определения спектра импульса.

Y_n — ординаты импульса в долях его амплитуды; t — длительность импульса; n — число частей деления длительности.



дем при параметре $m=0,40$, т. е. для $\frac{\omega t}{2} = 2$, и при высотах прямоугольников, определяемых из рис. 9 и равных:

$$Y_1 = Y_5 = 0,314; \quad Y_2 = Y_4 = 0,784; \quad Y_3 = 0,984,$$

что

$$\begin{aligned} \sum Y_n \Phi_n &= A [0,31 \cdot 0,9 + 0,78 \cdot 0,35 - 0,98 \cdot 0,41 - \\ &\quad - 0,78 \cdot 0,92 - 0,31 \cdot 0,87] = 0,835A; \\ \sum Y_n \Psi_n &= A [0,31 \cdot 0,38 + 0,78 \cdot 0,91 + 0,98 \cdot 0,89 + \\ &\quad + 0,78 \cdot 0,33 - 0,31 \cdot 0,43] = 1,823A, \end{aligned}$$

откуда ордината спектра для параметра частоты $\frac{\omega t}{2} = 2$ составит:

$$A_n = \frac{At}{5} \sqrt{(0,835)^2 + (1,823)^2} = 0,404At.$$

Точное значение этой ординаты при $\omega = \frac{4}{t}$, определяемое по формуле (2-2-21), составит:

$$S_\omega = \frac{2}{\pi} At \frac{\cos 2}{1 - \left(\frac{4}{\pi}\right)^2} = 0,425At,$$

откуда точность графоаналитического метода определения спектра составит $\frac{0,404}{0,425} - 1) \cdot 100 = -5\%$, т. е. поученные величины на 5% меньше.

Аналогично вычисляются ординаты спектра для других частот, т. е. при других значениях характерных параметров m (табл. 2).

Амплитудно-временная характеристика колебательно-го процесса может отображать изменение во времени любого кинематического параметра — смещения, скорости и ускорения, и в соответствии с этим, гармонический анализ ее позволяет получить амплитудно-частотную характеристику этого же параметра. Практический интерес могут представлять случаи, когда по известному спектру одного параметра, например смещения, желательно иметь представление о спектре другого кинематического параметра этого же колебательного процесса, например скорости.

Поскольку колебательная скорость и ускорение колебательного движения являются производными от смещения по времени, очевидно, их спектры должны быть производными спектра смещения и могут быть получены дифференцированием ряда слагаемых гармоник по времени. В обратном случае, когда известен спектр ускорения, спектры скорости и смещения могут быть получены интегрированием спектра ускорения.

В обоих альтернативных случаях производные спектры, оставаясь постоянными по своему частотному составу, существенно изменяются в амплитудах, а следовательно, и по форме спектрограмм. В общем случае, если амплитуды спектра скорости более или менее одинаковы по всему частотному диапазону, то в спектре смещения они будут резко увеличены на низких частотах и уменьшены на высоких, а в спектре ускорения, наоборот, уменьшены на низких и резко увеличены на высоких частотах. Отсюда следует, что для возможности сопоставления и оценки вибраций, создаваемых различными источниками сложных колебаний, необходимо установление единого характеризующего ее кинематического параметра. Выше мы указывали, что в качестве такого параметра целесообразно принять колебательную скорость.

Рассмотренные выше сложные колебательные процессы обычно называют детерминированными, потому что изменение их параметров во времени, а следовательно, и по частотному составу подчиняются определенным физическим закономерностям, исключая случайность. Поэтому их величины в любой сколь угодно отдаленный

момент времени могут быть предсказаны совершенно точно на основе этих закономерностей.

Если источниками возбуждения колебаний являются случайные причины, как, например, микроудары, возникающие в шарикоподшипниках и в зазорах сочленений движущихся деталей машин или механизированных инструментов, то такие вибрации называют беспорядочными или стохастическими. Они характеризуются хаотично флюктуирующими во времени амплитудами колебаний. Беспорядочные вибрации можно рассматривать как сумму непрерывного ряда гармонических колебаний с меняющимися во времени амплитудами и начальными фазами. Изменения их амплитудно-временной и амплитудно-частотной характеристик подчиняются статистическим закономерностям, а их величины в любой последующий момент времени могут быть предсказаны только с некоторой степенью вероятности на основе статистического анализа их частных реализаций, за предшествующий период.

Если условия возбуждения случайных колебаний приблизительно одинаковы, то беспорядочные вибрации можно считать статистически однородными, стационарными, обладающими свойствами эргодичности. Это означает, что усреднение случайной величины по ансамблю ее частных реализаций равно усредненному ее значению по времени за одну достаточно продолжительную реализацию, т. е. условие статистической однородности случайного процесса определяется постоянством $|\text{const}|$ среднего значения $\bar{X}$ любой случайной величины при достаточно большом времени усреднения и может быть записано так:

$$\bar{X} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x_i dt = \text{const} \quad (2-2-23)$$

Статистическая обработка непрерывно изменяющихся во времени случайных величин x_i обычно проводится для определения математически ожидаемого среднего значения $\bar{X}$ случайной величины, ее среднеквадратичного отклонения σ от этого среднего значения и оценки ошибки m в определении средних величин, определяемой отношением среднеквадратичного отклонения к числу замеров.

Математическое ожидание среднего значения случайной величины определяют как средневзвешенное: по числу замеров либо по продолжительности во времени или по повторяемости в выбранных диапазонах ее изменения, пользуясь формулой:

$$\bar{X} = \frac{\sum_i x_i n_i}{\sum_i n_i}, \quad (2-2-24)$$

где $\sum_i n_i$ — либо общее число замеров, либо длительность записи $\sum_i \Delta t_i$, либо полный диапазон $\sum_i \Delta x_i$ изменения случайной величины; x_i , n_i — случайная величина и ее повторяемость: либо по числу замеров n_i , либо по продолжительности во времени Δt_i , либо по ее регистрации в выбранном диапазоне Δx_i .

Среднеквадратичное отклонение σ случайной величины от ее математически ожидаемого среднего значения определяется из равенства:

$$\sigma = \sqrt{D} \quad D = \sigma^2 = \frac{\sum_i (x_i - \bar{X})^2 n_i}{\sum_i n_i}, \quad (2-2-25)$$

где D — дисперсия процесса.

Ошибку в определении средних величин относительно истинного ее значения при статистической обработке большого материала определяют по формуле:

$$m = \frac{\sigma}{\sqrt{\sum_i n_i}}. \quad (2-2-26)$$

Реже строятся гистограммы распределения случайных величин с определением вероятности и ее плотности.

Вибрации технологического оборудования и механизированного инструмента, воздействующие на человека, представляют собой комбинированные колебательные процессы, образуемые наложением как периодических колебаний дискретных частот, пропорциональных рабочему числу оборотов или циклов, так и беспорядочных колебаний, возникающих в машинах и инструментах при движении их сочлененных деталей и узлов или в процессе технологических операций, выполняемых их рабочими органами.

Как мы уже отмечали, из всех рассмотренных характеристик колебательных процессов наиболее репрезентативной в биологическом аспекте является их амплитудно-частотная энергетическая характеристика, связанная с амплитудно-частотной характеристикой коле-

бательной скорости в зоне контакта вибрирующей поверхности с телом человека. Однако это не исключает необходимости учета также амплитудно-временной энергетической характеристики при изучении и трактовке некоторых особенностей биологического действия прерывистых или импульсных вибраций. Кроме того, следует указать, что при современном уровне развития измерительной техники, позволяющей производить аппаратный, частотный и статистический анализ колебательных процессов, применение трудоемкого процесса гармонического анализа частных реализаций беспорядочных вибраций с последующей их статистической обработкой не оправдано. Однако при изучении действия импульсных вибраций гармонический анализ может оказаться полезным при изучении корреляции особенностей биологического действия со спецификой их механического воздействия.

Резюмируя изложенное в этом параграфе, мы можем отметить следующее. Воздействующие на человека сложные колебательные процессы могут быть периодически, квазипериодическими или, чаще всего, комбинарованными, состоящими из сложных периодических колебаний, обусловленных числом циклов или оборотов машины и ее вспомогательных механизмов, и беспорядочных вибраций, вызываемых случайными причинами.

Характеристикой таких процессов, определяющей возникающие в организме нарушения физиологических функций при прочих равных условиях, является колебательная мощность процесса в зоне контакта тела человека с вибрирующей поверхностью. Эта мощность пропорциональна произведению мгновенных значений квадрата колебательной скорости и сопротивления колебательному движению; она представляет собой производную по времени воздействующей энергии и отражает тем самым скорость нарастания или спада энергетически воздействующего раздражителя. Колебательная мощность за период повторения формы сложного колебательного процесса равна сумме мощностей слагаемых колебаний, однако за доли этого периода она может быть как больше, так и меньше этой суммы.

Если период повторения формы сложного колебательного процесса больше абсолютного рефрактерного периода рецептора, неравенство колебательной мощности сумме мощностей слагаемых колебаний, образующих

два сложных процесса, различающихся только своей формой, может обуславливать различный ритм энергетического воздействия и вызывать различные по величине нарушения физиологических функций. Для объяснения этих различий нет оснований для изыскания дополнительных к мощности критериев в виде «крутизна фронта» или «формы сигнала», поскольку эта «крутизна» или «форма» определяется характером изменения во времени мгновенных значений колебательной мощности.

**ОСНОВЫ ИЗМЕРЕНИЯ ВИБРАЦИЙ ДЛЯ ИХ ГИГИЕНИЧЕСКОЙ
ОЦЕНКИ И АМПЛИТУДНО-ЧАСТОТНЫЕ И ВЕРОЯТНОСТНЫЕ
ХАРАКТЕРИСТИКИ ВИБРАЦИЙ МЕХАНИЗИРОВАННОГО
ИНСТРУМЕНТА**

Для полного представления о характере воздействующей на человека вибрации целесообразно измерять ее амплитудно-временную и амплитудно-частотную характеристики, т. е. иметь вибро- и спектрограмму колебательного процесса.

Условия измерения. Все измерения следует проводить в том характерном режиме работы технологического оборудования или механизированного инструмента, при котором можно ожидать наиболее неблагоприятных воздействий вибраций на человека. Так, например, для оценки вибрации электрических сверл, пневматических, рубильных или отбойных молотков, измерения должны проводиться с проектной силой нажатия на инструмент, в проектном режиме напряжения электросети или давления воздуха у молотка и при сверлении, рубке или разрушении наиболее твердых материалов. При оценке вибрации сельскохозяйственных, дорожно-строительных и других типов самоходных или прицепных машин измерения следует проводить при движении по характерному для эксплуатации машин профилю грунта со скоростью движения, вызывающей наибольшие вибрации на рабочих местах машин и, кроме того, в характерном режиме работы привода к рабочим органам, выполняющим при движении или стоянке те или иные технологические операции.

Измерение вибраций на рабочих местах в производственных цехах проводится при полностью или не менее чем на две трети работающем технологическом оборудовании.

довании с обязательным включением агрегатов с наименьшим числом оборотов, создающих вибрации с основными частотами, близкими к собственным частотам колебаний строительных конструкций или рабочих площадок. Не следует проводить измерение вибраций в «узлах» колебаний, т. е. в точках, соответствующих минимальным величинам колебаний, обусловленным возникающими стоячими волнами в конструкциях.

Место замера вибраций следует выбирать в зоне контакта тела человека с вибрирующими поверхностями. Такими местами являются: рукоятки или вставные рабочие органы инструментов; рычаги управления движением или удерживаемые руками обрабатываемые изделия; сидения или площадки в местах наиболее частого пребывания работающих.

Приемники (датчики) вибраций следует ориентировать в направлении наибольшей величины колебаний, определяемом пробными замерами в трех взаимно перпендикулярных направлениях.

Измеряемые величины. Во всех случаях в качестве измеряемого кинематического параметра вибрации следует принимать среднеквадратичные значения колебательной скорости, измеряемые с постоянной времени прибора не менее одного периода колебаний с наименьшей частотой.

Для характеристики низкочастотных импульсных вибраций, кроме того, целесообразно проводить статистический анализ распределения амплитуд в частотных полосах спектра и измерять квазипиковые величины колебательных скоростей с постоянной времени не более 100 мс. Так как частотный диапазон вибраций, воздействующих на человека, колеблется в широких пределах, а ощущение вибраций как колебательного процесса ограничивается диапазоном около 2000 Гц, то за верхний предел частот следует принимать частоту не менее 2800 Гц, а за ее нижний предел частоты не менее чем на две октавы ниже низшего числа оборотов машин вращательного действия или числа циклов машин возвратно-поступательного движения. Поскольку, как мы увидим далее, пороги восприятия вибраций практически не изменяются при изменении ширины полосы частот от одной трети до одной октавы, весь частотный диапазон измеряемых параметров вибраций следует разделять на полосы шириной в одну октаву, т. е. полосы, конечная

частота которых f_k в 2 раза больше ее начальной частоты f_n .

Измеряемые величины колебательных скоростей в октавных полосах частот следует относить к среднегеометрическим частотам полос, определяемым равенством:

$$f_{сг} = \sqrt[10]{f_k \cdot f_n} = 1,414 f_n. \quad (2-3-1)$$

Величины среднегеометрических частот $f_{сг}$ октавных полос в целях унификации замеров целесообразно принимать соответственно рекомендованному Международной организацией по стандартизации (ИСО) следующему предпочтительному ряду частот: 32—63—125—250—500—1000—2000 и т. д. Гц, применяемому для измерения уровней звукового давления, экстраполируя этот ряд в сторону меньших частот до 0,5 Гц, т. е. в диапазоне: 0,5—1—2—4—8—16—32...

Поскольку величины колебательных скоростей в зоне контакта в зависимости от источников вибрации могут изменяться в 1000 и более раз, пользование линейной шкалой их измерений практически невозможно, поэтому для сопоставимости результатов замеров в качестве единого измеряемого показателя следует принимать уровни колебательной скорости, измеряемые в логарифмических единицах — децибелах, в диапазоне от 60 до 140 дБ с точностью не менее $\pm 1,5$ дБ. Напомним, что децибелом называют десятикратный десятичный логарифм отношения двух любых величин, из которых одна принимается за единицу сравнения и называется пороговой величиной. Уровни среднеквадратичных колебательных скоростей в децибелах определяют по формуле:

$$L = 10 \lg \left(\frac{v_{ск}}{v_0} \right)^2 = 20 \lg \frac{v_{ск}}{v_0}, \quad (2-3-2)$$

где L — уровни среднеквадратичной колебательной скорости в децибелах; $v_{ск}$ — абсолютная величина среднеквадратичной скорости; v_0 — пороговая величина колебательной скорости.

Следует указать, что выбор величины пороговой скорости принципиально безразличен, так как с ее изменением уровни измеряемых колебательных скоростей изменяются на одну и ту же постоянную величину ΔL . Но принятую пороговую величину следует указывать:

$$\Delta L = 20 \lg \frac{v_{ск}}{v_0} - 20 \lg \frac{v_{ск}}{v'_0} = 20 \lg \frac{v'_0}{v_0}. \quad (2-3-3)$$

Как известно, вибрации воспринимаются человеком не только сенсорными системами — вестибулярным аппаратом и кожными анализаторами, но и множеством проприо- и интероцепторов, расположенных в зоне распространения вибраций по телу человека. Пороги восприятия этих рецепторных групп не только различны для различных людей и различных участков кожного покрова, но и неизвестны для ряда проприо- и интероцепторов. Поэтому использование рецепторов и порога их чувствительности для определения уровня колебательной скорости не может быть убедительно обосновано, так как их частный порог не может характеризовать надпороговые величины раздражителей для других органов и структур организма. Поэтому в качестве пороговой величины колебательной скорости целесообразно принимать скорость, соответствующую стандартизованной величине порогового звукового давления, положенного в основу измерения уровней звуков и шума. Численно величина этой скорости равна:

$$v_0 = \frac{P_0}{\rho_0 c_0} = \frac{2 \cdot 10^{-5}}{400} = 5 \cdot 10^{-8} \text{ м/с}, \quad (2-3-4)$$

где P_0 , $\rho_0 c_0$ — звуковое давление и волновое сопротивление воздушной среды.

Использование этой величины в качестве эталона имеет то очевидное преимущество, что позволяет создавать универсальные виброакустические приборы с единой шкалой измерений для шумов и вибраций, а в ряде случаев дает возможность судить о вероятных величинах шумов по величинам замеренных уровней вибраций, и наоборот.

В соответствии с указанной пороговой величиной колебательной скорости и формулой (2-3-3) связь между уровнями колебательной скорости и ее абсолютными величинами устанавливается равенством:

$$L = 20 \lg \frac{v_{\text{ск}}}{5 \cdot 10^{-8}} \text{ дБ}$$

$$\text{или } v_{\text{ск}} = 5 \cdot 10^{0,05L-8} \quad (2-3-5)$$

Так, при уровне среднеквадратичной колебательной скорости $L=120$ дБ ее абсолютная величина будет равна $v_{\text{ск}}=0,05$ м/с.

В эксплуатационных условиях для контроля параметров вибрации на соответствие санитарным нормам в

каждой точке замера необходимо проводить не менее трех измерений с усреднением полученных результатов арифметически, если разброс показаний уровней L_6 , L_1 и L_2 не превосходит 5 дБ, и энергетически, если этот разброс превышает 5 дБ. В последнем случае среднюю величину показаний можно определять по формулам:

$$L_{cp} = L_6 + \Delta_1 + \Delta_2 - 5 \text{ дБ}, \quad \Delta_n = 10 \lg(1 + 10^{-0,1 \Delta L}) \quad (2-3-6)$$

где L_6 — наибольшее из трех замеренных показаний; Δ_1 — добавка в децибелах, определяемая по формуле (2-3-6) при разности уровней $\Delta L_1 = L_6 - L_1$ дБ; Δ_2 — добавка в децибелах, определяемая по той же формуле при разности уровней $\Delta L_2 = (L_6 + \Delta_1) - L_2$ дБ. Так, при $L_6 = 110$ дБ; $L_1 = 100$ дБ; $L_2 = 95$ дБ.

$$L_{cp} = 110 + 0,4 + 0,1 - 5 = 105,5 \text{ дБ},$$

где $0,4 = 10 \lg(1 + 10^{-0,1 \cdot 10})$; $0,1 = 10 \lg(1 + 10^{-0,1 \cdot 15,4})$

Комплектация аппаратуры для измерения вибраций в гигиенических целях. Комплект измерительной аппаратуры для контроля вибраций на соответствие санитарным нормам должен состоять как минимум из следующих элементов: датчика, прибора-усилителя и набора октавных фильтров.

Датчик (приемник) вибраций должен обеспечивать надежные измерения в выбранном направлении и иметь вес, практически не влияющий на изменение колебательных скоростей вибрирующих поверхностей в месте замеров. Для гигиенической оценки вибраций этот вес должен быть не более 100 г при измерении вибрации рабочих мест, не более 60 г при измерении вибрации механизированного инструмента и рычагов управления и не должен превышать 3 г для измерения вибраций, распространяющихся по телу человека. Датчик должен быть снабжен: экранированным удлинительным кабелем с катодным повторителем для замера в неудобных местах. При этом емкость кабеля не должна искажать измеряемых величин.

Прибор-усилитель для измерения уровней колебательных скоростей в пределах от 60 и до 140 дБ должен иметь стрелочный указатель, градуированный в децибелах с ценой деления шкалы в 1 дБ и выход для возможности присоединения к нему самописца уровней или электронного осциллографа.

Для измерения уровней в октавных полосах частот со среднегеометрическими частотами желательно иметь набор октавных фильтров от 0,5 Гц (но не более 2 Гц) до 12 000 Гц (но не менее 2800 Гц).

Комплект должен удовлетворять техническим требованиям Международной электротехнической комиссии (МЭК) в части линейности частотных характеристик, допусков нелинейных искажений, классов точности и др. и должен не реже 1 раза в год проходить проверку в организациях Государственного комитета стандартов, мер и измерительных приборов с получением паспорта тарировочных поправок, вносимых в измеряемые величины.

При пользовании измерительными приборами следует строго соблюдать требования инструкции по их эксплуатации, прилагаемой заводами-изготовителями к поставляемым комплектам, обращая особое внимание на указания по калибровке приборов перед замерах и по креплению датчиков к вибрирующей поверхности.

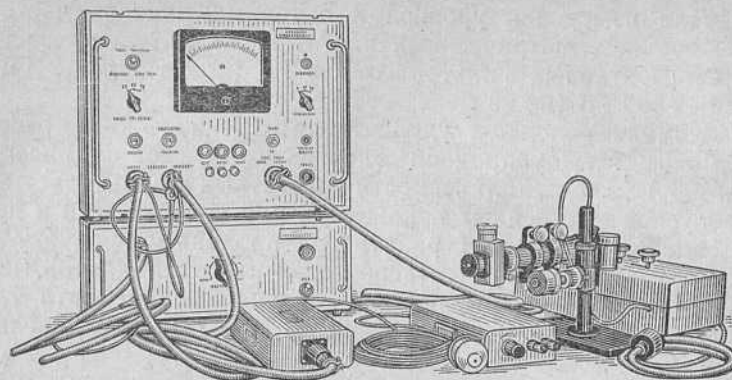
Хранить измерительную аппаратуру следует в сухом, отапливаемом помещении при температуре не ниже 18 °С. При перевозке приборов к объектам измерений автотранспортом приборы следует устанавливать с креплением, амортизирующим дорожные толчки и тряску.

Из зарубежных приборов фирм социалистических стран для измерения вибраций в гигиенических целях могут быть рекомендованы комплекты приборов фирмы RFT Германской Демократической Республики — виброметр TSM-101 с октавными фильтрами к нему OF-101 и OF-102.

Лучшими из приборов капиталистических стран являются получившие широкое распространение и хорошо известные в Советском Союзе прецизионные измерительные приборы датской фирмы «Брюль и Кьер»: комплект типа 3501, включающий шумомер 2203, октавные фильтры к нему типа 1613, интегратор ZR-0020 и набор пьезодатчиков 4312.

Техника работы с приборами аналогична применяемой при замерах шумов.

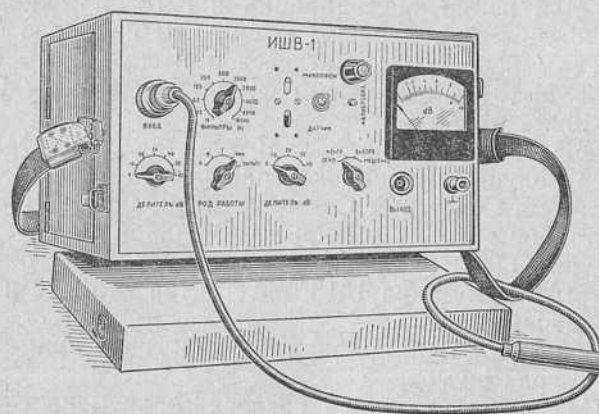
В Советском Союзе до последнего времени серийная аппаратура для измерений вибраций в гигиенических целях не изготовлялась. Как отмечалось выше, вибрацию измеряли виброметром ВР-1 и оценивали суммар-



10. Комплект аппаратуры НВА-1 для измерения стабильных вибраций.

ным ускорением или смещением и основной частотой, соответствующей числу оборотов и рабочих циклов машин, реже — записью виброграммы процесса с последующим приближенным гармоническим анализом.

В 1965 г. по инициативе автора Институтом гигиены труда и профессиональных заболеваний АМН СССР было разработано медико-техническое задание на изготовление серийной универсальной прецизионной вибро-



11. Комплект аппаратуры ИШВ-1 для измерения шума и вибраций.

акустической аппаратуры для измерения и контроля на соответствие санитарным нормам уровней производственных шумов и вибраций. Это задание, согласованное с органами санитарного надзора, ведущими ведомственными техническими организациями, было передано для реализации соответствующему министерству.

В 1969 г. Таганрогским заводом «Виброприбор» на основе этого задания была изготовлена первая партия приборов двух типов — ИШВ-1 и НВА-1. Серийный выпуск их начался с 1971 г.

Общий вид указанной аппаратуры представлен на рис. 10, 11.

Ниже приведена техническая характеристика этой аппаратуры.

Низкочастотная виброизмерительная аппаратура НВА-1 для стабильных вибраций

Измеряемый параметр — октавные уровни среднеквадратичных значений колебательной скорости. Частотный диапазон от 1,4 до 355 Гц.

Амплитудный диапазон измерений от 70 до 130 дБ.

Погрешность измерения не более $\pm 1,5$ дБ.

Питание от сети переменного тока 50 Гц, 127/220 В (или батарей элементов СЦМ-15).

Общий вес измерительной части комплекта аппаратуры 15 кг.

Комплектация — 2 датчика, усилитель, октавные фильтры, калибратор.

Измеритель шума и вибраций ИШВ-1

Измеряемые параметры — октавные уровни среднеквадратичного значения звукового давления или колебательной скорости.

Частотный диапазон измерений шума от 22 до 12 000 Гц.

вибраций от 11 до 12 000 Гц.

Амплитудный диапазон измерений шума от 30 до 150 дБ.

» » » вибраций от 11 до 12 000 Гц.

Погрешность измерения не более ± 1 дБ.

Питание от сети переменного тока 50 Гц, 127/220 В (или от батарей типа «Сатурн»).

Общий вес измерительной части комплекта 12 кг.

Комплектация — датчик, микрофон, усилитель, октавные фильтры, удлинительный кабель, калибраторы.

Для углубленных исследований амплитудно-временных и вероятностных характеристик колебательных процессов, помимо указанной выше аппаратуры, целесообразно использование приборов датской фирмы «Брюль и Кьер»:

лабораторного двухканального с частотной модуляцией магнитного типа 7001;

статистического 12-канального анализатора распределения типа 4420 со скоростью счета: один отсчет за 0,1—0,3—1—3—10 и узко-

полосного частотного анализатора 2107 с постоянной относительной шириной полосы пропускания в диапазоне от 2 до 20 000 Гц в комплекте с самописцем 2305.

Амплитудно-частотные и вероятностные характеристики вибраций механизированного инструмента. С целью определения области, охватываемой амплитудно-частотными характеристиками наиболее распространенных видов механизированного инструмента, были проведены измерения спектров среднеквадратичных значений уровней колебательных скоростей, возникающих в процессе работ инструментом на их рукоятках или вставных рабочих органах, для: пневматических трамбовок типа ПТ, перфораторов марки ПР; рубильно-чеканных (Р, МР) и клепальных (57КМП) молотков; шлифовальных машин (ПШМ, ЭП, У), бензомоторных пил «Дружба» и др.

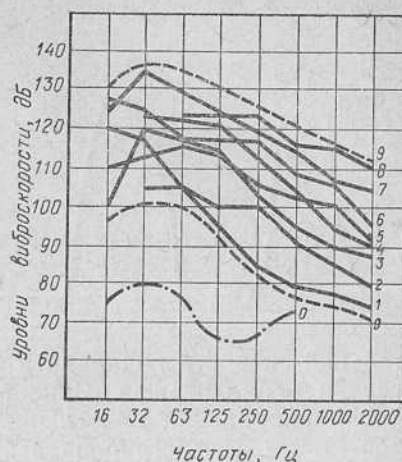
Измерения проводились 5—15 раз по каждому виду оборудования, в основном в октавных и реже в $1/3$ —октавных полосах частот, в диапазоне среднегеометрических частот октав от 16 до 2000 Гц, и осуществлялись: до 1963 г. записью ускорений на магнитофоне МЭЗ-29 с привязкой по общему уровню прибором УВ-7-59 «ЦНИИТМАШ» и с последующим спектральным анализом на отечественном спектрометре звуковых частот (СЗЧ), а позднее — портативным и лабораторным комплектами прецизионной виброакустической аппаратуры датской фирмы «Брюль и Кьер», состоящими из: спектрометра 2112, комплекта октавных фильтров 1620 и 1613, самописца 2305, интегратора ZR-0020 и набора акселерометров 4312.

Замеренные спектры усреднялись по каждому виду оборудования с определением среднеквадратичных отклонений от средних величин.

Анализ замеренных спектров показал, что эти отклонения колеблются от 3 до 15 дБ в зависимости от технического состояния инструмента, рода работ, твердости и состояния поверхности обрабатываемого материала или изделия, сорта абразива и диаметра шлифовального круга, давления в сети сжатого воздуха у пневмоинструмента, силы нажима и навыка работающего, а также от других факторов. Усредненные спектры в область амплитудно-частотных характеристик, наиболее распространенных видов механизированного инструмента, приведены на рис. 12. Можно видеть, что уровни

12. Средние спектры и область амплитудно-частотных характеристик наиболее распространенных видов механизированного инструмента.

0 — пороги кожной чувствительности; 1 — пневматические трамбовки; 2 — электропилы; 3 — клепальные молотки; 4 — перфораторы; 5 — шлифовальные машинки; 6 — бензомоторные пилы; 7 — рубильно-чеканящие молотки; 8 — станки динамического наклепа; 9 — область спектров вибрации ручных машин.

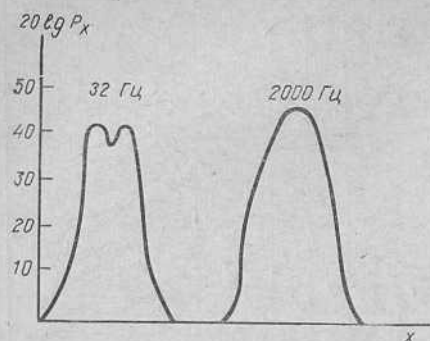


среднеквадратичных значений колебательных скоростей вибрирующих рукояток инструмента превосходят пороги восприятия на 20—60 дБ, т. е. в 10—1000 раз. Кроме того, анализ спектров, измеренных в более узких $1/3$ октавных полосах частот, показал, что в низкочастотной части спектра превалируют уровни на дискретных частотах от первой до четвертой гармоники числа циклов машин возвратно-поступательного движения или числа оборотов вала машин вращательного действия.

В области более высоких частот, 100—2000 Гц, уровни в спектре определяются беспорядочными широкополосными вибрациями. Дополнительная проверка комбинированного характера вибраций механизированного инструмента, состоящих из сложных колебаний дискретных частот и беспорядочных случайных вибраций, была проведена регистрацией плотности (p_x) распределения мгновенных амплитуд виброскорости в октавных полосах частот.

$$p_x = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{p_{x+\Delta x} - p_x}{\Delta x} \quad \text{при } \Delta x \rightarrow 0, \quad (2-3-7)$$

Установка для регистрации состояла из магнитофона ТР-2 датской фирмы «Лирик», отечественного осциллографа ЭО-7 с фотоумножителем ФЭУ-19, усилителя 2603 и самописца уровня 2305 датской фирмы «Брюль и Кьер». Диапазон регистрации составлял около 40 дБ. Записанные на магнитофон уровни мгновенной колеба-



13. Кривые плотности распределения амплитуд для октавных полос с выраженными дискретными составляющими (32 Гц) и беспорядочными вибрациями (2000 Гц).

тельной скорости подавались на вход вертикальной развертки осциллографа. Яркость сигнала на его экране, пропорциональная длительности его пребывания в данной точке, регистрировалась фотоумножителем, представленным к экрану, на который была наложена неподвижная маска с узкой щелью (Δx), определяющей разрешающую способность установки по амплитуде. Синхронизация движения бумаги самописца с перемещением изображения на экране позволяла регистрировать плотность амплитуд автоматически, в логарифмическом масштабе. Время усреднения, определяемое длиной щели и частотой развертки, составляло около 1 с. Длительность всей записи кривой плотности распределения амплитуд составляла 10—15 с. Типичные кривые плотности распределения амплитуд двух частотных полос приведены на рис. 13. Можно видеть, что для полос с преобладающим уровнем на дискретных частотах распределение соответствует распределению синусоидального сигнала, для полос без выраженных уровней на дискретных частотах распределение близко к нормальному — гауссову.

Изложенное в этом параграфе позволяет сделать некоторые выводы.

Вибрации, воздействующие на человека, в зоне контакта тела с вибрирующими поверхностями, представляют собой колебательный процесс с широким, почти сплошным спектром и флюктуирующими во времени амплитудами, состоящий как из сложных периодических колебаний дискретных частот, кратных секунднему числу оборотов или рабочих циклов машин, так и из широкополосных беспорядочных вибраций, обусловленных случайными причинами.

Гигиеническую оценку таких вибраций следует проводить по амплитудно-частотной характеристике колебательной скорости, измеряя уровни ее среднеквадратичных значений в децибелах относительно $5 \cdot 10^{-8}$ м/с, в октавных полосах частот со среднегеометрическими частотами от 2000 Гц до значений, на две октавы меньших секундного числа оборотов или цикла машины.

Измерения следует проводить в зоне контакта тела с вибрирующими поверхностями в режиме работы оборудования, обуславливающим наибольшие величины возникающих вибраций.

Аппаратура, используемая для измерения вибраций в гигиенических целях, должна обеспечивать замеры с точностью не ниже допустимой для приборов второго класса.

Исправность аппаратуры должна проверяться не менее 1 раза в год в организациях Государственного комитета стандартов, меры измерительных приборов и, кроме того, в эксплуатационных условиях перед и после каждой серии замеров.

ГЛАВА III

БИОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ТЕОРИИ КОЛЕБАНИЙ МЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

В этой главе мы рассмотрим на основе фундаментальных работ по теории колебаний (Ден Гартога, 1960; С. П. Тимошенко, Ф. Морза, 1949; Г. Кольского, 1955; Олсена, 1947, и др.) физическую основу биологического действия вибраций — реакцию и поведение механических систем при возбуждении колебаний. Целесообразность такого исследования обосновывается тем, что вибрация является механическим воздействующим фактором, а тело человека, если не учитывать возникающих в организме биохимических и биоэлектрических процессов, представляет собой механическую колебательную систему, а также тем, что специфика проявления биологического действия вибраций связана с особенностями ее первичного механического воздействия.

Основной задачей этого исследования является получение некоторых обобщенных выводов из теории колебаний, имеющих значение как для суждения об ожидаемых характерных проявлениях нарушений физиологических функций организма, возникающих от воздействия вибраций, так и для постановки исследований по проверке этих выводов и использованию их результатов для научного обоснования гигиенического нормирования вибраций.

Такая цель позволяет нам, во-первых, не вникать в детали, отличающие реакцию тела человека от реакции простой колебательной системы, а рассматривать только то общее, что характерно для любых механических колебательных систем, а во-вторых, существенно упростить исследование, ограничиваясь рассмотрением простейших колебательных систем (с распределенными и сосредоточенными параметрами), колеблющихся в линейном режиме, т. е. не учитывать специфики биологических объектов, являющихся сложными комбинированными системами с множественными обратными связями

и характеризующихся нелинейностью при интенсивных колебательных процессах и взаимосвязанностью различных мод колебаний, сложными волновыми процессами распространения различных видов колебаний в неоднородных средах и наличием постоянного собственного источника импульсных низкочастотных колебаний — сердечной деятельности.

Поскольку задача исследования связана с биологическим аспектом рассматриваемых физических процессов, мы хотели бы здесь высказать некоторые соображения относительно примененного метода исследования и общеизвестного скептического отношения широких кругов медиков и биологов к физико-математическим исследованиям механических и электрических аналогов биологических объектов и тем более к интерпретации на основе таких исследований особенностей проявления биологического действия вибраций. Мы надеемся, что результаты нашей работы окажутся достаточно убедительными, чтобы изменить, хотя бы в частном случае, эту точку зрения, обусловленную, как нам представляется, двумя основными причинами. Главная из них та, что, не отрицая в принципе значения физико-математических методов в биологии и медицине, и биологи, и медики всегда ожидают от таких исследований полной ясности анализа рассматриваемого явления во всех интересующих их аспектах, в то время как физики и математики, как правило, допускают некоторые упрощения в постановке задачи исследования, исключая из рассмотрения ряд факторов и их влияние с целью получения более четкого описания основных явлений или закономерностей.

Известно, что все классические теории рассматривали абстрагированные структуры и процессы: идеальные газы и жидкости, абсолютно жесткие массы и невесомые упругие связи, процессы без трения и др. При этом ни одно теоретическое исследование никогда не претендовало на то, чтобы описывать в мельчайших деталях ту или иную структуру или функции во всех возможных аспектах их рассмотрения. Тем не менее такие исследования в той или иной мере приносили практическую пользу и способствовали постепенному развитию науки.

В качестве примера можно указать на сформулированные в общем виде и имеющие смысл законов такие физиологические зависимости как сила и длительность

раздражения, раздражение и ощущение и др. В этом отношении мы вынуждены идти тем же путем, тем более что попытка учета всех возможных деталей, как правило, приводит не только к сложным, громоздким, а порой и неосуществимым решениям, но и к потере их познавательной ценности.

Другой немаловажной причиной является «языковой барьер», часто затрудняющий биологам и медикам чтение математического изложения. Это затруднение мы стремились преодолеть введением в текст дополнительных пояснений, излишних для физиков и инженеров, и использованием по возможности более простого математического аппарата, чем это следовало бы, и мы надеемся, что это будет оправдано.

РАСПРОСТРАНЕНИЕ ПРОДОЛЬНЫХ КОЛЕБАНИЙ В СПЛОШНЫХ ОГРАНИЧЕННЫХ СРЕДАХ

Бегущие волны. Для того чтобы представить себе, какие характерные физические явления, имеющие интерес для оценки особенностей биологического действия вибраций, могут возникать при ее действии в структурах тела человека, представляющих собой ограниченную сплошную неоднородную среду с распределенными параметрами массы жесткости и трения, рассмотрим распространение колебательного процесса в однородной упругой среде при возбуждении в ней возвратно-поступательных колебаний. Такие колебания называют продольными, так как направление движения колеблющихся частиц среды совпадает с направлением распространения колебательного процесса. Они вызывают в упругой среде чередующиеся сжатия и растяжения любого ее элементарного объема, т. е. его деформацию, возникновение в нем внутренних напряжений, обуславливая передачу и трансформацию энергии, связанную с изменениями состояния среды.

Выделим из упругой среды брусок малого поперечного сечения s и неограниченной длины $l = \infty$ и рассмотрим распространение в нем колебаний в отсутствие поглощения энергии в среде и при неизменности формы плоских поперечных сечений бруска при распространении по нему колебательного процесса.

Если в левом торце бруска каким-либо способом возбудить синусоидальные колебания, то они, вызывая сме-

щение соседних частиц и передавая им колебательную энергию, будут распространяться вдоль бруска в виде бегущей волны с некоторой постоянной скоростью c распространения, зависящей только от свойств среды — ее плотности ρ и модуля продольной упругости E .

Эту скорость называют скоростью распространения продольных волн напряжения или скоростью звука, и она определяется равенством:

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}}, \quad (3-1-1)$$

указывающим, что скорость продольных волн не зависит от частоты колебаний, а ее величина тем больше, чем жестче (E) и легче материал бруска (ρ).

Поскольку на брусок в процессе колебания никакие внешние силы не действуют и в нем отсутствует поглощение энергии, в том числе излучением в окружающую среду, баланс сил или уравнение движения для любого элементарного объема бруска, заключенного между его поперечными сечениями I и II, находящимися на расстояниях x и $x+\Delta x$ от левого торца, может быть записан в виде

$$\rho s \Delta x \frac{\Delta v}{\Delta t} = s [\sigma_{x+\Delta x} - \sigma_x],$$

где левая часть равенства представляет собой инерционную силу, равную произведению массы $\rho s \Delta x$ элементарного объема $s \Delta x$ с плотностью ρ на сообщенное ее центру тяжести ускорение $\frac{\Delta v}{\Delta t}$ колебательного движения,

а правая — силу упругого противодействия, равного произведению площади поперечного сечения бруска на разность напряжений $\sigma_{x+\Delta x} - \sigma_x$, возникающих в его сечениях I и II. Деля обе части равенства на элементарный объем $s \Delta x$, найдем в пределе при Δx стремящемся к нулю, что

$$\rho \frac{\partial v}{\partial t} = \frac{\partial \sigma}{\partial x}, \quad (3-1-2)$$

где $\frac{\partial v}{\partial t}$ — частная производная колебательной скорости по времени; $\frac{\partial \sigma}{\partial x}$ — частная производная напряжения по пространству.

Равенство (3-1-2) называют волновым уравнением плоской волны. Его решение указывает, что изменение смещений в пространстве и времени при распространении колебаний вдоль бруска определяется зависимостью вида

$$x = A \sin \omega \left(t - \frac{x}{c} \right) \quad (3-1-3)$$

и что смещение x в любом сечении бруска, находящемся на расстоянии x от его левого торца, воспроизводит смещение в плоскости возбуждения при $x=0$ с запаздыванием на время $\frac{x}{c}$. Кроме того, из равенства (3-1-3) следует, что при

$$x = \lambda = \frac{c}{f} \quad \sin \omega \left(t - \frac{x}{c} \right) = \sin \omega t.$$

Это означает, что во всех сечениях бруска, отстоящих друг от друга на расстоянии λ , колебания в любой момент времени совершаются в одинаковой фазе.

Величину λ называют длиной продольной волны. Она зависит как от скорости распространения c продольных волн, так и от частоты f колебаний, а ее величина тем больше, чем больше эта скорость и чем меньше частота колебаний. Длина волны является важным параметром волнового движения распространения колебательного процесса, указывающим, в частности, на какое расстояние распространяется колебательный процесс за один период колебания.

Колебательную скорость v и ускорение a колебательного движения найдем, как производные смещения по времени

$$v = A\omega \cos \omega \left(t - \frac{x}{c} \right); \quad (3-1-4)$$

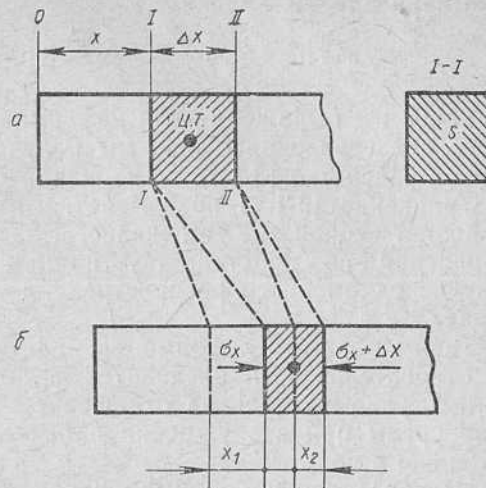
$$a = -A\omega^2 \sin \omega \left(t - \frac{x}{c} \right). \quad (3-1-5)$$

Напряжение, возникающее в любой точке бруска при малых амплитудах колебаний, в соответствии с законом Гука о его пропорциональности модулю упругости E среды и деформации ϵ элементарного объема бруска определяется равенством:

$$\sigma = \epsilon E. \quad (3-1-6)$$

14. Схема деформации бруска при его колебании.

a — брусок до колебания;
б — брусок при колебании.



Если напряжение как частное от деления силы на площадь, перпендикулярную ее направлению, при равномерном распределении действия силы является общепринятым понятием, то деформацию нередко отождествляют со смещением и это понятие требует некоторого уточнения.

Выделим в неколеблущемся бруске два поперечных сечения I и II (рис. 14), отстоящих на расстоянии от левого торца x и $x + \Delta x$, а друг от друга на Δx . Если в бруске возбудить продольные колебания, то оба выделенных сечения сместятся, но на разную величину, определяемую равенствами:

$$x_1 = A \sin \omega \left(t - \frac{x}{c} \right) \quad x_2 = A \sin \omega \left(t - \frac{x}{c} - \frac{\Delta x}{c} \right).$$

При одной и той же амплитуде A смещения разность смещений $x_2 - x_1$ может быть выражена через удвоенное произведение косинуса полусуммы углов на синус их полуразности и записана в виде

$$x_2 - x_1 = 2A \cos \omega \left(t - \frac{x}{c} - \frac{\Delta x}{c} \right) \sin \frac{\omega \Delta x}{c}.$$

Для разности смещений $x_2 - x_1$ колеблющегося бруска на расстоянии Δx между сечениями неколеблущегося бруска, найдем в пределе при уменьшении расстояния Δx

до нуля искомую деформацию ε в любом сечении бруска. При $\Delta x \rightarrow 0$

$$\varepsilon = \lim \frac{x_2 - x_1}{\Delta x} = -\frac{A\omega}{c} \cos \omega \left(t - \frac{x}{c} \right). \quad (3-1-7)$$

Такое же выражение для деформации, но без наглядного представления о ней, мы получили бы, дифференцируя равенство (3-1-3) по координате x .

Уравнение (3-1-7) показывает, что деформация представляет собой не смещение, а частную производную смещения по пространству или, в рассматриваемом случае одномерного распространения колебаний, по координате x .

Таким образом, деформация является не абсолютной, а относительной и, следовательно, безразмерной величиной, указывающей на отношение измененного состояния среды при возбуждении в ней колебаний к ее состоянию в покое.

Из определения деформации как производной смещения следует, что деформации малы вблизи амплитудных значений смещений, т. е. там, где в смежных сечениях смещения изменяются плавно, и они велики вблизи нулевых значений смещений, где изменения смещений в смежных сечениях более резки. Знак «минус» в равенстве (3-1-7) указывает на уменьшение элементарного объема среды по сравнению с его начальной величиной, т. е. сжатие объема $\varepsilon < 0$, а знак «плюс» означает увеличение объема, т. е. его растяжение при распространении колебаний $\varepsilon > 0$.

В общем случае действие колебательного процесса может вызывать либо деформацию частиц, т. е. изменение ее формы без смещения ее центра тяжести, либо перемещение центра тяжести всей частицы без изменения ее формы, либо то и другое.

В биологическом аспекте переменные деформации, вызываемые колебательным процессом в тканях тела человека, являются одним из основных факторов, определяющих как первичную реакцию чувствительных элементов этих тканей, так и последующий рефлекторный ответ всего организма на действие внешнего раздражителя.

Различие в знаках деформаций как их качественного признака влечет за собой и различие в знаках напряжений σ , поскольку последние в соответствии с равенством

Перемножая выражения для давления p и колебательной скорости v , мы найдем интенсивность I колебательного процесса в бегущей волне, т. е. количество колебательной энергии, протекающей в единицу времени через единицу площади поперечного сечения бруска при распространении по нему колебаний:

$$I = pv = A^2 \omega^2 \rho c \cos^2 \omega \left(t - \frac{x}{c} \right) = \\ = \frac{1}{2} A^2 \omega^2 \rho c \left[1 + \cos 2\omega \left(t - \frac{x}{c} \right) \right]. \quad (3-1-12)$$

Равенство показывает, что интенсивность колебаний пропорциональна квадрату среднеквадратичной $\frac{1}{2} A^2 \omega^2$ колебательной скорости и характеристическому импедансу среды $Z_{уд} = \rho c$ и изменяется в пространстве и времени около ее среднего положительного значения $\frac{1}{2} A^2 \omega^2 \rho c$ по закону косинуса удвоенной частоты колебаний. Последнее означает, что поток энергии через любое сечение бруска дважды за период колебания достигает максимальной величины, равной $A^2 \omega^2 \rho c$ — сумме его кинетической и потенциальной энергии в тот момент, когда скорость и давление максимальны, и дважды обращается в нуль, когда колебательная скорость и давление равны нулю.

Если умножить интенсивность колебаний I на площадь s поперечного сечения бруска, мы получим полную мощность W колебательного процесса, т. е. работу, которую должен произвести в единицу времени источник колебания по преодолению внутренних сил сопротивления среды при распространении в ней колебательного процесса.

$$W = I \cdot s = \frac{1}{2} A^2 \omega^2 \rho c s \left[1 + \cos 2\omega \left(t - \frac{x}{c} \right) \right]. \quad (3-1-13)$$

В этом равенстве произведение $\rho c s$ представляет собой входной механический импеданс бруска $Z_{вх}$, т. е. полное сопротивление, оказываемое средой распространению колебаний. Оно не зависит ни от длины бруска, ни от частоты колебаний, а определяется только площадью s сечения бруска и волновым сопротивлением среды ρc .

Мощность колебательного процесса, так же как его интенсивность, пропорциональна квадрату среднеквад-

ратичной колебательной скорости и изменяется во времени и в пространстве по тому же закону около средней величины, равной

$$W_{cp} = 1/2 A^2 \omega^2 \rho c s. \quad (3-1-14)$$

Обратим внимание на возможность двойственного толкования качества найденной полной мощности колебательного процесса. Действительно, оценивая ее с позиции источника колебания, мы можем считать эту мощность «активной», так как источник полностью отдает ее бруску и она в нем рассеивается. Именно поэтому волновое сопротивление, определяющее качество мощности, обычно считают «активным» сопротивлением, несмотря на то что по своей физической природе это сопротивление упругости и инерции среды, и для бруса без потерь энергии оно реактивно.

С позиции внутренних процессов в бруске без поглощения колебательной энергии и трансформации ее в другие виды энергий, эта мощность «реактивна», поскольку она расходуется в бруске только на изменение положения в пространстве колеблющихся частиц среды. С физиолого-гигиенической точки зрения для характеристики вибраций как внешнего раздражителя основное значение имеет то, что эта мощность не возвращается источнику колебаний, и только в этом смысле мы можем считать ее «активной».

Интегрируя уравнение мощности колебательного процесса в пределах целого числа n периодов колебания или длин λ волн при любом начальном значении t_1 нижнего предела, найдем энергию E колебаний:

$$E = \int_{t_1}^{t_2+nT} W dt = 1/2 A^2 \omega^2 \rho c s n T = 1/2 A^2 \omega^2 \rho s n \lambda. \quad (3-1-15)$$

Равенство указывает, что чем длительнее (nT) работает источник колебания, подавая постоянное количество энергии $1/2 A^2 \omega^2 \rho c s$ в единицу времени, т. е. чем больше энергии он передает бруску, тем на большее расстояние ($n\lambda$) по длине бруска распространяются колебания; иначе говоря, процесс распространения колебаний требует непрерывной подачи постоянного количества энергии через левый торец бруска.

Обратим особое внимание на то, что колебательная мощность W является производной колебательной энер-

гии по времени и в биологическом аспекте представляет собой скорость воздействия энергии как внешнего раздражителя.

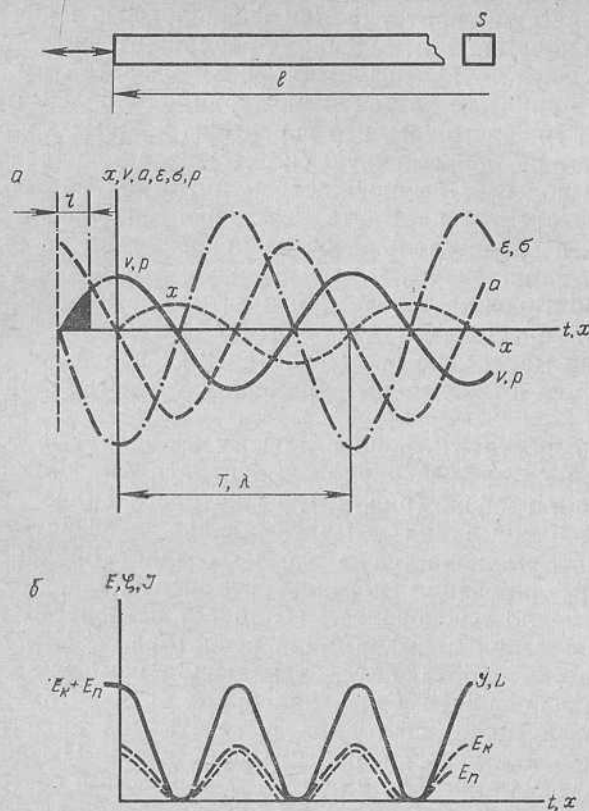
Энергия E колебаний, передаваемая бруску в единицу времени, движется по нему со скоростью c распространения продольной волны, обуславливая возникновение некоторой ее средней плотности в единице объема бруска, вовлеченного в колебательное движение. Величина этой средней плотности может быть найдена делением количества поданной энергии E (3-1-15) на объем бруска $nl\lambda$, охваченный колебательным процессом. Численно плотность энергии равна максимуму плотности кинетической энергии E_k или потенциальной энергии E_{π} колебаний, т. е.

$$\zeta = \frac{E}{V} = 1/2 A^2 \omega^2 \rho.$$

Плотность колебательной энергии в бруске изменяется во времени и в пространстве по тому же закону, что и интенсивность колебаний, и поэтому она максимальна и равна $A^2 \omega^2 \rho$ в каждый момент времени в тех его сечениях, где колебательная скорость и напряжение достигают наибольшей величины, а смещение и ускорение равны нулю, и она равна нулю в сечениях, где смещение и ускорения в данный момент времени максимальны.

Таким образом, при распространении в бруске неограниченной длины бегущей волны упругих колебаний деформации среды, напряжения в ней, интенсивность колебаний и плотность колебательной энергии, т. е. *все возможные динамические и энергетические характеристики колебательного процесса, определяющие эффект его биологического действия, пропорциональны колебательной скорости*, а их максимумы совпадают с минимумами смещения и ускорения.

Характер изменений во времени смещения x , колебательной скорости v , ускорения a колебательного движения, деформации ϵ и напряжений σ в бегущей волне показан на рис. 15. На левой части графика видно, что при силовом возбуждении вибрации первой по бруску начинает распространяться волна ускорения, за ней с интервалом в четверть периода или длины волны следуют волны: деформаций, напряжения, колебательной скорости и интенсивности колебаний; последней с тем же интервалом запаздывания распространяется волна сме-



15. Незатухающая бегущая волна. Характер изменения во времени и пространстве.

a — смещения x , колебательной скорости V , ускорения a , деформации ε , напряжения σ и давления p ; b — интенсивности I , энергии E , и ее плотности ζ в единице объема.

щения. Это создает представление о последовательности возникновения и распространения колебательного процесса. В нижней части рисунка показано изменение во времени интенсивности I полной энергии E колебаний и ее плотности ζ в единице объема среды.

Обратим внимание на то, что из анализа последовательности распространения колебательного процесса при его силовом возбуждении можно было бы прийти к выводу, что если смещение, возникающее позже всего, действительно нецелесообразно принимать за адекват-

ный физический критерий для физиолого-гигиенической оценки вибраций как внешнего раздражителя, то ускорение, воздействующее раньше всего, казалось бы, могло быть принятым за такой критерий, тем более что существует мнение о том, что рецепторы кожных покровов реагируют на приложенную силу, т. е. на ускорение. Но такой вывод был бы преждевременным. В действительности не следует забывать, что рецептор реагирует не на силу, а следовательно, не на ускорение, а на работу силы, т. е. на энергию, вызывающую его деформацию, и это подтверждается тем, что реакция любых рецепторов на внешнее раздражение характеризуется пусть ничтожно малым, но все же латентным периодом ее запаздывания относительно времени воздействия раздражителя.

Можно поставить вопрос, почему возникает и для чего нужен латентный период виброрецепции. Наглядный ответ дает график (рис. 15), из которого видно, что за время запаздывания τ максимальное воздействующее ускорение уменьшается и это не создает предпосылок для стимулирования деятельности рецептора, но зато одновременно с ускорением возникает и возрастает скорость движения и деформация рецептора, т. е. над ним совершается работа, обуславливающая изменение внутреннего давления в рецепторе и его биоэлектрического и биохимического состояния и требующая затраты на эти изменения энергии, поступающей извне. Именно эта колебательная энергия и приводит рецептор в состояние, способное к ответной реакции на нарушение его покоя. Поэтому-то и возникает латентный период t_0 реакции рецептора, и при прочих равных условиях он, очевидно, тем больше, чем менее чувствителен рецептор. Таким образом, само существование латентного периода реакции свидетельствует об энергетическом характере воздействия вибрационного и любого другого раздражителя. Это приводит к выводу о том, что из всех возможных параметров колебательного процесса наиболее обоснованным для физиологической оценки вибрации является мгновенная мощность колебательного процесса, а при равных сопротивлениях колебательному движению — колебательная скорость. Полная мощность колебательного процесса отражает не только временные характеристики раздражителя — скорость и режим его воздействия, но и его качественно-количественные по-

казатели, учитывающие влияние таких определяющих и не зависящих друг от друга факторов, как: входной механический импеданс, характеризующий сопротивление колебательному движению; амплитуда смещения, определяющая при прочих равных условиях величины возникающих нарушений физиологических функций; частота колебаний как основной показатель специфики этих нарушений.

Эти соображения относятся и к возбуждению вибраций начальным смещением.

В стержне неограниченной длины и без поглощения энергии распространяются только бегущие волны с постоянной амплитудой колебания. В реальных ограниченных средах при распространении в них колебательного процесса энергия колебания частично расходуется на преодоление сил внутреннего трения, частично на излучение в окружающую среду. Поглощение энергии существенно усложняет рассмотрение процесса колебаний в них, так как приводит к возникновению напряжений сдвига, искривлению плоских поперечных сечений бруска и формы его внешней поверхности, к изменению волнового сопротивления и скорости распространения волн в нем, появлению поперечных волн и др.

Рассмотрим затухающий колебательный процесс в бруске неограниченной длины при возбуждении в нем колебаний с такой частотой, длина волны которой больше линейных размеров поперечного сечения бруска, так что волны можно считать плоскими. Если принять, что за одну секунду уменьшение начальной амплитуды смещения A_0 вследствие трения и излучения в окружающую среду пропорционально этой амплитуде и составляет $A_0\delta$, где δ — показатель затухания, имеющий размерность (c^{-1}), то за бесконечно малый интервал времени dt начальная амплитуда A_0 смещения уменьшается в

$$dA = -A_0\delta dt,$$

откуда, разделяя переменные A и t , интегрируя и потенцируя, получим зависимость между амплитудой смещения A_t в любой момент времени t и начальной амплитудой A_0 при $t=0$, а именно:

$$A_t = A_0 \cdot e^{-\delta t}, \quad (3-1-17)$$

где $e=2,718$ — основание натуральных логарифмов.

Равенство (3-1-17) указывает, что амплитуда смещения убывает во времени по экспоненциальному закону, уменьшаясь за каждый период колебаний в одинаковое число раз $e^{\delta T}$ до тех пор, пока через бесконечно большой интервал времени $t = \infty$, т. е. при $e^{-\delta t} = 0$ колебания полностью не затухнут. Показателю затухания δ в единицу времени соответствует показатель затухания ξ на единицу длины. Оба эти показателя связаны равенством $\lambda \xi = \delta T$, откуда $\xi = \frac{\delta}{c}$. Практически можно считать, что колебания затухли, если их амплитуда смещения уменьшилась в 100 раз, т. е. на 20 дБ, а энергия колебаний соответственно в 10 000 раз, или на 40 дБ. Это произойдет через интервал времени Δt от начала колебаний или на отрезке Δx от левого торца стержня:

$$\Delta t = \frac{4,6}{\delta} \quad \Delta x = \frac{4,6}{\xi} \quad (3-1-18)$$

Потери колебательной энергии в бруске за счет ее поглощения в первом приближении можно считать пропорциональными колебательной скорости. Поэтому, если в левом торце бруска возбудитель колебания с некоторой частотой ω , амплитудой колебательной скорости $A\omega e^{-\delta t}$ и соответствующей ей энергией в единицу времени $A^2\omega^2\rho c s e^{-2\delta t}$, то в отсутствие потерь энергии в бруске, т. е. при $\delta=0$, эти величины, как мы видели, не изменятся при распространении колебаний по бруску. Но если энергия в бруске поглощается, то через весьма малый промежуток времени Δt часть сообщенной энергии $\delta^2 A^2\omega^2\rho c s e^{-2\delta\Delta t}$ поглотится в бруске, а остаточной ее части, очевидно, будет соответствовать меньшая амплитуда колебательной скорости $A\omega_3 e^{-\delta\Delta t}$ и баланс энергии слева и справа от левого торца бруса может быть записан в виде

$$A^2\omega^2\rho c s e^{-\delta\Delta t} = A^2\rho c s e^{-2\delta\Delta t} (\delta^2 + \omega_3^2),$$

откуда, сокращая на $A^2\rho c s$ и уменьшая Δt до нуля, найдем, что в пределе при $\Delta t \rightarrow 0$

$$\omega^2 = \omega_3^2 + \delta^2; \quad \omega_3 = \omega \sqrt{1 - \delta^2/\omega^2}. \quad (3-1-19)$$

Это означает, что частота колебаний ω_3 затухающей бегущей волны тем меньше частоты колебаний ω в бруске

без потерь энергии, чем больше показатель затухания δ в колеблющейся среде.

В соответствии с этим для затухающей бегущей волны изменение смещения в пространстве и времени может быть записано в виде

$$x = Ae^{-\delta t} \sin \omega_3 \left(t - \frac{x}{c} \right). \quad (3-1-20)$$

К такому же результату мы бы пришли, если бы дополнили волновое уравнение (3-1-20) членом, учитывающим потери трения, пропорциональные колебательной скорости, и искали бы его частное решение для распространяющейся волны.

Колебательную скорость и напряжение по-прежнему найдем, дифференцируя уравнение смещения соответственно по времени и пространству с умножением пространственной производной на модуль упругости среды. Тогда получим:

$$v = A\omega e^{-\delta t} \cos \left[\omega_3 \left(t - \frac{x}{c} \right) + \varphi \right] \quad (3-1-21)$$

$$\sigma = -A\omega \rho c_3 e^{-\delta t} \cos \left[\omega_3 \left(t - \frac{x}{c} \right) - \varphi \right], \quad (3-1-22)$$

где φ — угол сдвига фаз между колебательной скоростью и давлением, возникающий всегда, когда в колебательной системе есть необратимые потери энергии.

Перемножая выражения колебательной скорости на давление и умножая результат на площадь поперечного сечения бруска, найдем полную мощность затухающего колебательного процесса, распространяющегося вдоль оси бруска:

$$\begin{aligned} W &= A^2 \omega^2 \rho c_3 e^{-2\delta t} \left[\cos^2 \varphi \cos^2 \omega_3 \left(t - \frac{x}{c} \right) - \right. \\ &\quad \left. - \sin^2 \varphi \sin^2 \omega_3 \left(t - \frac{x}{c} \right) \right] = \\ &= \frac{1}{2} A^2 \omega^2 \rho c_3 e^{-2\delta t} \left[\cos 2\varphi + \cos 2\omega_3 \left(t - \frac{x}{c} \right) \right]. \end{aligned} \quad (3-1-23)$$

Равенство показывает, что полная мощность затухающего колебательного процесса также пропорциональна среднеквадратичной колебательной скорости, но она убывает во времени и пространстве с удвоенным показателем затухания 2δ по закону косинуса удвоенной частоты колебания. Кроме того, она состоит из двух ча-

стей: реактивной, пропорциональной $\cos^2\varphi$ и затрачиваемой на изменение колеблющихся частиц среды в пространстве и активной, пропорциональной $\sin^2\varphi$ и расходуемой на преодоление силы трения, т. е. переходящей в тепловую энергию или, в общем случае распространения колебаний в структурах тела человека, в другие виды энергии — химическую или электрическую. Для мощности, поглощаемой в бруске, можно написать равенство:

$$W_{\text{полн}} = \frac{1}{2} A^2 \omega^2 \rho c_3 s \left[\cos 2\varphi + \cos 2\omega_3 \left(t - \frac{x}{c} \right) \right] (1 - e^{-2\delta t}). \quad (3-1-24)$$

Из сопоставления равенств (3-1-23) и (3-1-24) следует, что при поглощении энергии в бруске полная начальная мощность в левом торце при $x=0$ и $t=0$ и поглощаемая мощность соответственно равны:

$$W_{\text{полн}} = \frac{1}{2} A^2 \omega^2 \rho c (1 + \cos 2\varphi) \quad W_{\text{полн}} = 0,$$

а для бесконечно длительного времени затухания, т. е. при $t=\infty$, полная начальная мощность обращается в нуль, а рассеиваемая достигает величины, равной начальной мощности:

$$W_{\text{полн}} = 0; \quad W_{\text{полн}} = \frac{1}{2} A^2 \omega^2 \rho c_3 s (1 + \cos 2\varphi).$$

Характер изменения полной мощности затухающего колебательного процесса во времени и пространстве показан на рис. 16. Можно видеть, что затухающий процесс не является периодическим, так как форма колебаний в пространстве и времени не сохраняется.

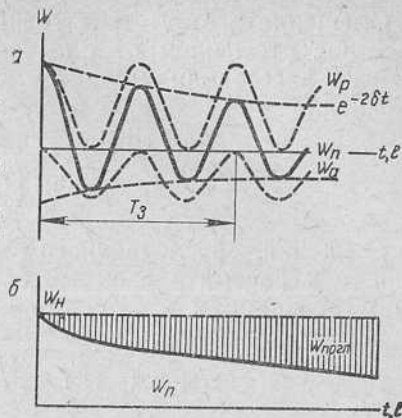
Мы рассмотрели распространение колебаний в виде затухающей бегущей волны в бруске неограниченной длины, потому что практически можно считать, что такой колебательный процесс может возникать и в стержне с ограниченной длиной, если затухание в среде велико, как это имеет место при больших частотах колебаний, а длина бруска достаточна для того, чтобы влиянием волн, отраженных от правого торца стержня, можно было пренебречь из-за малости их амплитуд вследствие поглощения.

Затухающий колебательный процесс возникает, когда длительно и непрерывно действующая сила прекращает свое действие или колебания возбуждаются внезапно кратковременно действующей внешней силой.

В биологическом аспекте из закономерностей затухающего колебательного процесса следует, что затухание

16. Затухающая бегущая волна. Характер изменения во времени и пространстве.

a — реактивной W_p , активной W_a и полной W_n мощности; b — полная начальная W_n , полная W_n для времени t и поглощаемая $W_{\text{погл}}$ мощность.



колебаний в структурах тела является одной из причин, которая предопределяет количество экстеро-, проприо- и интероцепторов, вовлекаемых в первичную реакцию на внешний раздражитель, оказывая тем самым влияние как на состояние чувствительности этих рецепторов, так и на особенности ответной реакции всего организма на действие вибраций.

Стоячие волны. В общем случае, когда брусок имеет ограниченную длину l , характер его колебаний резко изменяется, так как бегущая волна, доходя до правого его торца, отражается от него и распространяется в обратном направлении. Если протяженность бруска несоизмерима с длиной волны возбуждаемых колебаний, распределение амплитуд колебаний по длине бруска беспорядочно — аperiodично, если же длины бруска и бегущей волны соизмеримы, то распределение амплитуд колебаний по длине бруска периодически повторяется и в бруске образуются так называемые стоячие волны колебаний, характеризующиеся появлением по его длине «узлов» колебаний, т. е. поперечных сечений, частицы которых в отсутствие потерь энергии в бруске никогда не колеблются, и «пучностей» колебаний, или сечений, частицы которых всегда колеблются с наибольшей возможной для них амплитудой. В этом случае бегущая волна, отразившись один или несколько раз от торцов бруска, перестает существовать и во всех участках бруска между «узлами» колебаний устанавливается стабильный колебательный процесс, протекающий в одинаковой фазе.

Смещения в отсутствие трения в бруске в любом его сечении, отстоящем от плоскости возбуждения колебаний на расстоянии x будут в этом случае складываться из: смещения, вызываемого бегущей волной и описываемого, как мы видели раньше, равенством:

$$x_0 = A \sin \omega \left(t - \frac{x}{c} \right)$$

и смещения, обусловленного отраженной волной, приходящей к рассматриваемому сечению с несколько большим опозданием и вследствие этого описываемого равенством:

$$x_0 = A \sin \omega \left(t - \frac{2l - x}{c} - \frac{\varphi}{\omega} \right),$$

где φ — постоянная разность фаз между бегущей и отраженной волнами, зависящая от условий отражения от правого торца бруска, т. е. от его закрепления.

Так как мы условились, что диссипативные потери в бруске отсутствуют, то амплитуда A смещений в бегущей и отраженной волне будет одинакова и суммарное смещение x_0 , определяемое их сложением, т. е. суммой синусов углов, может быть записано в виде удвоенного произведения синуса полусуммы этих углов на косинус их полуразности:

$$x_0 = 2A \cos \omega \left(\frac{l - x}{c} + \frac{\varphi}{2\omega} \right) \sin \omega \left(t - \frac{l}{c} - \frac{\varphi}{2\omega} \right). \quad (3-1-25)$$

Первый сомножитель — $2A \cos \omega \left(\frac{l - x}{c} + \frac{\varphi}{2\omega} \right)$ — представляет собой постоянную для данного сечения x амплитуду смещения в стоячей волне, а второй множитель — $\left(t - \frac{l}{c} - \frac{\varphi}{2\omega} \right)$ — постоянную для данного момента времени t фазу колебания, одинаковую для всех колеблющихся сечений бруска.

Равенство (3-1-25) показывает, что закономерность изменения смещения во времени и пространстве зависит как от граничных условий, т. е. отражения волны от торцов бруска при $x=l$ и $x=0$, так и от начального возбуждения колебаний при $t=0$. Из граничных условий следует, что если правый конец бруска свободен, т. е. его торцевое сечение не испытывает никакого сопротивления движению при воздействии бегущей волны, то

амплитуда его смещения при $x=l$ должна быть наибольшей, поэтому в первом множителе $\cos \frac{\varphi}{2}=1$, откуда $\varphi=0$. Если же конец бруска закреплен неподвижно и его торцевое сечение не может приходить в движение под действием бегущей волны, то его амплитуда смещения при $x=l$ должна быть равна нулю и из того же равенства получим $\cos \frac{\varphi}{2}=0$, откуда $\varphi=\pi$.

Для бруска с одним свободным, а другим жестко закрепленным концом, имитирующим в первом приближении вытянутую руку при воздействии вибрации на ладони или тело человека при воздействии вибрации на стопы, уравнение смещения при $\varphi=\pi$ для жестко закрепленного конца и при $\cos\left(\frac{\omega l}{c}+\frac{\pi}{2}\right)=1$ для свободного конца может быть записано в виде:

$$x_c = 2A \cos \frac{\omega x}{c} \sin \omega t. \quad (3-1-26)$$

Колебательную скорость, ускорение колебательного движения и деформацию найдем как производные смещения соответственно по времени и пространству, а напряжение — умножением деформации на модуль упругости:

$$v_c = 2A\omega \cos \frac{\omega x}{c} \cos \omega t; \quad (3-1-27)$$

$$a_c = -2A\omega^2 \cos \frac{\omega x}{c} \sin \omega t; \quad (3-1-28)$$

$$\varepsilon = -2 \frac{A\omega}{c} \sin \frac{\omega x}{c} \sin \omega t; \quad (3-1-29)$$

$$\sigma_c = 2A\omega\rho c \sin \frac{\omega x}{c} \sin \omega t, \quad (3-1-30)$$

где по-прежнему первый множитель представляет амплитуды, а второй — фазы колебания.

Равенства показывают, что смещения, деформации и напряжения изменяются во времени в одинаковой фазе, а колебательная скорость опережает их на четверть периода колебания; амплитуды всех параметров стоячей волны непостоянны по длине каждого участка бруска протяженностью в половину длины волны, но их распределение по этой длине повторяется во всех таких участках, а максимальные их величины в 2 раза боль-

ше, чем в бегущей волне. Кроме того, можно видеть, что амплитуды смещения и колебательной скорости равны нулю в тех сечениях, для которых $\cos \frac{\omega x}{c} = 0$, $x = \frac{\lambda}{4} (2n - 1)$ при $n = 1, 2, 3 \dots$, и в этих сечениях частицы среды в бруске без поглощения энергии никогда не колеблются. Но для этих сечений $\sin \frac{\omega t}{c} = 1$, а следовательно, в них возникают максимальные деформации и напряжения. Наоборот, амплитуды смещения и колебательной скорости максимальны в сечениях, где $\cos \frac{\omega x}{c} = 1$, $x = \frac{\lambda}{2} (n - 1)$ и в этих сечениях частицы среды всегда колеблются с наибольшей амплитудой, но зато деформации и напряжения в этих сечениях равны нулю.

Таким образом, там, где в стоячей волне максимальны амплитуды смещения и колебательной скорости, амплитуды деформаций и напряжений минимальны, и наоборот. Это оказывает существенное влияние на характер изменения во времени интенсивности колебаний. Перемножая по-прежнему колебательную скорость v_c на давление p_c , найдем интенсивность I_c колебательного процесса в стоячей волне, а умножая интенсивность на площадь поперечного сечения s бруска, получим полную мощность W_c колебательного процесса:

$$I_c = -\sigma_c v_c = \frac{1}{4} \left(4A^2 \omega^2 \sin 2 \frac{\omega x}{c} \right) \rho c \sin 2\omega t \quad (3-1-31)$$

$$W_c = I_c s = s A^2 \omega^2 \rho c \sin 2 \frac{\omega x}{c} \sin 2\omega t \quad (3-1-32)$$

Их максимальные величины при $x = \frac{\lambda}{8}$ и $t = \frac{T}{8}$ равны:

$$I_m = A^2 \omega^2 \rho c$$

$$W_m = A^2 \omega^2 \rho c s.$$

Из уравнений следует, что интенсивность и мощность колебательного процесса стоячей волны пропорциональны квадрату амплитуды колебательной скорости бегущей волны и сопротивлению, оказываемому средой колебательному движению, и обе изменяются во времени по закону синуса удвоенной частоты около нулевого уровня, т. е. интенсивность и мощность могут быть как

положительными, так и отрицательными. Это означает, что в стоячей волне максимальная в пучности колебательной скорости (узел напряжения) кинетическая энергия дважды за период колебания переходит в потенциальную энергию, наибольшую в пучности напряжения (узел скорости), а деформации частиц, возрастающие при их смещении по мере убывания колебательной скорости, полностью восстанавливаются при возвращении в исходное положение; иначе говоря, кинетическая энергия колебаний, дважды сообщаемая бруску внешним источником колебаний, дважды за период колебания полностью возвращается обратно.

Кроме того, из равенств (3-1-31) и (3-1-32) следует, что амплитуды интенсивности и мощности колебательного процесса максимальны в сечениях, для которых $\sin 2\frac{\omega x}{c} = 1$ и $x = \frac{\lambda}{8}(2n-1)$ и равны нулю, когда этот синус равен нулю. Но если в бруске обнаруживаются сечения, в которых амплитуды интенсивности равны нулю, то через эти сечения энергия не протекает, а следовательно, поток колебательной энергии вдоль рассматриваемого бруска, при образовании в нем стоячих волн отсутствует. Это означает, что в стоячих волнах и вообще в сложных вибрационных полях, образуемых в сплошных ограниченных средах взаимодействием бегущих и отраженных волн, интенсивность колебаний характеризует не поток энергии, а плотность мощности колебательного процесса на единицу площади сечения, перпендикулярного направлению колебаний, или связанную с ней плотность энергии в единице объема бруска.

Так как колебания интенсивности на участках бруска между узлами напряжения и колебательной скорости совершаются в одной фазе, но с различными амплитудами, то плотность энергии в каждом таком энергетически обособленном участке мы можем найти как плотность кинетической (или потенциальной) энергии в момент времени, когда потенциальная (или кинетическая) энергия колебательной системы равна нулю. Как известно, плотность кинетической энергии определяется половиной произведения плотности среды на квадрат колебательной скорости, тогда соответственно (3-1-27) получим:

$$\zeta = \frac{1}{2} \cdot 4A^2\omega^2\rho = 2A^2\omega^2\rho \quad (3-1-35)$$

Среднюю по бруску пространственную скорость определим интегрированием равенства (3-1-27), возведенного в квадрат с последующим делением на $\frac{\lambda}{4}$, найдем:

$$v_{\text{ср}}^2 = \frac{4}{\lambda} \int_0^{\lambda/4} 4A^2\omega^2 \cos^2 \frac{\omega x}{c} dx = 2A^2\omega^2 \quad (3-1-36)$$

Из равенства (3-1-36) непосредственно следует, что квадрат среднепространственного значения колебательной скорости при распространении по бруску колебаний с образованием в нем стоячих волн совпадает с квадратом ее среднеквадратичного значения, равного $\frac{4A^2\omega^2}{2}$.

Характер изменения параметров стоячей волны показан на рис. 17.

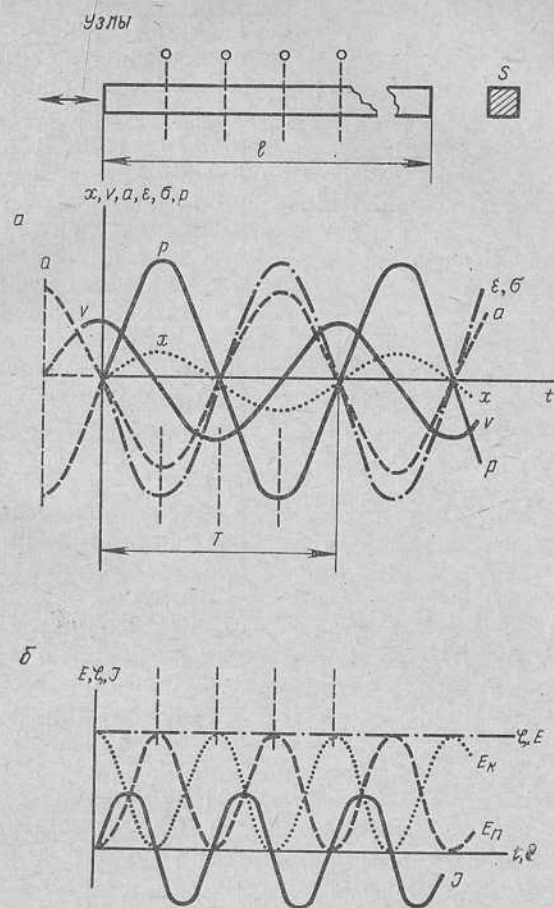
Сопоставляя характерные черты бегущих и стоячих волн, мы можем отметить следующее.

В бегущей волне колебания в данный момент времени во всех сечениях совершаются с одинаковыми амплитудами, но в разных фазах, в стоячей же волне частицы в данный момент колеблются во всех сечениях в одинаковой фазе, но с разными амплитудами.

Интенсивность колебаний в бегущей волне одинакова во всех сечениях и изменяется во времени около среднего положительного значения, в стоячей же волне она различна в разных сечениях и изменяется во времени около нулевого среднего значения.

В бегущей волне плотность энергии в единице объема переменна во времени, но всегда равна сумме кинетической и потенциальной энергии колебаний, а в стоячей волне она постоянна во времени и численно равна либо кинетической, либо потенциальной энергии. Деформации и напряжения в бегущей волне максимальны при наибольшей колебательной скорости, а в стоячей волне они достигают максимума при нулевой колебательной скорости.

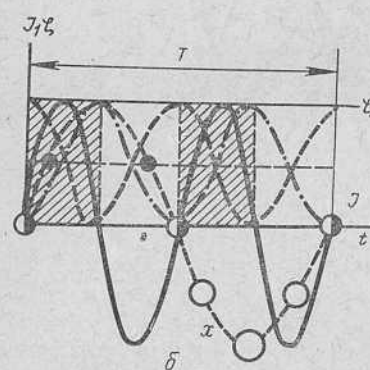
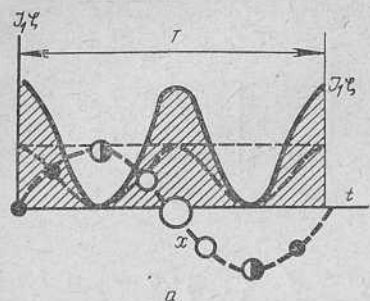
Изменение во времени деформаций, интенсивности колебаний и плотности колебательной энергии в единице объема в сопоставлении со смещением частиц для бегущей и стоячей волны показано на рис. 18, где на кривой смещений черными кружками разной величи-



17. Незатухающая стоячая волна. Характер изменения во времени и пространстве.

a — смещения x , колебательной скорости v , ускорения a , деформации ϵ , напряжения σ и давления p ; b — интенсивности I , энергии E и ее плотности ζ в единице объема.

ны условно указаны величины деформации сжатия, а белыми — величины деформации растяжения. При этом чем меньше черный кружок, тем больше сжатие, а чем больше белый кружок, тем больше растяжение. Черно-белые кружки обозначают нулевую деформацию. Можно видеть, что в бегущей волне частицы выводятся



- Отсутствие деформации
- Деформация сжатия
- Деформация растяжения

18. Изменения во времени смещений и деформаций, интенсивности и плотности энергии.

a — бегущей волны; *b* — стоячей волны.

внешним воздействием из положения равновесия максимально сжатыми и с максимальной суммарной кинетической и потенциальной энергией. По мере смещения их деформация уменьшается, а суммарная энергия теряется, так что частицы достигают амплитуды смещения в недеформированном состоянии и полностью теряют всю колебательную энергию, вследствие чего они уже не могут возвратиться в исходное положение равновесия без воздействия энергии извне.

В стоячей же волне частицы выводятся внешним воздействием из положения равновесия в недеформированном состоянии и с максимальной кинетической и нулевой потенциальной энергией. По мере смещения они деформируются за счет трансформации кинетической энергии в потенциальную и достигают ам-

плитуды смещения в максимально деформированном состоянии и с запасом потенциальной энергии, достаточным для того, чтобы возвратить их в исходное положение равновесия без затраты энергии извне. Таким образом, в стоячей волне энергия, получаемая от внешнего источника за первую и третью четверти периода колебаний, возвращается обратно во вторую и четвертую четверти периода, а частицы среды, подверженные энергетическому воздействию в первую и третью четверти периода колебаний, освобождаются от этого воздействия во вторую и четвертую четверти периода и, буду-

чи представлены самим себе, возвращаются в исходное положение равновесия.

Таким образом, биологически воздействующей энергией стоячей волны следует считать энергию только положительной части колебательной мощности, рассматривая ее отрицательную часть как период для частичного восстановления нарушенного биофизического и биохимического состояния, вызванного действием энергии положительной мощности, или как перерыв во внешнем энергетическом воздействии. Сравнивая при этом энергию бегущей волны и стоячей волны за один период колебания при одинаковых амплитудах колебательной мощности, мы найдем, что энергии одинаковы. Действительно, для бегущей волны за один период в соответствии с равенством (3-1-15) энергия колебательного процесса равна

$$E_6 = \frac{1}{2} A^2 \omega^2 \rho s \lambda.$$

Для стоячей волны энергия за тот же период составит, согласно (3-1-35) и сказанному выше об отрицательной мощности:

$$E_c = 2 \cdot \frac{1}{4} A^2 \omega^2 \rho s \lambda.$$

Так как распространение колебаний в структурах тела в виде бегущих волн в общем случае соответствует малым интенсивностям колебаний над порогом ощущения и большому затуханию в структурах, а в виде стоячих волн — большим интенсивностям и малому затуханию, то в гигиеническом аспекте, при интегральной оценке эффекта биологического воздействия вибраций и в соответствии с нашей концепцией ее энергетического действия из равенств энергии колебательных процессов в бегущей и стоячей волне, следует, что нарушения физиологических функций, вызываемые действием вибраций при прочих равных условиях, не будут зависеть от характера распространения волн и могут считаться сопоставимыми.

При более тщательных электрофизиологических исследованиях указанная выше разница в режимах воздействия бегущих и стоячих волн не исключает возможности получения дополнительной информации об особенностях влияния характера распространения волн в структурах тела на реакцию и поведение чувствительных элементов этих структур, однако получение такой

информации связано с затруднениями в осуществлении эксперимента.

Частоты собственных колебаний. Возвращаясь к граничным условиям для бруска, у которого один конец закрепленный, а другой — свободный, т. е. к условию $x=0$; $\cos\left(\frac{\omega l}{c} + \frac{\pi}{2}\right) = 1$, найдем, что для его соблюдения, т. е. для достижения максимально возможной амплитуды смещения на свободном конце бруска, и или, иначе говоря, получения в нем «пучности» смещения, брусок должен иметь либо определенную длину при заданной частоте возбуждения, либо при заданной длине определенную частоту возбуждения колебаний, а именно:

$$l = \frac{\lambda}{4} (2n - 1) \text{ или } \omega_n = \frac{(2n - 1) \pi c}{2l} = \\ = (2n - 1) \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{K}{M}}, \quad (3-1-37)$$

где $K = \frac{Es}{l}$ — продольная жесткость бруска; $M = \rho s l$ — масса всего бруска; $n = 1, 2, 3$.

Частоты ω_n называют частотами собственных продольных колебаний бруска конечной длины l . Так как длину бруска можно делить на множество одинаковых отрезков разной протяженности $\frac{\lambda}{4}$, то стержень имеет множество частот собственных колебаний, на что указывает бесконечный ряд чисел n . При значении $n=1$ частоту ω_1 называют основной или низшей частотой собственных колебаний, а последующие частоты ω_n , кратные основной, — ее гармониками. Равенство (3-1-37) показывает, что для возбуждения в бруске колебаний с максимально возможными амплитудами на свободном конце по длине рассматриваемого бруска должно укладываться нечетное число четвертей длин волн возбуждающей частоты. Если это не соблюдается, то при прочих равных условиях амплитуды колебаний будут меньше, а в частном случае, когда длина бруска равна четному числу четвертей длин волн возбуждающей частоты, в бруске без потерь энергии при возбуждении его свободного торца колебаний не возникает, поскольку на этом торце образуется узел смещения. Практически при наличии внутреннего трения и излучения в окружающую

среду колебания все же можно возбудить, но с очень малыми амплитудами.

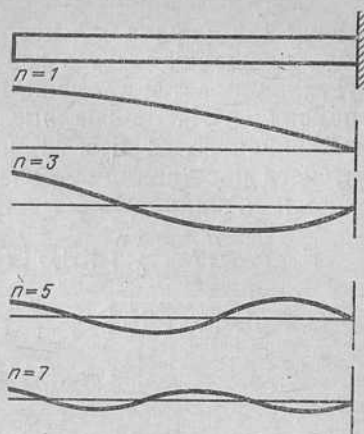
Отсюда непосредственно следует, что интенсивные резонансные колебания в брусках ограниченной длины и вообще в любой сплошной ограниченной среде возникают только тогда, когда при совпадении вынуждающей частоты с любой из частот собственных колебаний возбуждение осуществляется в пучности колебаний для этой частоты.

Каждой частоте собственных колебаний соответствует определенная форма колебаний, т. е. характер распределения амплитуд смещений по длине бруска. Эти формы для бруска с одним свободным и другим жестко закрепленным концом показаны для четырех первых частот на рис. 19. На рисунке видно, что чем больше возбуждающая частота, тем больше число узлов и пучностей возникает по длине бруска и тем меньше амплитуды его колебаний.

Наличие множества частот собственных колебаний бруска указывает на то, что при любом его возбуждении суммарная амплитуда для всех параметров колебательного процесса будет складываться из вклада, вносимого каждой из частот собственных колебаний.

Отражение от границ раздела сред. Рассматривая образование стоячих волн в бруске, мы отмечали, что основной причиной их возникновения является отражение бегущей волны от торца бруска. Однако отражение волн возникает не только от торца бруска, но и от неоднородностей структуры среды и, в частности, от границы раздела двух сред, если брусок по длине состоит из материалов с разными волновыми сопротивлениями ρc .

Коэффициент отражения r от границы раздела и коэффициент прохождения θ через нее в этом случае могут быть определены из условия равенства колебательных скоростей и напряжений непосредственно у границы раз-



19. Первые четыре формы собственных колебаний бруска с одним заделанным концом.

n — номер гармоник.

дела, как справа от нее, где распространяется волна $A_{\text{пр}}$, прошедшая через границу, так и слева от нее, где устанавливается стоячая волна, образующаяся за счет падающей $A_{\text{п}}$ на границу бегущей волны и волны, отраженной A_0 от нее. Приняв границу раздела за нуль отсчета расстояний x , указанное условие равенства скоростей и напряжений можно записать в виде

$$\begin{aligned} A_{\text{п}}\omega \cos \omega \left(t - \frac{x}{c} \right) + A_0\omega \left(t + \frac{x}{c} \right) &= A_{\text{пр}}\omega \cos \omega \left(t - \frac{x}{c} \right); \\ -A_{\text{п}}\omega \rho_{\text{п}}c_{\text{п}} \cos \omega \left(t - \frac{x}{c} \right) + A_0\omega \rho_{\text{п}}c_{\text{п}} \cos \omega \left(t + \frac{x}{c} \right) &= \\ &= A_{\text{пр}}\omega \rho_{\text{пр}}c_{\text{пр}} \cos \omega \left(t - \frac{x}{c} \right), \end{aligned}$$

откуда при x , стремящемся к нулю, и после сокращения на $\cos \omega t$ найдем, что

$$\omega A_{\text{п}} + \omega A_0 = \omega A_{\text{пр}}, \quad \omega \rho_{\text{п}}c_{\text{п}} (A_{\text{п}} - A_0) = \omega \rho_{\text{пр}}c_{\text{пр}} A_{\text{пр}};$$

откуда

$$r_{\text{а}} = \frac{A_0}{A_{\text{п}}} = \frac{1 - \alpha}{1 + \alpha}; \quad (3-1-38)$$

$$\theta_{\text{а}} = \frac{A_{\text{пр}}}{A_{\text{п}}} = \frac{2}{1 + \alpha}, \quad (3-1-39)$$

где $r_{\text{а}}$, $\theta_{\text{а}}$ — коэффициенты отражения и прохождения по амплитуде смещения; $A_{\text{п}}$, A_0 , $A_{\text{пр}}$ — амплитуды смещения в падающей, отраженной и прошедшей волнах; $\alpha = \frac{\rho_{\text{пр}}c_{\text{пр}}}{\rho_{\text{п}}c_{\text{п}}}$ — отношение волновых сопротивлений сред для прошедшей и падающей волн.

Анализируя равенства, найдем, что при одинаковых волновых сопротивлениях, но разных плотностях и модулях упругости

$$\rho_{\text{пр}}c_{\text{пр}} = \rho_{\text{п}}c_{\text{п}} \quad \alpha = 1; \quad r_{\text{а}} = 0; \quad \theta_{\text{а}} = 1,$$

отражения на границе раздела не возникает и бегущая волна проходит за границу раздела с той же интенсивностью колебаний. Если волновое сопротивление перед границей, т. е. со стороны бегущей волны $\rho_{\text{п}}c_{\text{п}}$ больше, чем за границей, т. е. со стороны прошедшей волны $\rho_{\text{пр}}c_{\text{пр}}$, то при

$$\rho_{\text{п}}c_{\text{п}} > \rho_{\text{пр}}c_{\text{пр}} \quad \alpha < 1 \quad \text{и} \quad r_{\text{а}} = +, \text{ т. е.}$$

коэффициент отражения положителен и отражение происходит без сдвига фаз, или $\varphi = 0$.

Если же волновое сопротивление среды до границы раздела, т. е. со стороны падающей волны $\rho_n c_n$ меньше, чем за ней, или со стороны прошедшей волны, то при

$$\rho_n c_n < \rho_{np} c_{np} \quad \alpha > 1 \quad \text{и} \quad r_a = - ,$$

т. е. коэффициент отражения отрицателен и волна отражается со сдвигом фазы на половину периода колебаний $\varphi = \pi$, или, как говорят, с потерей полуволны.

Частным случаем отражения от границы является и рассмотренное выше отражение от торцов бруска. Свободному концу соответствует ничтожно малое волновое сопротивление за торцом $\alpha = 0$ по сравнению с сопротивлением среды самого бруска, а жесткому закреплению торца — весьма большое волновое сопротивление за торцом бруска $\alpha = \infty$ относительно собственного сопротивления бруска.

Так как интенсивность колебаний пропорциональна квадрату амплитуд колебательной скорости и волновым сопротивлениям, то коэффициенты отражения r_a и прохождения θ_a по энергии будут соответственно равны:

$$r_a = \frac{I_0}{I_n} = \left(\frac{1 - \alpha}{1 + \alpha} \right)^2 \quad \theta_a = \frac{I_{np}}{I_n} = \frac{4\alpha}{(1 + \alpha)^2}, \quad (3-1-40)$$

причем $r_a + \theta_a = 1$.

Из этих равенств следует, что при отражении от свободных и жестко закрепленных концов бруска, при $\alpha = 0$ и $\alpha = \infty$ $r_a = 1$ и $\theta_a = 0$, т. е. вся энергия колебаний остается в бруске. В биологическом аспекте из этого следует, что отражение волн от структурных неоднородностей, так же как и затухание в тканях, является причиной уменьшения интенсивности колебаний при их распространении по телу человека, а следовательно, и уменьшения зоны охвата тканей колебательным движением.

По тому же принципу равенства напряжений и колебательных скоростей на границах раздела сред можно найти коэффициент прохождения по энергии θ_a через прослойку толщиной d с волновым сопротивлением $\rho_2 c_2$, отличающимся от сопротивления $\rho_1 c_1$ бруска. Для этого случая С. Н. Ржевкин приводит формулу:

$$\theta_a = \frac{1}{1/4 \left(\frac{1}{\alpha} + \alpha \right)^2 \sin^2 \frac{\omega d}{c_2} + \cos^2 \frac{\omega d}{c_2}}, \quad (3-1-41)$$

где $\alpha = \frac{\rho_2 c_2}{\rho_1 c_1}$ — отношение волновых сопротивлений прослойки и бруска.

Это уравнение прежде всего указывает, что коэффициент прохождения θ существенно зависит от частоты ω колебаний и толщины d прослойки. Если по толщине прослойки укладывается четное число полуволи колебательного процесса, т. е. если

$$\sin^2 \frac{\omega d}{c_2} = \sin^2 \pi \frac{d}{\lambda/2} = 0, \quad \text{а} \quad \cos^2 \frac{\omega d}{c_2} = 1,$$

то в прослойке возникают резонансные колебания, коэффициент прохождения становится равным единице и наличие прослойки не оказывает никакого влияния на распространение колебаний. Наоборот, если по толщине прослойки укладывается нечетное число четвертей длин волн колебательного процесса, то

$$\sin^2 \frac{\omega d}{c_2} = 1, \quad \text{а} \quad \cos^2 \frac{\omega d}{c_2} = 0.$$

В этом случае коэффициент прохождения θ_0 минимален и равен

$$\theta_0 = \frac{4\alpha^2}{(1 + \alpha^2)^2}. \quad (3-1-42)$$

Так, при $\alpha=4$, что приближенно соответствует костной прослойке в мышечных тканях, $\theta=0,22$, следовательно, интенсивность колебаний в тканях за прослойкой при оптимальном соотношении $\frac{\omega d}{c_2} = (2n-1) \frac{\lambda_2}{4}$ будет в $4^{1/2}$ раза меньше, чем в тканях до прослойки. Интенсивность колебаний за прослойкой, т. е. в прошедшей волне, в условиях одного и того же бруска и одинаковой интенсивности падающей волны, может служить показателем интенсивности колебаний в прослойке, поскольку колебания, возникшие за прослойкой, можно считать возбужденными границей этой прослойки. Поэтому чем меньше коэффициент прохождения θ для прослойки с разными сопротивлениями, тем меньше при прочих равных условиях интенсивность колебаний в самой прослойке.

В биологическом аспекте из этого следует, что при распространении колебаний в неоднородных структурах тела человека при одинаковой интенсивности колебательного процесса в зоне возбуждения меньших интен-

сивностей колебаний следует ожидать в жестких костных тканях, чем в мягких, например в стенках тонких кровеносных сосудов.

Резюмируя изложенное в этом параграфе, мы можем отметить следующее. Рассмотрение возбуждения колебаний в бруске как элементе ограниченной сплошной однородной среды позволило получить представление о физических явлениях, возникающих в сочлененных структурах тела человека, подверженных вибрационному воздействию. Действие вибраций на структуры тела приводит к распространению по ним волн напряжения и колебательной скорости, создающих за счет отражений в местах сочленения структур и неоднородностей тканей различные интенсивности колебаний и плотности колебательной энергии в тканях тела, тем меньшие, чем дальше расположены участки этих тканей от места непосредственного контакта тела с вибрирующей поверхностью, чем больше их волновое сопротивление распространению колебательного процесса и чем они ближе к узлам колебаний, определяемым частотами собственных колебаний структур.

В биологическом аспекте из этого следует, что механическая энергия упругих колебаний, распространяясь по тканям тела, деформирует чувствительные элементы тканей — экстеро-, проприо- и интероцепторы — и нарушает их биоэлектрическое и биохимическое состояние, обуславливая возникновение биопотенциалов действия, вызывающих рефлекторные реакции других органов и систем на воздействие внешнего раздражителя, и изменяя функциональное состояние этих рецепторных групп. При этом важно, что возникающие деформации и напряжения пропорциональны колебательной скорости, а не смещению или ускорению.

КОЛЕБАТЕЛЬНЫЕ ПРОЦЕССЫ В СИСТЕМАХ С РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ И СОСРЕДОТОЧЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ ПРИ ХАРАКТЕРНЫХ СПОСОБАХ ИХ ВОЗБУЖДЕНИЯ

Рассмотрим характерные способы возбуждения продольных колебаний в стержне как в сплошной ограниченной среде и возникающие при этом колебательные процессы и их энергетические характеристики. При этом для упрощения изложения будем предполагать, что поглощение колебательной энергии в стержне мало и им

можно пренебречь. Условимся также различать два основных способа возбуждения колебаний в системе: возбуждение кратковременным внешним воздействием, вызывающим только собственные колебания системы, и возбуждение длительным непрерывным переменным воздействием, вызывающим в линейных системах с установившимся режимом вынужденные колебания, совершающиеся в ритме воздействующего фактора.

Если в бруске возбуждаются только собственные колебания, то колебательное движение его частиц описывается волновым уравнением (3-1-2)

$$\frac{\partial^2 x}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 x}{\partial x^2}.$$

Применяя при решении этого уравнения метод Фурье, заключающийся в изыскании частного решения в виде произведения двух функций: Ψ_t , зависящей только от времени t , и Ψ_x , зависящей только от пространства, т. е. от координаты x , положим, что смещение равно

$$x = \Psi_t \cdot \Psi_x. \quad (3-2-1)$$

Подстановка этого выражения в волновое уравнение приводит к соотношению

$$\frac{\Psi_t''}{c^2 \Psi_t} = \frac{\Psi_x''}{\Psi_x} = -\beta^2,$$

показывающему, что оно может быть представлено в виде двух уравнений, но уже не в частных, а в обычных производных, поскольку каждое из уравнений является функцией только одной переменной, а именно:

$$\begin{aligned} \Psi_t'' + \omega^2 \Psi_t &= 0 \\ \Psi_x'' + \frac{\omega^2}{c^2} \Psi_x &= 0. \quad -\beta^2 = \frac{\omega^2}{c^2} \end{aligned} \quad (3-2-2)$$

Решение этих уравнений в тригонометрических функциях может быть записано в виде

$$\begin{aligned} \Psi_t &= A \cos \omega t + B \sin \omega t; \\ \Psi_x &= C \cos \frac{\omega x}{c} + D \sin \frac{\omega x}{c}, \end{aligned} \quad (3-2-3)$$

откуда подстановкой этих равенств в уравнение (3-2-1) найдем выражение для смещения, удовлетворяющее решению волнового уравнения для стоячих волн:

$$x = (A \cos \omega t + B \sin \omega t) \left(C \cos \frac{\omega x}{c} + D \sin \frac{\omega x}{c} \right). \quad (3-2-4)$$

В этом равенстве значения C и D определяются из граничных условий для торцов бруска, а величины A и B — из начальных условий возбуждения колебаний при $t=0$.

Для бруска с одним свободным, а другим жестко закрепленным концами, как мы уже отмечали, на свободном конце должен быть максимум смещения и узел деформации, а следовательно, должна быть равна нулю пространственная производная смещения, откуда найдем, что $D=0$. В жестко закрепленном конце должен быть узел смещения, т. е. смещение должно быть равно нулю. Отсюда при $C \neq 0 \cos \frac{\omega l}{c} = 0$ и $\omega = \frac{\pi c}{2l} (2n-1)$. Подставив найденные значения C и D в равенство (3-2-4), найдем выражение для смещения в виде

$$x = \cos \frac{\omega x}{c} (A \cos \omega t + B \sin \omega t);$$

$$\omega = \frac{\pi c}{2l} (2n-1). \quad (3-2-5)$$

Полученное уравнение является частным решением, удовлетворяющим волновому уравнению при любом указанном выше значении ω_n частоты собственных колебаний. Сумма таких частных решений волнового уравнения характеризует суммарное смещение, возникающее при сложном колебательном процессе, равное

$$x_c = \sum_{n=1}^{\infty} \cos \frac{\omega_n x}{c} (A_n \cos \omega_n t + B_n \sin \omega_n t). \quad (3-2-6)$$

В этом равенстве значения A и B , как мы уже отмечали, должны быть выбраны такими, чтобы удовлетворить начальным условиям возбуждения при $t=0$. Если возбуждение колебаний задано начальным смещением x_n в виде некоторой пространственной функции $x_n = f(x)$, то в этом равенстве при $t=0$

$$B_n \sin \omega_n t = 0; \quad f(x) = \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos \frac{\omega_n x}{c},$$

откуда, пользуясь формулой, аналогичной равенству, приведенному во II главе при рассмотрении разложения

сложного колебательного процесса на гармонические составляющие, найдем:

$$A_n = \frac{2}{l} \int_0^l f(x) \cos \frac{\omega_n x}{c} dx. \quad (3-2-7)$$

Если же колебания возбуждаются начальной скоростью v_n , заданной в виде какой-либо пространственной функции $f_1(x)$, то в производной равенства (3-2-5) по времени в начальный момент при $t=0$ должны быть равны

$$-A_n \omega_n \sin \omega_n t = 0; \quad f_1(x) = \sum_{n=1}^{\infty} \omega_n B_n \cos \frac{\omega_n x}{c},$$

откуда по аналогичной формуле найдем:

$$B_n = \frac{2}{\omega_n l} \int_0^l f_1(x) \cos \frac{\omega_n x}{c} dx. \quad (3-2-8)$$

Так, если в бруске без поглощения энергии возбудить колебания в его торце резким толчком с начальной скоростью v_n , а затем предоставить брусок самому себе, то начальные условия для этого случая могут быть записаны в виде

$$t = 0; \quad x_n = 0; \quad A_n = 0; \quad v_n = v_0;$$

$$B_n = \frac{2}{\omega_n l} \int_0^l v_0 \frac{\cos \omega_n x}{c} dx = \frac{2v_0 c}{\omega_n^2 l}, \quad (3-2-9)$$

откуда для суммарного смещения получим уравнение

$$x_c = \frac{2v_0 c}{l} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{\omega_n^2} \cos \frac{\omega_n x}{c} \sin \omega_n t. \quad (3-2-10)$$

Поскольку все частоты собственных колебаний бруска кратны его основной частоте ω_1 , т. е. $\omega_n = (2n-1)\omega_1$, то, вынося основную частоту за знак суммы и представляя сумму в виде ряда, найдем, что суммарное смещение равно:

$$x_c = \frac{2v_0 c}{\omega_1^2 l} \left[\cos \frac{\omega_1 x}{c} \sin \omega_1 t + \frac{1}{9} \cos \frac{\omega_3 x}{c} \sin \omega_3 t + \dots \right].$$

Равенство показывает, что при толчкообразном возбуждении колебаний в бруске возникает сложный периодический колебательный процесс, образуемый нало-

жением синусоидальных колебаний всех его собственных частот ω_n с амплитудами смещений, уменьшающимися с возрастанием гармоник ω_n собственной частоты обратно пропорционально квадрату их отношения к основной частоте собственных колебаний.

Для правого торца бруска, полагая в равенстве (3-2-10) $x=l$ и $\cos \frac{\omega_n l}{c} = 0$, найдем, что амплитуды смещений всех гармоник ω_n в любой момент времени равны нулю, поскольку в этом торце образуется узел смещения. В левом же торце при $x=0$ и $\cos \frac{\omega_n x}{c} = 1$ амплитуды смещения будут максимальны для всех собственных частот в один и тот же момент времени при $t = \frac{T_1}{4} (2n-1)$, т. е. при $\sin \omega_n t = 1$, и при этом условии суммарная амплитуда смещения будет равна

$$x_c = \frac{2v_0 c}{\omega_1^2 l^2} \cdot \frac{\pi^2}{8} = l \frac{v_0}{c} \frac{\pi^2}{8} = 1 + 1/9 + 1/25 + \dots \quad (3-2-11)$$

Из последнего равенства следует, что амплитуда смещения на свободном конце бруска тем больше, чем длиннее стержень и чем больше отношение скорости v_0 начального толчка к скорости распространения c продольных колебаний в среде.

Полную мощность возникающего сложного колебательного процесса (усредненную за период основной частоты) найдем суммированием мощностей каждого из составляющих синусоидальных собственных колебаний (через производные их смещения по времени и пространству). Она будет равна:

$$W_n = \frac{v_0^2 c^2}{\omega_1^2 l^2} \rho c s \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n-1)^2} \sin^2 2 \frac{\omega x}{c} \sin^2 2 \omega t.$$

Ее максимум для сечения x и момента времени t , равных

$$x = \frac{\lambda}{8} (2n-1) \quad \text{и} \quad t = \frac{T}{8} (2n-1),$$

будет равен

$$W_n = \frac{v_0^2 c^2}{\omega_1^2 l^2} \rho c s \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n-1)^2} = \frac{1}{2} v_0^2 \rho c s. \quad (3-2-12)$$

Рассмотренный пример создает представление о характере колебательного процесса, возникающего при действии одиночного толчка, направленного вдоль предплечья вытянутой руки. Аналогично решается задача для тела человека, стоящего на поверхности, подверженной толчку, а также при подъеме человека на лифте в момент внезапной остановки последнего. Существенно то, что во всех этих случаях в теле человека возникают колебания на всех частотах собственных колебаний с максимальной суммарной амплитудой смещения на «свободном конце», т. е. на уровне кисти руки или головы.

Мы употребили в этом примере необычный в технике, но более понятный и обобщающий термин «толчок» как синоним однонаправленного силового импульса, возникающего в сплошной ограниченной среде и вызывающего ее колебания как при внезапном воздействии на покоящуюся среду, так и при внезапном прекращении непрерывно и длительно действующей, постоянной или переменной во времени, внешней силы.

Рассмотрим действие такого импульса. Если к торцу бруска как колебательной системы внезапно приложить постоянную силу F , направленную вдоль его оси и действующую в течение малого промежутка времени τ ее соприкосновения с торцом бруска, то произведение этой силы на длительность ее действия называют импульсом i силы F .

Здесь и в последующем изложении мы будем считать, что вся энергия импульса, фиксируемого в зоне контакта вибрирующей поверхности с телом человека величиной колебательной скорости, затрачивается на возбуждение колебаний. Это позволит различать импульс от удара, при котором часть энергии затрачивается на вязко-пластические деформации в месте соударения, находящемся обычно вне зоны контакта тела с вибрирующими поверхностями. Тогда в соответствии с законом сохранения количества движения импульс силы сообщает колебательной системе некоторую начальную скорость v_0 движения, определяемую из равенства:

$$i = F\tau = Mv_0; \quad v_0 = \frac{F}{M} \tau = a_0\tau, \quad (3-2-13)$$

где a_0 — начальное ускорение, сообщаемое колебательной системе.

Т а б л и ц а 3. Соотношение v_1/v_0 при разной форме импульсов

Форма импульса	Отношение скоростей v_1/v_0
Прямоугольная	1
Полусинусоидальная	0,637
Треугольная	0,5
Квадрат полусинусоиды	0,5
Экспоненциальная при $\delta\tau < 0,1$	0,5

Если длительность τ импульса стремится к нулю, то такой импульс называют импульсом мгновенной силы или толчком с начальной скоростью v_0 .

В общем случае как сила F , так и соответствующее ей начальное ускорение a_0 могут быть либо постоянными за время их воздействия τ , и тогда импульс силы в координатах сила — время будет изображаться прямоугольником, а его величина определяться площадью этого прямоугольника; либо сила или ускорение могут изменяться за время их действия τ по любому закону в функции Ψ_t времени, например по полусинусоиде или треугольнику, и тогда величина импульса в координатах сила — время будет определяться площадью, ограниченной кривой изменения силы или ускорения и осями координат и, следовательно, может быть найдена из равенства:

$$I = \int_0^{\tau} \Psi_t dt. \quad (3-2-14)$$

Так как площади разных импульсов с различной амплитудой и длительностью различны, то различны и начальные скорости, вызываемые действием импульса. Отношения начальных скоростей v_1 , вызываемых импульсами разной формы, к начальной скорости v_0 , вызываемой прямоугольным импульсом, при условии одинаковых амплитуд и длительностей импульсов, указаны в табл. 3. Из таблицы следует, что эти соотношения изменяются в пределах от $1/2$ до 1, т. е. вдвое, или на 6 дБ по уровню энергии колебаний. В гигиеническом аспекте из этого следует, что влияние формы импульсов при их одинаковой длительности и амплитудах может сказываться

ваться на величинах нарушений физиологических функций, вызываемых импульсной вибрацией в указанных выше пределах.

Мы не пользуемся здесь приводимым в некоторой литературе (Haggis, 1961) сравнением импульсов при одинаковой их площади в координатах сила—время, но разных амплитудах и длительностях, так как считаем такое сравнение не показательным, поскольку изменение одновременно двух параметров не позволяет выявить причину разных биологических эффектов.

Для физиологических исследований может представлять интерес реакция структур тела на внезапное приложение или снятие статической нагрузки. Этот случай может быть рассмотрен как внезапное приложение к левому торцу бруска постоянной внешней силы F , действующей вдоль его оси. Так как воздействующая сила постоянна во времени, то, очевидно, она вызовет только собственные колебания бруска. Поскольку сила связана с вызываемой ею колебательной скоростью входным импедансом ρcs , а изменение колебательной скорости определяется интегрированием воздействующей силы за время ее воздействия, то вызванный колебательный процесс будет аналогичен рассмотренному при действии толчка, но с той разницей, что взамен скорости v_0 начального толчка мы должны будем подставить в равенство (3-1-10) колебательную скорость v , определяемую уравнением

$$v = \frac{F\omega_n}{\rho cs} \int_0^{\tau} \sin \omega_n (\tau - t) dt = \frac{F}{\rho cs} (1 - \cos \omega_n \tau). \quad (3-2-15)$$

Тогда суммарное смещение, вызванное внезапным воздействием постоянной силы, приложенной в момент времени $t=0$, может быть записано в виде

$$x_c = \frac{2F}{\rho Is} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{\omega_n^2} \cos \frac{\omega_n x}{c} (1 - \cos \omega_n \tau). \quad (3-2-16)$$

Равенство показывает, что и в этом случае в бруске возникает сложный колебательный процесс, образуемый наложением синусоидальных колебаний, возбуждаемых на всех частотах собственных продольных колебаний стержня.

Для левого торца при $x=0$ и $\cos \frac{\omega_{\pi} x}{c} = 1$ смещение будет максимальным в момент времени: $\tau = \frac{2l}{c}$, когда

$$1 - \frac{\cos \omega_{\pi} 2l}{c} = 2,$$

и будет равно

$$x_{\text{макс}} = \frac{2Fl}{Es}. \quad (3-2-17)$$

Из последнего равенства следует, что внезапно приложенная постоянная сила может вызывать вдвое большее смещение, чем сила той же величины, но прикладываемая медленно. Обратим внимание, что под «внезапными» следует понимать такие воздействия, когда величины воздействующего фактора могут заметно меняться за доли периода собственных колебаний системы или когда время пробега волны напряжения вдоль бруска мало по сравнению с периодом его собственных колебаний.

Максимальную энергию колебательного процесса, сообщенную бруску, найдем как работу силы F на вызванном ею перемещении x_c :

$$E = Fx_c = 2 \frac{F^2 l}{Es}. \quad (3-2-18)$$

Можно видеть, что при одной и той же действующей силе F энергия E будет тем больше, чем меньше площадь s , подверженная силовому воздействию, и чем мягче среда (E) воспринимающая это воздействие.

В биологическом аспекте из рассмотренного примера видно, что не только вибрация, но и любое внезапное силовое воздействие на структуры тела возбуждает в них колебательный процесс на всех собственных частотах и с тем большей суммарной амплитудой смещения и энергией колебаний при одной и той же силе, чем меньше площадь воздействия и мягче ткани структуры. Кроме того, поскольку колебательный процесс в тканях будет затухать как во времени, так и за счет пространственного его распространения, ответных реакций механорецепторов тканей после «нагрузки» следует ожидать не только непосредственно в месте ее приложения или снятия силы, но и вблизи его в течение некоторого промежутка времени.

Если в бруске без поглощения энергии возбуждать колебания непрерывным действием внешней переменной силы $F = F_0 \cos \omega t$, то, как мы уже отмечали, в линейных колебательных системах с установившимся режимом колебания будут совершаться в ритме действующего фактора, т. е. в рассматриваемом случае действия внешней силы, изменяющейся по косинусоидальному закону, колебания бруска будут косинусоидальными.

Пользуясь указанным выше методом Фурье, целесообразно в этом случае искать решение волнового уравнения в виде произведения

$$x = \Psi_x \cos \omega t. \quad (3-2-19)$$

Подстановка этого решения в равенство (3—1—2) приводит к дифференциальному уравнению

$$\Psi_x'' + \frac{\omega^2}{c^2} \Psi_x = 0$$

с общим решением в виде

$$x = C \cos \frac{\omega x}{c} + D \sin \frac{\omega x}{c}, \quad (3-2-20)$$

где постоянные C и D по-прежнему определяются из граничных условий для торца бруска.

В этом случае для бруска с одним жестко закрепленным, а другим свободным концом на свободном конце при $x=0$ амплитуда действующей силы F должна уравновешиваться силой упругости бруска — ϵEs , т. е. должно иметь место равенство

$$-\epsilon s E = F_0,$$

откуда из пространственной производной смещения найдем, что при $x=0$

$$D = \frac{-F_0 c}{\omega E s}. \quad (3-2-21)$$

Для жестко закрепленного конца при $x=l$ амплитуда смещения должна быть равна нулю, откуда из равенства (3-2-20) при известном D получим, что

$$c = \frac{F_0 c \sin \frac{\omega l}{c}}{\omega E s \cos \frac{\omega l}{c}}. \quad (3-2-22)$$

Подставляя найденные значения C и D в уравнение (3-2-20), умножая результат на $\cos \omega t$ и заменяя

$E = c^2 \rho$, найдем выражение для смещения, удовлетворяющее волновому уравнению:

$$x = \frac{F_0}{\omega \rho c s} \cdot \frac{\sin \omega \frac{l-x}{c}}{\cos \frac{\omega l}{c}} \cdot \cos \omega t. \quad (3-2-23)$$

Это равенство показывает, что смещения сечений изменяются во времени с вынуждающей частотой ω внешней силы F , а их амплитуды зависят от соотношения вынуждающей частоты к собственной $\cos \frac{\omega l}{c}$ и распределяются вдоль бруска по синусоидальному закону $\sin \omega \frac{l-x}{c}$ с размещением «узлов», также зависящим от вынуждающей частоты. Кроме того, из равенства следует, что, когда его знаменатель

$$\cos \frac{\omega l}{c} = \cos \frac{\omega_n l}{c} = \cos \frac{\pi}{2} (2n-1)$$

обращается в нуль, т. е. когда вынуждающая частота ω равняется любой из частот ω_n собственных колебаний бруска, в нем возникает явление резонанса и, если энергия в бруске не поглощается, амплитуды смещения его сечений возрастают в 4 раза с каждым периодом колебаний.

Мощность колебательного процесса, возбуждаемого в бруске непрерывно действующей силой, мы можем найти по-прежнему через производные смещения по времени и пространству с умножением последней на модуль упругости и площадь поперечного сечения. Тогда получим:

$$W_n = 1/4 \cdot \frac{F_0^2}{\rho c s} \cdot \frac{\sin 2 \frac{\omega(l-x)}{c}}{\cos^2 \frac{\omega l}{c}} \sin 2\omega t, \quad (3-2-24)$$

при $x=0$, т. е. в месте возбуждения:

$$W_n = 1/2 \cdot \frac{F_0^2}{\rho c s} \operatorname{tg} \frac{\omega l}{c} \sin 2\omega t = 1/2 v_0^2 Z_{\text{вх}} \sin 2\omega t, \quad (3-2-25)$$

где

$$Z_{\text{вх}} = \frac{F_0}{v_0} = \rho c s \operatorname{ctg} \frac{\omega l}{c}.$$

Если $\frac{\omega l}{c} = 2\pi \frac{l}{\lambda}$ мало, т. е. протяженность бруска l мала по сравнению с длиной волны λ возбуждаемых в нем колебаний, то при

$$x = 0; \quad k = \frac{Es}{l}, \quad \rho l s = M,$$

$$\sin 2 \frac{\omega l}{c} \approx 2 \frac{\omega l}{c}, \quad \cos^2 \frac{\omega l}{c} = \left[1 - \left(\frac{\omega l}{c} \right)^2 \right]$$

равенство (3-2-24) может быть переписано в виде

$$W_n = \frac{1}{2} \frac{F_0^2}{\rho c s} \cdot \frac{\frac{\omega l}{c} \sin 2\omega t}{1 - \left(\frac{\omega l}{c} \right)^2} = \frac{1}{2} \frac{F_0^2 \sin 2\omega t}{\omega M \left(\frac{\omega_n^2}{\omega^2} - 1 \right)} = \frac{1}{2} v_0^2 Z \sin 2\omega t,$$

$$\text{где } \frac{\omega l}{c} = \frac{\omega}{\sqrt{\frac{Es}{\rho l^2 s}}} = \frac{\omega}{\sqrt{\frac{K}{M}}} = \frac{\omega}{\omega_n}$$

$$Z = \omega M \left(\frac{\omega_n^2}{\omega^2} - 1 \right). \quad (3-2-26)$$

Оно показывает, что поведение бруска как системы с распределенными параметрами в энергетическом отношении равноценно поведению системы с сосредоточенными параметрами, если длина бруска l меньше $1/12$ длины волны λ возбуждаемых в нем колебаний, или, иначе говоря, на низких частотах, когда время, требуемое для пробега волны напряжения вдоль бруска очень мало по сравнению с периодом его собственных колебаний.

Из этого следует, что в исследуемых случаях сложных колебательных систем и для низких частот до 100 Гц мы можем рассматривать реакцию колебательной системы на внешнее воздействие, заменяя брусок как систему с распределенными параметрами системой из массы на пружине, т. е. с сосредоточенными параметрами. Это существенно упрощает рассмотрение поведения сложных сочлененных колебательных систем, таких, как структура тела человека.

Рассмотрим теперь колебательные процессы, возникающие в линейных колебательных системах с сосредоточенными параметрами и с диссипацией энергии при возбуждении колебаний периодической силой и периодической последовательностью мгновенных сил. Принципиаль-

ная схема такой системы изображена на рис. 20, отличающемся от рис. 3 включением в нее дополнительного элемента — невесомого демпфера, поглощающего в процессе колебаний часть колебательной энергии. Если в такой системе возбудить колебания по-прежнему толчком с начальной скоростью v_0 , а следовательно, с начальной амплитудой $A_0 = \frac{v_0}{\omega_3}$, то, поскольку энергия в системе поглощается, ее колебания, очевидно, будут затухающими с некоторым показателем затухания δ , а начальная амплитуда смещения A_0 будет со временем t уменьшаться по рассмотренному выше экспоненциальному закону.

В соответствии с этим изменение во времени смещения x и его временных производных — колебательной скорости v и ускорения колебательного движения a — могут быть записаны в виде

$$x = A_0 e^{-\delta t} \sin \omega_3 t; \quad (3-2-27)$$

$$v = A_0 \omega_0 e^{-\delta t} \cos (\omega_3 t + \varphi); \quad (3-2-28)$$

$$a = A_0 \omega_0^2 e^{-\delta t} \sin (\omega_3 t + 2\varphi), \quad (3-2-29)$$

где

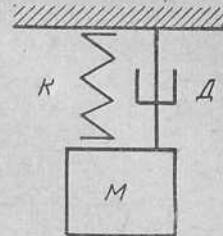
$$\sin \varphi = \frac{\delta}{\omega_0}; \quad \cos \varphi = \frac{\omega_3}{\omega_0}; \quad A_0 = \frac{v_0}{\omega_3}.$$

Поскольку при толчкообразном возбуждении никакие внешние силы не действуют на систему в процессе колебаний, баланс сил или уравнение ее движения можно записать в виде

$$Kx + Rv = -Ma, \quad (3-2-30)$$

где Kx — сила упругости пружины; Ma — сила инерции груза; Rv — сила трения или, в общем случае, диссипативная сила, пропорциональная первой степени скорости и действующая всегда в направлении, обратном движению груза.

Если подставить в это равенство найденные выше значения смещения, скорости и ускорения, разложить



20. Принципиальная схема колебательной системы с сосредоточенными параметрами. K — пружина; M — масса; D — демпфер.

синусы и косинусы суммы углов, сгруппировать члены, изменяющиеся по закону

$$\sin \omega_3 t \quad \text{и} \quad \cos \omega_3 t$$

и произвести сокращение на $A_0 e^{-\delta t}$, то равенство можно переписать в виде:

$$[K^2 - \omega_0 M \cos 2\varphi - R\omega_0 \sin \varphi] \sin \omega_3 t + \\ + [R\omega_0 \cos \varphi - \omega_0^2 M \sin 2\varphi] \cos \omega_3 t = 0.$$

Чтобы удовлетворить этому равенству, каждый многочлен в скобках должен быть равен нулю. Приравнявая, найдем из второго многочлена связь между сопротивлением трения R и показателем затухания δ :

$$R = 2M\delta \quad \text{или} \quad \delta = \frac{R}{2M}, \quad (3-2-31)$$

а из первого многочлена — частоту затухающих колебаний системы:

$$\omega_3^2 = \omega_0^2 - \delta^2 \quad \text{или} \quad \omega_3 = \omega_0 \sqrt{1 - \left(\frac{\delta}{\omega_0}\right)^2}. \quad (3-2-32)$$

Можно видеть, что, так же как у бруска, частота затухающих колебаний ω_3 тем меньше частоты свободных колебаний ω_0 системы без трения, а их период тем больше, чем больше показатель затухания δ . Обратим внимание, что когда затухание в системе настолько велико, что показатель затухания равен частоте свободных колебаний такой же системы, но без трения, т. е. при $\delta_{кр} = \omega_0$, частота затухающих колебаний обращается в нуль. Это означает, что система, выведенная из положения равновесия, медленно возвращается к нему без колебания.

Критическому затуханию соответствует критическое диссипативное сопротивление $R_{кр}$, равное

$$R_{кр} = 2\sqrt{KM}. \quad (3-2-33)$$

Наблюдая визуально действие толчка на мягкие ткани тела человека, можно видеть, что колебания в них затухают с большим показателем δ , близким к половине критического. Заметим также, что в монографиях по теории колебаний и ее практическому применению и в гигиенической литературе по вибрации (Д. Ден-Гартог, 1960; С. П. Тимошенко, 1959; Е. Ц. Андреева-Галанина, 1956), разные авторы оценивают рассеивание энергии в колебательных системах и другими величинами, непо-

средственно связанными с показателем затухания δ , а именно:

$$\text{относительным затуханием } \eta = \frac{\delta}{\omega_0} = \frac{\delta}{\delta_{кр}};$$

$$\text{логарифмическим декрементом } \vartheta = \delta T_3;$$

$$\text{тангенсом угла потерь } \operatorname{tg} \varphi = \frac{\delta}{\omega_3};$$

$$\text{добротностью системы } Q = \frac{\omega_0}{2\delta} = \frac{1}{2} \frac{\delta_{кр}}{\delta}. \quad (3-2-34)$$

В литературе (Nagris, Crede, 1961) имеются указания, что добротность структур тела человека колеблется в пределах $Q=1 \div 2$, чему соответствует $\delta=1/2\omega_0$ до $1/4\omega_0$.

Полную мощность W_{Π} возникающего колебательного процесса найдем как произведение правой (Ma) или левой ($Kx+Rv$) части уравнения движения и колебательной скорости v :

$$\begin{aligned} W_{\Pi} &= M\omega_0^2 A_0^2 e^{-2\delta t} [\sin(\omega_3 t + 2\varphi) \cos(\omega_3 t + \varphi)] = \\ &= M\omega_0^2 A_0^2 e^{-2\delta t} [1/2 \sin 2(\omega_3 t + \varphi) \cos \varphi + \cos^2(\omega_3 t + \varphi) \sin \varphi] = \\ &= 1/2 A_0^2 M\omega_0^2 e^{-2\delta t} [\sin(2\omega_3 t + 3\varphi) + \sin \varphi]. \end{aligned} \quad (3-2-35)$$

Равенство указывает, что полная мощность колебательного процесса пропорциональна колеблющейся массе, кубу круговой частоты и квадрату амплитуды смещения и складывается из двух частей — реактивной части, пропорциональной $\cos \varphi$ и расходуемой на изменение положения груза в пространстве, и активной части, пропорциональной $\sin \varphi$ и поглощаемой в демпфере или, в общем случае, рассеиваемой в системе и переходящей в другие виды энергии. Обе части убывают во времени с удвоенным показателем затухания 2δ и тем медленнее, чем меньше этот показатель. В пределе, когда показатель затухания δ , а следовательно, и угол φ равен нулю, полная мощность становится реактивной и равной той, которую мы определили ранее, рассматривая во второй главе гармоническое колебание в системах без трения. Кроме того, можно видеть, что начальная мощность колебательного процесса при $t=0$ равна

$$W_{\Pi\Pi} = 1/2 M\omega_0^2 A_0^2 [\sin 3\varphi + \sin \varphi] = Rv_0^2. \quad (3-2-36)$$

Энергию, поглощенную в системе, найдем интегрированием полной колебательной мощности за время t от

начала колебания до его полного затухания, т. е. от $t=0$ до $t=\infty$. Она будет равна

$$E = \int_0^{\infty} W_n dt = \frac{1}{2} M \omega_0^2 A_0^2 \left(\frac{1 + \cos 2\varphi}{2\omega_0} \right) = \frac{1}{2} M v_0^2, \quad (3-2-37)$$

т. е. кинетической энергии, сообщенной колебательной системе начальным толчком.

Если на такую же колебательную систему действовать не одиночным толчком, а серией периодически следующих через интервалы времени T одинаковых импульсов мгновенных сил, длительность которых весьма мала по сравнению с периодом T_3 собственных колебаний системы, то для любого момента времени t после какого-либо i -го импульса величины кинематических параметров колебательного процесса будут равны сумме величин, возбуждаемых каждым предыдущим импульсом, с учетом разного их затухания в интервале времени от возникновения импульса до момента t .

Так, например, смещение для момента t после третьего импульса соответственно равенству (3-2-27) будет равно сумме смещений:

$$\text{от первого импульса } x_1 = A_0 e^{-\delta t} \sin \omega_3 t;$$

$$\text{от второго импульса } x_2 = A_0 e^{-\delta(t-T)} \sin \omega_3(t-T)$$

$$\text{от третьего импульса } x_3 = A_0 e^{-\delta(t-2T)} \sin \omega_3(t-2T) \text{ и т. д.}$$

В общем случае суммарное смещение для момента времени t может быть записано в виде ряда

$$x_{\text{сум}} = x_1 + x_2 + x_3 + \dots = A_0 \sum_0^{(n-1)} e^{-\delta(t-iT)} \cdot \sin \omega_3(t-iT) \quad (3-2-38)$$

$$\text{при } t > (n-1)T,$$

где n — общее число импульсов в интервале времени от 0 до t ; i — порядковый номер импульса; T — период следования импульсов; A_0 — амплитуда одиночного импульса.

Аналогичные уравнения могут быть написаны и для амплитудно-временных характеристик скорости и ускорения колебательного процесса.

Если период T следования импульсов равен или кратен периоду $T_3 = \frac{2\pi}{\omega_3}$ собственных затухающих колебаний системы, то в системе возникают резонансные ко-

лебания так называемого ударного резонанса. Изменив для этого случая порядок отсчета времени на обратный и приняв за начало отсчета момент времени $t = (n-1)mT_3$, т. е. ведя отсчет времени от последнего импульса к первому, равенство можно переписать в виде:

$$x_{\text{сум}} = A_0 e^{-\delta t} [e^{-(n-1)\delta mT_3} + e^{-(n-2)\delta mT_3} + \dots + e^{-\delta mT_3} + 1] \sin \omega_3 t, \quad (3-2-39)$$

где $T = mT_3$; $\sin \omega_3(t-iT) = \sin \omega_3 t$, а $m = 1, 2, 3, \dots$ — показатель кратности периодов следования импульсов периоду собственных затухающих колебаний.

Многочлен последнего равенства представляет собой геометрическую прогрессию, сумма членов которой равна

$$\frac{1 - e^{-n\delta mT_3}}{1 - e^{-\delta mT_3}}.$$

Поэтому равенство (3-2-39) для любого числа n импульсов в интервале времени между последующим и предыдущим импульсами может быть переписано в виде

$$x_{\text{сум}} = A_0 \frac{1 - e^{-n\delta mT_3}}{1 - e^{-\delta mT_3}} e^{-\delta t} \sin \omega_3 t \quad (3-2-40)$$

при $(n-1)mT_3 < t < nmT_3$,

где $A_0 \frac{1 - e^{-n\delta mT_3}}{1 - e^{-\delta mT_3}}$ — амплитуда смещения, устанавливающаяся при действии n импульсов.

Равенство показывает, что возникающий колебательный процесс периодичен и форма его амплитудно-временной характеристики повторяется в каждом интервале между импульсами, а его амплитуды зависят от числа n импульсов и периода mT_3 их следования.

Кроме того, можно видеть, что при $n=1$ уравнение (3-2-40), как и следовало ожидать, обращается в уравнение (3-2-27) смещения при действии одиночного импульса. Если же число n импульсов неограниченно возрастает, то член $e^{-n\delta mT_3}$ обращается в нуль и мы имеем случай, аналогичный действию импульсных вибраций. Поскольку уравнение смещения для последовательности импульсов отличается от уравнения для одиночного импульса только амплитудой, мы можем для колебательного процесса, возбуждаемого неограниченным числом импульсов мгновенных сил, следующих че-

рез интервалы времени, равные или кратные периоду затухающих колебаний системы, записать группу равенств:

$$x = \frac{A_0 e^{-\delta t} \sin \omega_3 t}{1 - e^{-\delta m T_3}}; \quad v = \frac{A_1 \omega_0 e^{-\delta t} \cos (\omega_3 t + \varphi)}{1 - e^{-\delta m T_3}}$$

$$a = - \frac{A_1 \omega_0^2 e^{-\delta t} \sin (\omega_3 t + 2\varphi)}{1 - e^{-\delta m T_3}}; \quad (3-2-41)$$

$$W_n = 1/2 \frac{M \omega_0^2 A_0^2 e^{-2\delta t}}{(1 - e^{-\delta m T_3})^2} [\sin (2\omega_3 t + 3\varphi) + \sin \varphi] \quad (3-2-42)$$

при $(n-1) m T_3 < t < n m T_3$.

Энергию, поглощаемую в колебательной системе за период $m T_3$ одного колебания при неограниченном числе периодически следующих импульсов, найдем интегрированием мгновенной колебательной мощности в пределах от $t=0$ до $t=m T_3$.

$$E_{\text{погл}} = \int_0^{m T_3} W_n dt = 1/2 M v_0^2 \frac{1 - e^{-2\delta m T_3}}{(1 - e^{-\delta m T_3})^2}. \quad (3-2-43)$$

Равенство указывает, что поглощенная энергия равна разности полной энергии колебательного процесса и той ее части, которая расходуется на поддержание колебаний. Если $\delta m T_3 < 0,1$, то $(1 - e^{-\delta m T_3}) \approx \delta m T_3$ и равенство (3-2-43) можно представить в виде

$$E_{\text{погл}} = 1/2 M v_0^2 \frac{1 + e^{-\delta m T_3}}{1 - e^{-\delta m T_3}} \approx \frac{M v_0^2}{\delta m T_3} \quad (3-2-44)$$

при $0 < \delta m T_3 < 0,1$,

откуда следует, что в условиях ударного резонанса при одной и той же начальной скорости v_0 поглощаемая энергия тем больше, чем меньше показатель затухания δ и период $m T_3$ следования импульсов, так как вследствие меньшего затухания и периода следования импульсов увеличиваются амплитуды колебаний.

Для структур тела человека при совпадении частоты следования импульсов с частотой собственных колебаний структуры, т. е. при $m=1$ и $\delta = 1/4 \omega_0$ до $1/2 \omega_0$ член $\frac{1 + e^{-\delta m T_3}}{1 - e^{-\delta m T_3}} = 1,36$ до 1,06, т. е. энергия, поглощенная за период T следования импульсов, больше полной энергии одиночного импульса на $6 \div 36\%$.

Если на рассматриваемую систему непрерывно воздействует приложенная к массе внешняя периодическая сила, изменяющаяся по синусоидальному закону $F_0 \sin(\omega t + \varphi)$, то по истечении некоторого времени, необходимого для достижения установившегося состояния, система будет колебаться, как мы уже знаем, в навязанном ей ритме, т. е. с частотой колебания внешней силы. Изменения во времени кинематических параметров вынужденного колебательного процесса в этом случае могут быть записаны в виде

$$\begin{aligned}x &= A \sin \omega t; \\v &= A\omega \cos \omega t; \\a &= -A\omega^2 \sin \omega t,\end{aligned}\tag{3-2-45}$$

где A — амплитуда смещения, зависящая от величины действующей внешней силы и входного механического импеданца системы.

В процессе колебания на систему, помимо внешней силы, $F_0 \sin(\omega t + \varphi)$, изменяющейся во времени по синусоидальному закону, действуют внутренние силы: инерции массы Ma , упругости пружины Kx и диссипативная сила (трение) Rv , пропорциональная колебательной скорости (φ — фазовый угол между действующей силой и вызванной ею колебательной скоростью, показывающей, насколько отстают по времени колебания скорости от колебаний вынуждающей силы). Поэтому баланс сил в любой момент времени, или, иначе говоря, уравнение движения системы, можно записать в виде

$$F_0 \sin(\omega t + \varphi) = Ma + Kx + Rv.\tag{3-2-46}$$

Если в это равенство подставить значения смещения, скорости и ускорения из уравнений (3-2-45), разложить синус и косинус разности углов, сгруппировать члены, изменяющиеся во времени по закону $\sin \omega t$ и $\cos \omega t$ и приравнять нулю каждый из многочленов этих групп, то мы получим два уравнения:

$$\begin{aligned}F_0 \sin \varphi &= AR\omega; \\F_0 \cos \varphi &= KA - MA\omega^2.\end{aligned}\tag{3-2-47}$$

Деля первое равенство на второе, находим фазовый угол между действующей внешней силой и вызываемой ею колебательной скоростью:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{R}{K/\omega - \omega M} = \frac{Z_a}{Z_p}.\tag{3-2-48}$$

$$\sin \varphi = \frac{R}{\sqrt{(K/\omega - \omega M)^2 + R^2}} = \frac{Z_a}{Z}; \quad (3-2-49)$$

$$\cos \varphi = \frac{K/\omega - \omega M}{\sqrt{(K/\omega - \omega M)^2 + R^2}} = \frac{Z_p}{Z}. \quad (3-2-50)$$

Возводя оба равенства в квадрат, складывая их и извлекая из результата квадратный корень, найдем амплитуду смещения A и величину входного импеданца Z :

$$A = \frac{F_0}{\omega \sqrt{(K/\omega - \omega M)^2 + R^2}} = \frac{F_0}{\omega Z}; \quad (3-2-51)$$

$$Z = \frac{F_0}{v} = \sqrt{(K/\omega - \omega M)^2 + R^2} = \sqrt{Z_a^2 + Z_p^2}, \quad (3-2-52)$$

где Z — входной механический импеданс; Z_p — реактивная часть этого импеданца; Z_a — его активная часть; F_0 , A , v — амплитуды внешней силы, смещения и колебательной скорости; φ — фазовый угол между внешней силой и колебательной скоростью; K , M , R — жесткость, масса и диссипативное сопротивление колебательной системы.

Обратим внимание, что в равенстве (3-2-48) знаменатель, а следовательно, и тангенс угла потерь положительны до тех пор, пока K/ω больше ωM или, иначе говоря, пока вынуждающая частота ω меньше частоты $\omega_0 = \sqrt{K/M}$ собственных колебаний системы. В этом случае смещение совпадает по фазе с вынуждающей силой и груз всегда перемещается в том же направлении, в каком действует сила. Если K/ω меньше ωM , т. е. вынуждающая частота ω больше частоты ω_0 собственных колебаний системы, то знаменатель уравнения, а следовательно, и тангенс угла потерь отрицательны. Это означает, что смещение противоположно по фазе действующей внешней силе и груз, не поспевая в начале колебаний за быстрыми изменениями силы, приходит в колебание с некоторым запаздыванием и в дальнейшем всегда смещается в направлении, противоположном действующей силе, т. е. перемещается вверх, когда сила действует вниз. Если упругое сопротивление системы K/ω равняется ее инерционному сопротивлению ωM , т. е. вынуждающая частота ω совпадает с частотой ω_0 собственных колебаний системы, то ее сопротивление резко уменьшается, становясь диссипативным, в системе возникает явление резонанса и амплитуды ее колебания

возрастают тем больше, чем меньше сопротивление R системы.

Зная входной механический импеданс, мы можем выразить кинематические характеристики колебательного процесса в функции импеданца в виде следующих основных и тождественных уравнений:

$$x = \frac{F_0}{\omega Z} \sin \omega t = \frac{v_0}{\omega} \sin \omega t; \quad (3-2-53)$$

$$v = \frac{F_0}{Z} \cos \omega t = v_0 \cos \omega t; \quad (3-2-54)$$

$$a = -\frac{F_0}{Z} \sin \omega t = -v_0 \omega \sin \omega t. \quad (3-2-55)$$

Мы указали здесь две группы уравнений потому, что в технических расчетах, с которыми органам санитарного надзора приходится иметь дело при экспертизе проектов, колебания обычно задаются действующими периодическими силами, исходя из которых при известном входном импеданце определяются кинематические параметры колебательного процесса. При гигиенических обследованиях производств, как правило, измеряют кинематические параметры вибрации в зоне соприкосновения тела человека с вибрирующими поверхностями. По ним и входному импеданцу могут быть оценены действующие силы или колебательные мощности.

Проанализируем, как изменяются амплитудные значения кинематических параметров колебательного процесса при изменении частоты действующей внешней силы, т. е. при изменении соотношения вынуждающей частоты ω/ω_0 к частоте собственных колебаний системы $\omega_0 = \sqrt{K/M}$. Для этого перепишем уравнение входного импеданца в виде

$$\begin{aligned} Z &= \frac{K}{\omega} \sqrt{\left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_0^2}\right)^2 + 4 \frac{\delta^2}{\omega_0^2} \cdot \frac{\omega^2}{\omega_0^2}} = \\ &= \omega M \sqrt{\left(\frac{\omega_0^2}{\omega^2} - 1\right)^2 + 4 \frac{\delta^2}{\omega^2}}. \end{aligned} \quad (3-2-56)$$

Можно видеть, что если вынуждающая частота ω уменьшается, стремясь к нулю, то импеданс системы стремится к K/ω , т. е. зависит только от жесткости или, как говорят, становится «жесткостным», а амплитуда сме-

щения стремится к постоянной величине F_0/K , равной деформации пружины под действием равновеликой статической силы. При этом амплитуды колебательной скорости и ускорения колебательного движения стремятся к нулю. Если же вынуждающая частота ω увеличивается до бесконечно большой величины, то импеданс системы стремится к ωM , т. е. зависит только от ее массы или, как говорят, становится «инерционным» или «массовым», а амплитуда ускорения, согласно (3-2-55), стремится к постоянной величине F_0/M . При этом амплитуды смещения и колебательной скорости также стремятся к нулю.

Если вынуждающая частота ω близка к частоте собственных колебаний системы, то импеданс стремится к $R=2M\delta$, т. е. зависит только от поглощения энергии в системе, или, иначе говоря, становится диссипативным, а система колеблется с наибольшими амплитудами. Так, при вынуждающей частоте, немного меньшей частоты собственных колебаний, имеет место максимум смещения с наибольшей амплитудой:

$$x_{\text{макс}} = \frac{F_0}{R\omega_0 \sqrt{1 - \frac{\delta^2}{\omega_0^2}}} \quad \text{при } \omega = \omega_0 \sqrt{1 - 2 \frac{\delta^2}{\omega_0^2}}. \quad (3-2-57)$$

Если $\omega = \omega_0$, то наступает резонанс колебательной скорости с максимальной амплитудой:

$$v_{\text{макс}} = \frac{F_0}{R}. \quad (3-2-58)$$

При вынуждающей частоте ω , немного большей частоты ω_0 собственных колебаний системы, имеет место максимум ускорения с наибольшей амплитудой:

$$a_{\text{макс}} = \frac{F_0\omega_0}{R \sqrt{1 - \frac{\delta^2}{\omega_0^2}}} \quad \text{при } \omega = \frac{\omega_0}{\sqrt{1 - 2 \frac{\delta^2}{\omega_0^2}}} \quad (3-2-59)$$

при $\delta=0$ все три частоты совпадают с ω_0 .

Из приведенного анализа следует, что величина отношения $\frac{\omega}{\omega_0}=1$ является критериальной, разграничивающей область частот на две части с качественно различными импедансами и тем самым указывающей, на преодоление преимущественно какого сопротивления расходуется мощность колебательного процесса в том или ином частотном диапазоне. Так, при «жесткостном»

характере импеданса колебательная мощность расходуется в основном на преодоление упругого сопротивления, а при импедансе «массового» характера — на преодоление ее инерционного сопротивления; в той области частот, где импеданс является диссипативным, вся колебательная мощность затрачивается на преодоление диссипативного сопротивления (трения), т. е. в общем случае поглощается в колебательной системе и переходит в другие виды энергии, а колебания поддерживаются только возвращающей силой. Величины относительных амплитуд колебательной скорости смещения и ускорения в зависимости от отношения вынуждающей частоты к частоте собственных колебаний системы при различных значениях относительного затухания $\eta = \frac{\delta}{\omega_0}$ в системе показаны на рис. 21.

Если на колебательную систему с массой $M = 10 \text{ кг} \cdot \text{с}^2/\text{м}$, жесткостью $K = 1000 \text{ кг/м}$ и коэффициентом затухания $\delta = 0,5 \text{ с}^{-1}$ непрерывно действует внешняя периодическая сила с амплитудой $F_0 = 100 \text{ кг}$ и круговой частотой $\omega = 50 \text{ рад/с}$, то кинематические параметры возникающего колебательного процесса, согласно рис. 21, составят при

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{K}{M}} = \sqrt{\frac{1000}{10}} = 10 \frac{\text{рад}}{\text{с}};$$

$$\frac{\omega}{\omega_0} = \frac{50}{10} = 5; \quad \frac{\delta}{\omega_0} = \frac{0,5}{10} = 0,05;$$

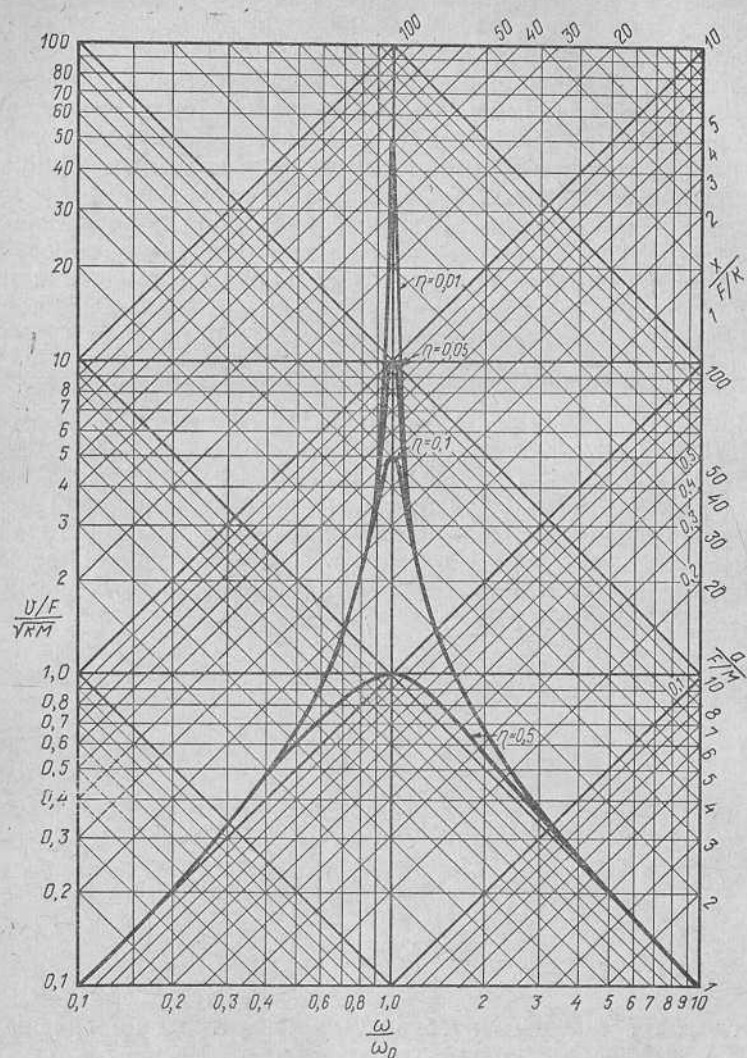
$$\text{смещение } x = \frac{F_0}{K} b' = \frac{100}{1000} \cdot 0,04 = 0,004 \text{ м};$$

$$\text{скорость } v = \frac{F_0}{\sqrt{KM}} b'' = \frac{100}{\sqrt{1000 \cdot 10}} \cdot 0,2 = 0,2 \text{ м/с};$$

$$\text{ускорение } a = \frac{F_0}{M} b''' = \frac{100}{10} \cdot 1 = 10 \text{ м/с}^2,$$

где b' , b'' , b''' — относительные амплитуды по графику при $\frac{\omega}{\omega_0} = 5$.

Из равенств (3-2-51) и (3-2-52) и рис. 21 можно видеть, что чем больше вынуждающая частота ω отличается от частоты ω_0 собственных колебаний, тем больше сопротивление системы и тем меньше амплитуды ее колебаний при одинаковой колебательной мощности.



21. Изменения относительных амплитуд при соотношении частоты (ω) вынуждающей силы и собственной частоты (ω_0) колебательной системы.

$\frac{x}{F_0/k}$ — смещения; $\frac{v}{F_0/\sqrt{KM}}$ — скорости; $\frac{a}{F_0/M}$ — ускорения, η — коэффициент потерь.

Полная мощность колебательного процесса, вызванного непрерывным действием на колебательную систему внешней периодической силы, очевидно, будет равна произведению этой силы на вызванную ею колебательную скорость, и поэтому амплитудно-временная характеристика полной мощности может быть записана в виде следующих тождественных равенств при $v_0 = \frac{F_0}{Z}$:

$$W_n = Fv = \frac{1}{2} \frac{F_0^2}{Z} \sin 2\omega t \cos \varphi + \frac{F_0^2}{Z} \cos^2 \omega t \sin \varphi; \quad (3-2-60)$$

$$W_n = \frac{1}{2} v_0^2 Z [\sin (2\omega t + \varphi) + \sin \varphi]. \quad (3-2-61)$$

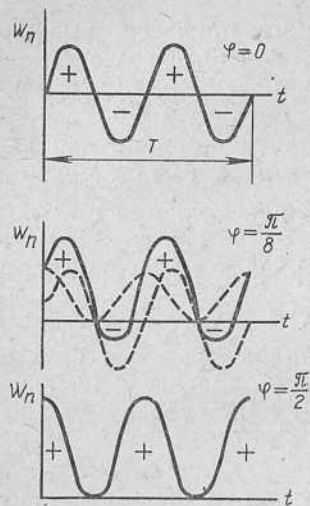
Из первого равенства можно видеть, как и в предыдущем случае, что полная мощность складывается из двух частей: реактивной части, пропорциональной $\cos \varphi$, расходуемой на изменение положения колеблющейся точки в пространстве, и активной мощности, пропорциональной $\sin \varphi$ и поглощаемой в демпфере или, в общем случае, переходящей в другие виды энергии.

Второе равенство показывает, что колебательная мощность пропорциональна квадрату среднеквадратичной колебательной скорости и входному импедансу системы. Интегрируя уравнение мгновенной мощности за период колебания, найдем энергию, поглощаемую в системе за один период:

$$E = \int_0^T W_n dt = \frac{1}{2} v_0^2 TZ \sin \varphi = \frac{1}{2} v_0^2 RT. \quad (3-2-62)$$

Равенство показывает, что полная энергия колебания, сообщаемая системе внешним источником за один период колебания, равна энергии, поглощаемой в колебательной системе. Иначе говоря, из всей колебательной мощности, сообщаемой системе источником колебания за каждый период колебания, она отбирает от него ровно столько энергии, сколько она может поглотить, возвращая остальную часть обратно источнику колебания.

В биологическом аспекте это означает, что при прочих равных условиях следует ожидать соответствия между поглощенной колебательной энергией и величинами наблюдаемых изменений физиологических функций и, в частности, пропорциональности этих изменений интенсивности колебания и длительности их воздействия и более неблагоприятного действия высокочастотных колебаний, больше затухающих в тканях тела.



22. Характер изменения во времени полной мощности колебательных процессов при изменении фазового угла φ и возбуждении колебаний периодической силой или периодически следующими импульсами сил.

Изменение колебательной мощности во времени для трех значений фазового угла между возбуждающей силой и колебательной скоростью показано на рис. 22.

Можно видеть, что с изменением фазового угла изменяется форма кривой полной колебательной мощности, изменяя тем самым качественно-количественный характер энергетического воздействия на систему. Это изменение с увеличением поглощения в системе (т. е. $\sin \varphi$) заключается в увеличении положительных амплитуд и длительности цикла поступления энергии от источника в колебательную систему с одновременным уменьшением амплитуд отрицательных и продолжительности цикла отдачи энергии источнику колебания.

В биологическом аспекте из этого следует, что именно этими факторами в сочетании с амплитудно-временной и амплитудно-частотной характеристиками рецепторов, зависящих от происходящих в них физико-химических процессов, обуславливаются особенности ответных реакций организма на воздействие вибрации с различным спектральным составом. Другими словами, наиболее репрезентативной характеристикой для гигиенической оценки вибраций является амплитудно-частотная характеристика колебательной мощности.

Анализируя поведение одной и той же колебательной системы при характерных случаях воздействия на систему периодической силы и периодически следующих импульсов мгновенных сил, мы можем отметить следующее сходство и различие в их поведении.

Сходство в том, что оба процесса периодичны и при одинаковых амплитудах колебательной скорости v_0 и частотах ω изменения периодической силы и следования

импульсов характеризуются при малом затухании в системе приблизительно одинаковой формой амплитудно-временной характеристики, близкой к синусоидальной кривой, несколько смещенной вверх по оси ординат, соответственно величинам активной и реактивной частей механического импеданса системы.

Различие в том, что при действии периодической силы резонансные колебания системы возникают только при совпадении частоты собственных незатухающих колебаний системы с вынуждающей частотой периодической силы, в то время как при действии на систему периодически следующих импульсов сил резонансные колебания ударного резонанса могут возбуждаться как при совпадении периода следования импульсов с периодом собственных затухающих колебаний, так и с периодами, кратными ему.

Сопоставляя для резонансных условий энергию, поглощаемую в одной и той же системе при возбуждении в ней колебаний периодической силой и периодически следующими импульсами мгновенных сил с одинаковыми частотами ω и амплитудами колебательных скоростей v_0 , можно видеть, что соотношение этих энергий равно:

$$\frac{E_{\text{имп}}}{E_{\text{сил}}} = \frac{1/2 M v_0^2 (1 - e^{-2\delta T})}{T M v_0^2 \delta (1 - e^{-\delta T})^2} = \frac{f_0}{2\delta} \cdot \frac{1 + e^{-\delta T}}{1 - e^{-\delta T}}. \quad (3-2-63)$$

Иначе говоря, при резонансных колебаниях и прочих равных условиях энергия, поглощаемая в системе при действии периодически следующих импульсов мгновенных сил тем меньше энергии, поглощаемой при действии периодической синусоидальной силы, чем меньше частота собственных колебаний системы и чем больше поглощение в ней.

Для структур тела человека при $\delta = 1/4\omega_0$ до $1/2\omega_0$ отношение $\frac{E_{\text{имп}}}{E_{\text{сил}}} = 0,48$ до $0,173$. В биологическом аспекте из этого следует, что при разности уровней квадратов амплитуд колебательных скоростей, вызываемых действием импульса и синусоидальной силы от 3 до 7 дБ, нет оснований ожидать какой-либо специфики в отдаленных последствиях действия импульсных и синусоидальных резонансных колебаний.

Мы рассмотрели характерные явления, возникающие в бруске как элементе сплошной ограниченной среды,

имитирующем в первом приближении структуры тела человека, подверженные действию вибрации, и получили некоторые обобщенные выводы, представляющие интерес для физиолого-гигиенического изучения действия вибраций на организм человека.

Разумеется, в натуральных условиях вибрационного воздействия явления, возникающие в структурах тела, охваченных колебательным движением, значительно сложнее как из-за отклонений от рассмотренных условий действия колебательного процесса, так и из-за неоднородности и сочлененности структур и особенностей ответных реакций организма на внешний раздражитель. Действительно, с одной стороны, направление действия вибрации обычно не совпадает с продольной осью сочлененных структур, обладающих к тому же диссипативными свойствами. Это приводит к возникновению косых продольных и сдвиговых волн поперечных колебаний, а также к возбуждению связанных вращательных колебаний. Вследствие этого в структурах возникают разновидности упругих волн, в том числе изгибные волны, распространяющиеся со скоростями, зависящими от частоты колебаний и радиуса инерции структур, а также поверхностные волны на внешних границах структур. Изменяются и условия отражений волн в суставных сочленениях и тканях, представляющих собой в общем случае не плоские, а криволинейные поверхности раздела сред. С другой стороны, ткани тела, характеризующиеся нелинейностью упруго-вязких свойств при интенсивных колебаниях и их изменчивостью под влиянием рефлекторного эфферентного воздействия нервных центров, обуславливают возможность возникновения субгармонических колебаний с частотами ниже основной частоты собственных колебаний и параметрических резонансов, возбуждаемых при изменении мышечного напряжения и жесткости тканей. Все это приводит к значительно более сложным явлениям и их взаимозависимостям, исключающим возможность надежных теоретических расчетов сложных пространственных вибрационных полей, возникающих в организме человека. Тем не менее это не изменяет полученных нами основных выводов и интерпретации их значения в биологическом аспекте.

Резюмируя изложенное в этом параграфе, мы можем отметить следующее.

Колебания в механических системах, в том числе в структурах тела человека, рассматриваемых как такие же системы, возникают как при кратковременном приложении постоянной силы, так и при непрерывном действии периодически меняющейся силы или периодической последовательности импульсов мгновенных сил.

При том и другом воздействии амплитуды колебаний формируются из долей, вносимых колебаниями, каждое из которых имеет собственную частоту. При совпадении частоты собственных колебаний с частотой вынуждающих сил или периодической последовательности импульсов мгновенных сил в системе возникают резонансные колебания с тем большими амплитудами, чем меньше затухание в системе.

Мощность колебательного процесса в месте его возбуждения пропорциональна среднеквадратичной колебательной скорости и входному механическому импедансу системы, характер которого меняется в зависимости от соотношения частоты возбуждения с частотой собственных колебаний системы. При непрерывном действии периодически меняющейся силы или периодической последовательности импульсов сил колебательная система отбирает от источника колебания за каждый период столько энергии, сколько она может поглотить.

В биологическом аспекте из этого следует, что наибольших нарушений физиологических функций следует ожидать при резонансных колебаниях и что в до- и зарезонансной областях частот можно ожидать корреляции между спецификой преимущественно наблюдаемых нарушений физиологических функций и спектральным составом вибраций, характером сопротивления, оказываемого системой ее воздействию, и величиной области распространения колебаний.

МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕЛА ЧЕЛОВЕКА

При рассмотрении действия вибраций на тело человека как на колебательную систему механические характеристики тела могут не только дать количественное представление об их величинах, но и позволяют сделать некоторые суждения для прогнозирования характера и направленности особенностей проявления биологического действия вибраций на основе анализа физических явлений, возникающих в структурах тела. Эти характери-

ки можно разделить на две группы: основные и производные.

К первой группе относятся: вес отдельных частей тела человека, плотность, модуль упругости и модуль сдвига мягких и жестких тканей тела, скорости распространения волн напряжения в тканях и их характеристические импедансы.

Вторую группу производных характеристик составляют: показатели относительного затухания колебаний при их распространении по телу от места возбуждения, частотные характеристики входных механических импеданцев в зоне контакта тела с вибрирующими поверхностями, переходные механические импеданцы для любой точки поверхности тела, частоты собственных колебаний структур тела.

Таблица 4. Вес отдельных частей тела человека

Наименование	Вес (кг)	
	абсолютный	относительный
Голова	5	0,07
Туловище	30	0,43
Руки	2×4,5	0,13
Ноги	2×13	0,37
Всего . . .	70	1

Примечание. Вес кисти 0,6 кг, предплечья 1,6 кг, плеча 2,3 кг.

В табл. 4 приведены усредненные по данным Н. Н. Хавкина, Coldman (цит. по Harris и Crede, 1961) и Woodson и Copover (1968) веса отдельных частей тела человека в относительных к общему весу и в абсолютных величинах. Последние относятся к средним показателям для мужчин ростом 175 см, и весом 70 кг.

В табл. 5 указаны по данным Coldman и Gierke (цит. по Harris и Crede, 1961) физические свойства тканей тела: объемный вес, модули упругости и сдвига, характеристический импеданс и скорость распространения продольных волн¹. Можно видеть, что волновое сопро-

¹ Скорость распространения поперечных волн была найдена равной 20 м/с при 200 Гц и пропорциональной корню квадратному из частоты.

Таблица 5. Физические характеристики тканей тела человека

Наименование	Ткани	
	мышечные	костные
Объемный вес (кг/м ³)	1 100	1950
Модуль упругости Юнга (кг/м ²)	765	2300×10^6
Модуль сдвига (кг/м ²)	250	720×10^6
Скорость продольных волн (м/с)	150	3400
Характеристический импеданс (кг·с/м ³)	17 000	600 000

тивление жестких тканей тела, как мы уже отмечали выше, приблизительно в 4 раза больше, чем для мягких тканей.

В табл. 6 по тем же литературным источникам указаны усредненные изменения жесткости K и диссипативного сопротивления R мягких тканей тела при их смещении под действием статической нагрузки, отнесенной к площади 1 см².

Эти данные были получены Franke (цит. по Harris и Crede, 1961) только на двух исследуемых и характеризовались разбросом показаний. Тем не менее можно видеть, что при нагрузках, вызывающих смещения тканей, не превышающие 5 мм, жесткость K и сопротивление R изменяется практически линейно с изменением нагрузки. При смещениях более 5 мм ткани тела обнаруживают характерную нелинейность их упруго-вязких свойств.

Кроме того, из таблицы следует, что в диапазоне исследуемых нагрузок величины диссипативного сопротивления мягких тканей существенно меньше упругого сопротивления.

Это подтверждает высказанные выше соображения о возможности пренебрегать диссипативными потерями в

Таблица 6. Изменения жесткости и диссипативного сопротивления мягких тканей при статической нагрузке

	Смещение под нагрузкой (мм)					
	0	2	4	6	8	10
Жесткость K (г/см)	200	210	220	300	400	700
Сопротивление R (г·с/см)	3	3,2	3,4	4	6	9

Таблица 7. Основные частоты собственных колебаний отдельных элементов и всего тела человека

Тело в положении	Частота (Гц)	Части тела	Частота (Гц)
Лежа	3—4	Глазное яблоко	60—90
Сидя	4—6	Голова	20—30
Стоя	5—12	Согнутые руки	30—60
		Грудная клетка	5—8
		Брюшная полость	3—4

приближенном анализе физических явлений, возникающих в структурах тела при воздействии вибрации во внерезонансном режиме.

В табл. 7 по тем же литературным источникам указаны диапазоны частот собственных колебаний тела человека и его частей. Следует отметить, что приведенные величины являются приближенными и переменными, они определены из данных эксперимента при допущении, что тело человека или его структуры представляют собой линейную колебательную систему с сосредоточенными параметрами. Из таблицы следует, что с изменением позы человека из положения стоя в положение лежа изменяются частоты собственных колебаний тела, зависящие от массы и жесткости его структур. Так как на низких частотах воздействия колебаний входной механический импеданс тела определяется его массой, а максимальная величина импеданса достигается при равенстве частоты возбуждения ω и низшей частоты ω_1 собственных колебаний, то для максимальной амплитуды мощности колебательного процесса получим равенство:

$$W_{\max} = \frac{1}{2} v^2 Z_{\text{вх}} = \omega M \frac{v^2}{2} = \omega_1 M \frac{v^2}{2}.$$

Из равенства следует, что при одинаковых массах и воздействующих колебательных скоростях изменением жесткости структур тела можно уменьшить амплитуду воздействующей колебательной мощности и неблагоприятное ощущение от действия вибраций. Кроме того, из приведенного равенства можно видеть, что при действии вибраций с частотами ω , значительно меньшими низшей частоты ω_1 собственных колебаний тела, ампли-

туда колебательной мощности пропорциональна массе и градиенту квадрата среднеквадратичного ускорения по частоте, так как:

$$W = M \left(\frac{v^2 \omega}{2} \right) = M \left(\frac{a^2}{2\omega} \right),$$

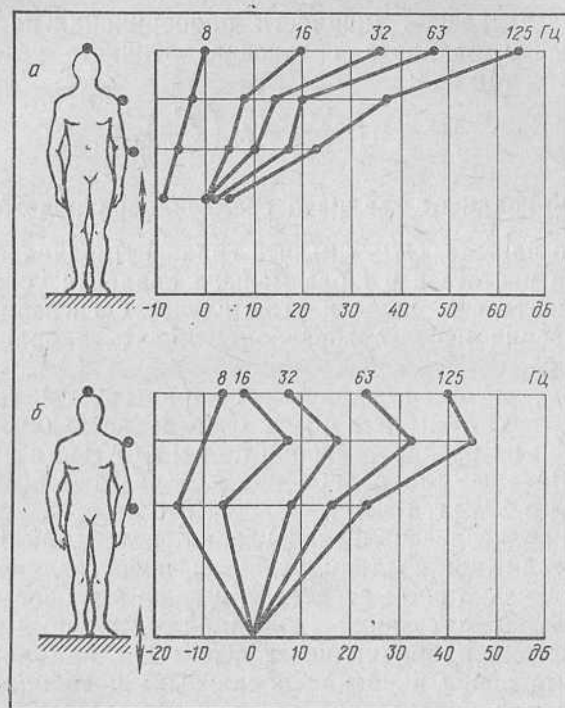
где $\frac{a^2}{2\omega}$ — градиент квадрата среднеквадратичного ускорения по частоте. Отметим, что градиент квадрата ускорения по частоте в 6 f раз меньше квадрата ускорения и, следовательно, даже в этом случае с гигиенической точки зрения нецелесообразно оценивать вибрацию по ускорению.

Из производных механических характеристик тела человека рассмотрим в первую очередь затухание колебаний при их распространении по телу от места возбуждения. Впервые это ослабление для частоты 50 Гц исследовал в 1939 г. Békésy.

Для нас исследование затухания колебаний при их распространении по телу человека представляло интерес в несколько ином аспекте, а именно в сопоставлении особенностей затуханий колебаний различных частот при действии вибрации через стопы ног или ладони с целью уточнения понятий «локальных» и «общих» вибраций и для определения величины рецептивной зоны, охваченной колебательным движением.

Исследования были нами проведены и на 10 практически здоровых мужчинах (по десять опытов на каждом) в диапазоне частот от 8 до 125 Гц и при действии вибраций на стопы и ладони. Источником колебаний служил механический вибростенд ВУС-70/200. Исследуемый либо становился на платформу стенда, либо, находясь вне ее, нажимал сверху вниз на вибрирующую рукоятку, укрепленную к платформе, осуществляя контроль за заданной силой нажима по стрелочному прибору. Распространение вибраций регистрировалось измерительной аппаратурой фирмы «Брюль и Кьер» с 30-граммовым датчиком, прижимаемым рукой испытуемого к костным выступам в фиксированных точках тела. Замеренные уровни колебательной скорости усреднялись с определением среднеквадратичных отклонений, колебавшихся в пределах $\pm 2-5$ дБ.

Средние величины ослабления вибраций в разных точках тела относительно уровня в месте возбуждения



23. Затухание колебаний в структурах тела при действии вибрации.
 а — на ладонь руки; б — на стопы ног; + означает ослабление, — усиление
 относительно зоны контакта.

колебаний приведены на рис. 23. Можно видеть, что независимо от места возбуждения колебания затухают при распространении по телу тем больше, чем выше их частота, причем величины затухания в диапазоне исследованных уровней, как показала проверка, не зависят от уровня интенсивности колебаний в зоне возбуждения. Кроме того, из графика следует, что затухание уменьшается для точек тела, расположенных в области «пучности» колебаний, и колебания усиливаются по всему телу для частот, совпадающих или близких к частотам собственных колебаний тела или его частей.

Можно также заметить, что при низких частотах, до 10 Гц, колебания независимо от места их возбуждения распространяются по телу с весьма малым затуханием,

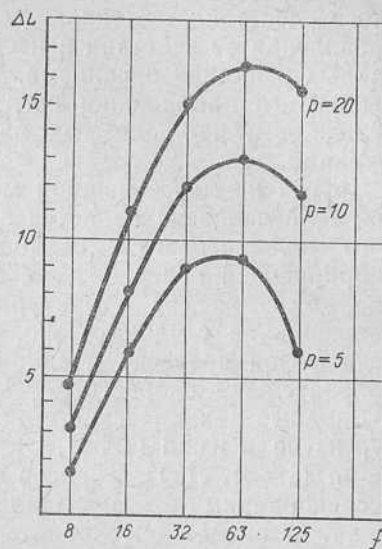
охватывая колебательным движением все туловище, включая голову. Это подтверждает высказанную ранее точку зрения (И. К. Разумов, 1967) о нецелесообразности деления вибраций на «локальные» и «общие», исходя только из места контакта тела с вибрирующей поверхностью, но без учета частотного состава вибраций и их распространения по телу.

Влияние мышечного напряжения на проводимость вибрации тканями руки мы исследовали измеряя интенсивность вибрации в одинаковых точках — на плече испытуемых — в условиях одинакового уровня колебательной скорости в зоне контакта с вибрирующей поверхностью, но при разных силах нажима на рукоятку.

Изменение проводимости при силах нажима 5, 10 и 20 кг оценивалось по отношению к проводимости при силе нажима 1,2 кг, практически соответствующей ненапряженной руке.

Результаты исследования представлены на рис. 24. Можно видеть, что с увеличением мышечного напряжения руки, т. е. жесткости ее тканей, проводимость вибраций возрастает на всех исследуемых частотах колебаний, достигая наибольшей величины для частот 30—60 Гц, соответствующих диапазону частот собственных колебаний руки.

Характер распространения колебаний по телу указывает, что с понижением частоты колебаний и увеличением зоны их распространения, а следовательно, и числа рецепторов, вовлекаемых в колебательный процесс, следует ожидать, во-первых, увеличения области расстройств кожной, в частности болевой, чувствительности, а во-вторых, ослабления специфичности биологиче-



24. Зависимость уровней колебательной скорости на плече от силы нажима (p кг), частоты (f) колебаний.

ского действия «локальных» вибраций и большего проявления ее действия в неспецифических опосредствованных реакциях организма. Кроме того, с увеличением мышечного напряжения следует ожидать большей выраженности наблюдаемых нарушений физиологических функций.

Другой не менее важной механической характеристикой тела человека является абсолютная величина входного механического импеданса в зоне контакта тела с вибрирующей поверхностью, определяющая сопротивление, оказываемое структурами тела колебательному движению, а следовательно, и количество энергии, передаваемой человеку в единицу времени при заданной колебательной скорости.

Входные механические импедансы тела или его структур изучали Kuhn (1953), Dieckmann (1956, 1958), Coergmann (1963), Л. П. Борисов с соавт. (1968) и др. Этим исследованиям предпосылались теоретические соображения о возможном характере зависимости импеданса от физических свойств структур тела либо по данным экспериментальных исследований составлялась вероятная схема механической колебательной системы структур тела и ее электродинамическая аналогия и по ним устанавливалась искомая зависимость. Отмеченная выше сложность и взаимосвязанность физических явлений, возникающих в структурах тела при возбуждении в них колебаний, характеризующихся значительным числом степеней свободы движения сочлененных структур, нелинейностью упруго-вязких свойств тканей при интенсивных колебаниях и рефлекторным влиянием на их изменение со стороны центральной и вегетативной нервной системы, практически исключает возможность надежного теоретического определения частотной характеристики входного импеданса, что свидетельствует о необходимости изучения ее особенностей экспериментально.

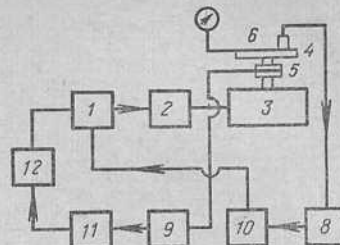
Экспериментальные исследования входного механического импеданса согнутой и выпрямленной руки были проведены нами (Э. И. Денисов) на 12 исследуемых мужчинах, по 3 раза на каждом, в диапазоне синусоидальных колебаний от 8 до 63 Гц, при силах нажима на вибрирующую рукоятку 5—10 и 20 кг. Входной импеданс определялся так называемым прямым методом, при котором на рукоятке создавалась постоянная колебательная скорость и измерялась сила сопротивления

руки. Блок-схема измерительной установки приведена на рис. 25.

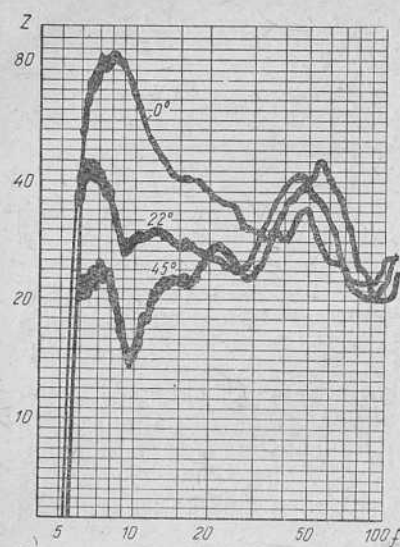
Вибрации рукоятки 4, прикрепленной через датчик силы 5 к электродинамическому вибростенду 3, осуществлялась с помощью задающего генератора 1 через усилитель мощности 2. Сигнал с датчика силы 5 через катодный повторитель 9 и усилитель 11 поступал на самописец уровня 12, а сигнал с датчика скорости 6 через катодный повторитель 8 и усилитель 10 направлялся на вход системы компрессии генератора 1 для поддержания постоянного уровня колебательной скорости. Лимб установки частоты генератора вращался гибким валом от самописца 12.

Таким образом, при соответствующей калибровке на самописце 12 автоматически записывалась частотная характеристика уровня силы сопротивления структур тела при постоянном заданном уровне колебательной скорости, равном 110 дБ. В качестве датчика скорости, измерительных приборов использовалась указанная выше прецизионная аппаратура датской фирмы «Брюль и Кьер». Датчиком же силы служила изготовленная по нашему заданию пьезоэлектрическая ячейка, представляющая собой две точеные и скрепленные друг с другом цилиндрические шайбы с заложенными в них круглыми пьезоэлементами, соединенными внутренним электродом. Практически чувствительность датчика составляла 4—6 мВ на 1 кг силы, а его электрическая емкость вместе с кабелем составляла 1000 пФ.

Частотная характеристика всей измерительной системы была линейна в диапазоне от 3 до 100 Гц с неравномерностью, не превосходящей ± 1 дБ. Электродинамический стенд обеспечивал толкающую силу 100 кг, а механический импеданс его подвижной части составлял $2000 \frac{\text{кг} \cdot \text{с}}{\text{м}}$, т. е. был значительно больше измеряемого импеданса руки.



25. Блок-схема измерения входного механического импеданса руки (обозначения в тексте).



26. Характерная запись зависимости изменения величины модуля входного механического импеданса Z руки от угла сгиба руки φ и частоты f при силе нажима 10 кг.

На рис. 26 приведена характерная запись модуля входного импеданса руки при силе нажима 10 кг и углах сгиба руки в локтевом суставе, равных 0—22,5—45°. Следует заметить, что надежных измерений фазового угла импеданса не удалось провести из-за его неустойчивости и значительных погрешностей серийных фазометров на низких частотах.

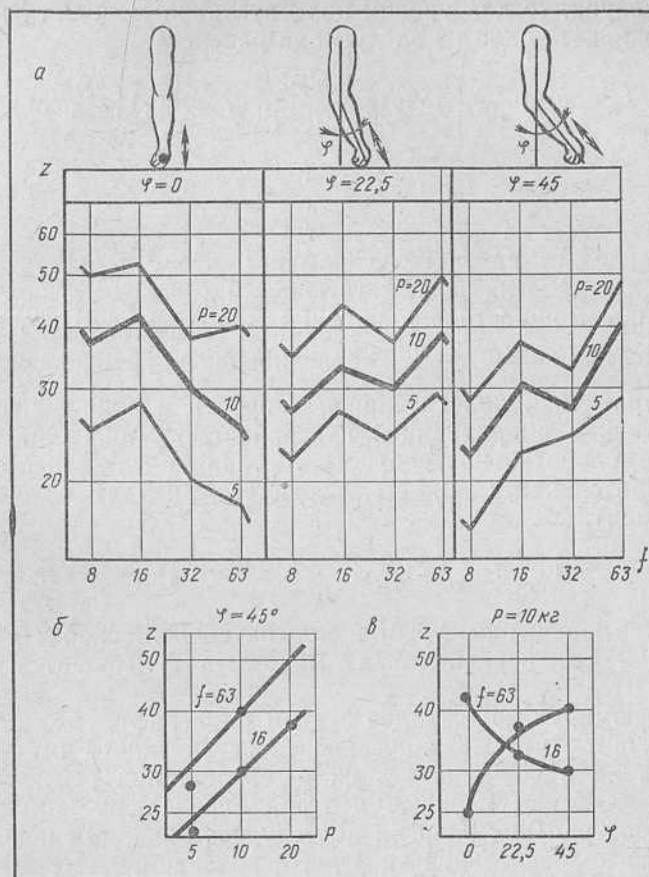
На рис. 27 приведены усредненные по октавам частотные характеристики модуля входного импеданса при разных углах сгиба руки в локтевом суставе и различных силах нажима на рукоятку.

Можно видеть, что для выпрямленной руки при всех силах нажима

механический импеданс уменьшается с возрастанием частоты, в то время, как для руки, согнутой под углом в 45°, он вначале меньше, а затем увеличивается с возрастанием частот.

Можно видеть также, что с каждым удвоением силы нажима входной импеданс увеличивается приблизительно в $\sqrt{2}$ раза. Несущественны также в исследуемом диапазоне изменения импедансов с удвоением угла сгиба и увеличением вдвое частоты вынужденных колебаний. Все это позволяет заключить, что в низко- и среднечастотном диапазоне от 8 до 63 Гц при углах сгиба руки от 20 до 45° и силах нажима от 10 до 20 кг для гигиенической оценки условий труда с точностью до ± 2 дБ можно принимать величину входного механического импеданса руки постоянной и равной

$$Z_{\text{вх}} = 40 \frac{\text{кг} \cdot \text{с}}{\text{м}}.$$



27. Изменение модуля входного механического импеданса Z руки в зависимости от угла сгиба руки φ и частоты f при силе нажима $p = 5, 10$ и 20 кг.

a — зависимость импеданса руки от частоты угла сгиба; $б$ — зависимость импеданса руки от силы нажима для частоты 16 и 36 Гц; $в$ — зависимость импеданса руки от угла сгиба для частот 16 и 63 Гц.

Соответственно этому, если оценивать мощность W воздействующего на руки колебательного процесса ее уровнем L_M в децибелах относительно $10^{-13} \frac{\text{кгм}}{\text{с}} = 10^{-12}$ Вт подобно тому, как это принято для мощности источни-

ков звука, то для уровня колебательной мощности можно записать одно из следующих равенств:

$$L_M = 10 \lg \frac{W}{10^{-13}} = 10 \lg \frac{v_{\text{ск}}^2 \cdot Z_{\text{вх}}}{(5 \cdot 10^{-8})^2 \cdot 40} = 10 \lg \left(\frac{v_{\text{ск}}}{5 \cdot 10^{-8}} \right)^2$$

или

$$L_M = 20 \lg \frac{v_{\text{ск}}}{5 \cdot 10^{-8}} = L_v \text{ дБ.} \quad (3-3-1)$$

Последнее равенство указывает, что с точностью до ± 2 дБ уровень воздействующей на человека колебательной мощности в децибелах мощности (дБ·м), т. е. относительно $10^{-13} \frac{\text{кгм}}{\text{с}}$, численно равен уровню средне-квадратичной колебательной скорости в зоне контакта ладоней с вибрирующей поверхностью. Так, если уровень колебательной скорости составляет $L_M = 130$ дБ, то колебательная мощность, передаваемая телу человека, составит:

$$W = 10^{0,1 L_M - 13} = 10^{0,1 \cdot 130 - 13} = 1 \text{ кгм/с, или } 10 \text{ Вт.}$$

При уменьшении уровня колебательной скорости до $L = 100$ дБ передаваемая мощность уменьшится до 0,01 Вт.

Резюмируя изложенное в этом параграфе, мы можем заключить, что механические свойства тканей и структур тела и возможность их изменения под рефлекторным влиянием нервных центров определяют как зону распространения энергии по телу человека, так и количество колебательной энергии, передаваемой ему в единицу времени.

В частности, повышение мышечного напряжения и уменьшение частоты колебаний, увеличивая число тканевых рецепторов, вовлекаемых в колебательное движение, должно приводить к расширению области расстройств кожной, в частности болевой, чувствительности, сглаживанию специфичности действия «локальных» вибраций, обуславливая проявление их биологического действия в большей мере в неспецифических опосредствованных реакциях организма.

Можно считать, что входной механический импеданс руки, подверженной действию вибраций, в исследованных диапазонах изменяется несущественно с изменением си-

лы нажима, угла сгиба руки и частот колебаний и может быть принят с точностью ± 2 дБ равным $Z_{\text{вх}} = 40 \frac{\text{кг} \cdot \text{с}}{\text{м}}$. При этом уровень колебательной мощности, передаваемой телу через ладони рук, в той же степени точности может быть принят равным уровню колебательной скорости в зоне контакта тела с вибрирующими поверхностями обрабатываемых изделий или рукояток корпусов, или вставных рабочих органов механизированных инструментов. Следует особо оговорить, что мы не считаем возможным оценивать степень вредности вибрационного воздействия общим уровнем колебательной мощности с учетом фактического спектрального состава, определяемой суммой мощностей в каждой октавной полосе по формуле:

$$L_{\text{общ}} = 10 \lg \sum_1^n \frac{v_{\phi}^2 Z_{\phi}}{10^{-13}} \text{ дБ относительно } 10^{-13} \text{ кгм/с},$$

где n — число октавных полос спектра, так как характер и степень выраженности биологического действия вибраций весьма различны в разных диапазонах частот и, кроме того, они зависят от влияния сопутствующих факторов внешней среды. Однако это не исключает возможности оценки, допустимой мощности вибрационного воздействия с помощью общего уровня. В этом случае в приведенной формуле величины v и Z должны приниматься не по фактическим, а по допустимым значениям в полосах частот, устанавливаемым исходя из целей нормирования.

ГЛАВА IV

ОСНОВЫ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ ДЕЙСТВИЯ ВИБРАЦИЙ НА ОРГАНИЗМ ЧЕЛОВЕКА И ЕЕ ПРИМЕНЕНИЯ ДЛЯ ГИГИЕНИЧЕСКОГО НОРМИРОВАНИЯ

Взаимодействие организма человека с изменяющимися условиями внешней среды всегда приводит к перестройке его энергетического и материального баланса, сопровождающейся трансформацией внутренней энергии в организме и изменением происходящих в нем обменных процессов, формирующих в конечном счете ответную реакцию всего организма на действие внешнего раздражителя. При этом первичным для физически воздействующих факторов внешней среды является нарушение энергетического баланса организма, а как следствие этого — нарушение баланса материального.

Вибрация, являясь физически воздействующим фактором, приводит частицы тела в колебательное движение, вызывая изменение их состояния в виде смещения их центров тяжести, деформации и возникновения внутренних напряжений в них, что сопровождается затратой на эти изменения механической энергии, получаемой от источника колебаний в зоне контакта структур тела с вибрирующими поверхностями. Количество получаемой энергии определяется длительностью воздействия вибраций и величиной мгновенной мощности воздействующего колебательного процесса или же площадью контакта и интенсивностью вибраций, поскольку интенсивность колебательного процесса численно равна его мощности, отнесенной к единице площади, перпендикулярной направлению распространения колебаний.

Как было отмечено выше, мгновенная мощность колебательного процесса является его полной качественно-количественной энергетической характеристикой, отражающей скорость воздействия раздражителя и учитывающей совокупное влияние таких независимых друг от друга и определяющих факторов, как входной механи-

ческий импеданс структур тела, отражающий их сопротивление воздействию вибраций; амплитуда смещения, характеризующая при прочих равных условиях величины наблюдаемых изменений физиологических функций; частота колебаний, определяющая специфику этих нарушений.

Колебания частиц тела, возникающие в зоне контакта с вибрирующей поверхностью, не могут существовать в ней изолированно. Вследствие упругих связей между частями тела они волнообразно распространяются по телу, уменьшаясь по интенсивности по мере удаления от места возбуждения и увеличивая зону воздействия вибраций.

Человек воспринимает вибрацию не только специализированными сенсорными системами — вестибулярным аппаратом и экстероцепторами кожных покровов в зоне контакта, но и множеством проприо- и интероцепторов, расположенных в области распространения вибраций по телу. Эти рецепторные группы, реагируя в соответствии с их частотными и временными характеристиками на внешнее энергетическое воздействие, изменяющее их биофизическое и биохимическое состояние, передают информацию о раздражителе в нервные центры, обуславливая рефлекторные реакции других органов и систем на действие вибраций.

Это приводит к выводу о том, что при всех прочих одинаковых условиях единственной причиной наблюдаемых изменений физиологических функций при действии вибраций на человека является механическая энергия колебательного процесса, возникающего в зоне контакта тела с вибрирующими поверхностями и распространяющегося по тканям тела. Но если это так, то, во-первых, изменения функций, наблюдаемые в адекватных сенсорных системах при прочих равных условиях должны быть пропорциональны воздействию колебательной энергии, т. е. мощности колебательного процесса и длительности его действия; во-вторых, должна существовать качественно-количественная или по крайней мере качественная корреляция между характеристикой воздействующей колебательной энергии и направленностью и величинами наблюдаемых изменений физиологических функций других органов и систем.

Эти два основных положения развиваемой нами энергетической теории действия вибраций на организм чело-

века, сформулированные в общем виде, мы конкретизируем несколько позже. Здесь же мы хотели бы обратить внимание на то, что при изучении особенностей воздействия вибраций на другие органы и системы мы можем обнаружить, что изменения их физиологических функций не следуют закону прямой пропорциональности воздействующей энергии, и тогда возникает вопрос, в какой мере принцип энергетического действия вибраций может быть распространен на эти органы и системы?

Ответ на этот вопрос и прост, и сложен. Прост он потому, что если при прочих равных условиях единственной причиной, побуждающей к изменению функциональной деятельности организма в целом, является воздействующая на него колебательная энергия, то все наблюдаемые изменения физиологических функций обуславливаются действием этой энергии и концепция энергетического действия вибраций на человека сохраняется независимо от характера их пропорциональности воздействующей энергии.

Сложность же ответа в том, что при современном уровне наших представлений о взаимосвязи функциональной деятельности отдельных органов и систем мы не знаем существующих качественно-количественных зависимостей между всеми многообразными, сложными и взаимосвязанными процессами, протекающими в организме на том или ином биологическом уровне и формирующими наблюдаемые функциональные изменения. Следовательно, мы не всегда можем предсказать, какие органы и системы, в какой именно пропорциональности и с какой степенью значимости для жизнедеятельности всего организма будут изменять свои функции под влиянием информации сенсорных систем о том или ином раздражителе.

Однако это обстоятельство, оставляя открытым вопрос о степени пропорциональности наблюдаемых нарушений воздействующей колебательной энергии, не дает основания для отрицания принципа энергетического действия вибраций на организм человека, тем более если это подтверждается прямой пропорциональностью между воздействующей колебательной энергией и показателями наблюдаемых изменений функций адекватных сенсорных систем. Именно поэтому при изучении действия на человека «локальных» вибраций основное вни-

мание в наших исследованиях было уделено реакциям адекватной сенсорной системы — изменениям кожной чувствительности к вибрациям.

Конкретизируем теперь основные положения концепции энергетического действия вибраций на человека, исходя только из физических предпосылок — реакций механических колебательных систем на возбуждение в них колебаний, т. е. рассматривая тело человека как такую систему и не касаясь рефлекторных реакций живого организма, поскольку их влияние не может изменять возникающие в структурах тела физические процессы, которые являются определяющими в некоторых преимущественно наблюдаемых изменениях физиологических функций, отражаясь лишь на степени их выраженности, фазах и сроках развития.

Прежде всего, исходя из энергетической концепции действия вибраций, мы должны ожидать четкой пропорциональности между изменениями порогов вибрационной чувствительности и воздействующей колебательной энергией при различных комбинациях компонентов, формирующих эту энергию: амплитуды смещения, частоты колебаний, длительности воздействия, сопротивления колебательному движению и др. Далее, в связи с особенностями распространения колебаний по телу человека мы вправе ожидать большей зоны его охвата колебательным движением при воздействии меньше затухающих низкочастотных вибраций, чем при действии вибраций высокочастотных, больше затухающих при их распространении по тканям тела. Следствием этого должна быть более распространенная зона ослабления болевой чувствительности при действии вибраций низких частот по сравнению с высокочастотными вибрациями, для которых эта зона практически ограничивается кистью руки.

Учитывая, что сопротивление руки возбуждению в ней колебаний, т. е. ее входной механический импеданс на низких частотах, от 10 до 22,5 Гц, в основном определяется жесткостью системы, т. е. мышечным напряжением, мы можем ожидать в качестве отдаленных последствий длительного систематического действия низкочастотных вибраций преимущественно мышечных расстройств, а при импульсном характере вибраций, кроме того, морфологических изменений в костно-суставном аппарате.

При действии высокочастотных вибраций, с частотами более 90 Гц, зона распространения которых практически ограничивается кистью руки, а колебательная мощность создает повышенную плотность энергии в менее сопротивляющихся изгибным колебаниям тканях стенок тонких кровеносных сосудов, мы вправе ожидать преимущественных расстройств в периферической части сосудистой системы. Кроме того, поскольку с возрастанием сопротивления колебательному движению, т. е. входного механического импеданса структур тела, при прочих равных условиях увеличивается количество колебательной энергии, передаваемой структурам тела в зоне контакта, мы можем ожидать в этих случаях большей выраженности изменений исследуемых физиологических функций.

В общем случае, когда вибрации характеризуются широким, почти сплошным спектром частот, вероятны проявления и тех, и иных из указанных выше нарушений, но с разной степенью их выраженности в соответствии с величинами мощности воздействующего колебательного процесса и особенностями его распространения по структурам тела в том или ином диапазоне частот.

Таковы в основных чертах результаты анализа макроявлений, возникающих при возбуждении и распространении вибраций по телу человека. Они говорят о необходимости более углубленного изучения специфики самого фактора и его первичного воздействия для физиолого-гигиенических исследований особенностей биологического действия вибраций и возможности их прогнозирования.

Обосновывая энергетическую теорию воздействия вибраций на человека, мы, естественно, должны были выявить, в какой мере конкретизированные выше основные положения развиваемой нами теории соответствуют наблюдаемым явлениям, в частности выявить, имеет ли место качественно-количественная корреляция наблюдаемых в отдаленные сроки нарушений физиологических функций организма с энергетической характеристикой воздействующего на человека колебательного процесса.

В доступной нам и достаточно обширной зарубежной и отечественной литературе как по вопросам гигиены труда в условиях воздействия вибрационного фактора, так и по физиологии сенсорных систем и механорецепторов мы не нашли интересующих нас сопоставлений.

При проведении физиолого-гигиенической оценки воздействующей на человека производственной вибрации и при изучении рецепторных ответов на вибрационный раздражитель исследователи, как правило, характеризовали колебательный процесс амплитудой смещения или ускорения, не приводя, однако ни технических, ни физиологических обоснований выбора в качестве характерного показателя именно этих кинематических параметров.

Между тем при изучении действия на человека других, аналогичных по своей природе факторов внешней среды, как то: шум, тепло, свет и др. — величины физиологических сдвигов, возникающих в организме, как правило, принято сопоставлять с их энергетическими характеристиками. Именно это несоответствие в оценке действия идентичных факторов послужило отправным пунктом для исследований по проверке энергетического действия вибраций на организм человека. При этом мы должны сразу же оговориться, что в соответствии с основной задачей научного обоснования гигиенического нормирования вибраций эти исследования имели целью выявление главным образом относительных показателей зависимости между направленностью и величинами ответных реакций сенсорной и некоторых других систем организма и качественно-количественной характеристикой воздействующей колебательной энергии, без детального изучения механизмов многообразных и взаимосвязанных внутренних процессов, возникающих в организме, поскольку такие исследования, как правило, являются предметом общей и частной физиологии.

Принятый нами методический прием широко распространен и апробирован многолетней практикой физиолого-гигиенических исследований степени неблагоприятного воздействия на организм человека факторов внешней среды.

Кроме того, в соответствии с установленным фактом особо неблагоприятного воздействия на организм вибраций, воспринимаемых ладонными поверхностями рук как при работе механизированным инструментом (перфораторами клепальными, рубильными и отбойными молотками), так и при обработке изделий на станках для шлифовки и полировки изделий и других операциях, мы проводили наши исследования применительно к этому виду вибрационного воздействия.

Проверка теории¹ энергетического воздействия вибрации требовала прежде всего ответа на три основных вопроса: различаются ли и, если да, то на сколько пороги восприятия человеком синусоидальной и беспорядочной — стохастической вибрации; на изменение какого из физических параметров, характеризующих колебательный процесс, отвечает адекватными изменениями сенсорная система человека, или, иначе говоря, для какого параметра — смещения, скорости или мощности — соблюдается пропорциональность между изменением этого параметра и вызываемым изменением порогов вибрационной чувствительности; сохраняется ли пропорциональность этих изменений воздействующей колебательной энергии при различном сочетании ее компонентов: амплитуды смещения, частоты колебания, входного механического импеданса, длительности воздействия и др.

Рассмотрим эти вопросы в последовательности их постановки.

Пороги восприятия гармонической и стохастической вибраций

Пороги восприятия вибраций определяли многие исследователи (А. А. Вожжова, 1953; Е. Ц. Андреева-Галанина, 1956; В. П. Бабкин и др., 1961; Békésy, 1939; Bugard, 1952; Plumb, Meigs, 1961, и др.). Из этих исследований известно, что в общем случае пороги восприятия существенно различаются для разных индивидуумов, различных участков тела и состояния кожных покровов. Они подвержены суточным колебаниям и изменяются в зависимости от состояния нервных процессов в организме, а также зависят от формы и величины вибрирующей поверхности и направления нанесения раздражения (параллельно или перпендикулярно) на исследуемый участок. Поэтому определение усредненных абсолютных величин порогов не могло представлять для нас особой ценности.

Однако относительное их изменение при воздействии качественно различной вибрации имеет практическое

¹ Экспериментальную проверку отдельных положений теории энергетического действия вибраций при руководстве автора проводили научные сотрудники Института гигиены труда и профессиональных заболеваний АМН СССР: Н. Н. Малинская, Т. Г. Подгорная, Р. З. Позднякова, Г. М. Радзюкевич, Э. И. Денисов, Э. И. Сергеев при участии Н. Н. Курьерова и Н. И. Ковшова.

значение для суждения о степени ее неблагоприятного воздействия.

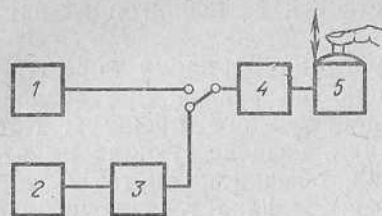
Как правило, пороги ощущения вибрации определялись исследователями на пальцах руки и при воздействии синусоидального колебательного процесса. Как было указано выше, вибрации, воздействующие на человека в натуральных условиях, обычно являются беспорядочными — стохастическими, характеризующимися широким, почти сплошным спектром частот и случайно флюктуирующими во времени амплитудами. Поэтому естественным было ожидать, что пороги ощущения такой вибрации должны быть ниже. Для этого имелись по крайней мере две предпосылки.

Во-первых, в частотной полосе стохастической вибрации, характеризуемой некоторым ее среднеквадратичным уровнем, всегда могут возникать мгновенные амплитуды, в несколько раз превосходящие среднеквадратичные величины. Рецепторы, реагируя на эти мгновенные амплитуды, вынуждают исследователя порогов соответственно уменьшать уровень среднеквадратичных величин воздействующей вибрации.

Во-вторых, частотная характеристика порогов восприятия большинства исследованных рецепторов, как правило, имеет резонансный характер с наибольшей чувствительностью на какой-либо частоте и спадом ее в обе стороны от максимума. Если на рецептор с такой характеристикой воздействует полоса частот с приблизительно равными амплитудами на каждой частоте, то для одной из крайних частот надпороговый сигнал может быть выше, чем для остальных частот. Реагируя на этот сигнал, рецептор опять-таки вынуждает экспериментатора понижать уровень воздействующей вибрации. Можно видеть, что обе эти предпосылки приводят к одинаковому заключению о вероятности понижения порогов восприятия для беспорядочных вибраций.

Высказанное нами предположение получило достоверное подтверждение в проведенных сравнительных исследованиях порогов восприятия вибрации, оцениваемых по колебательной скорости для одинаковых дискретных частот синусоидальной вибрации и среднегеометрических частот беспорядочных вибраций с частотными полосами шириной в одну октаву и в одну треть октавы.

Для определения порогов была собрана установка по блок-схеме рис. 28, состоящая из генератора звуко-



28. Блок-схема установки для измерения порогов.

1 — звуковой генератор; 2 — генератор шума; 3 — фильтры; 4 — аттенюатор; 5 — электродинамический вибратор.

вых частот 1014, генератора шума 1402, набора октавных и $1/3$ -октавных фильтров 1612, комплекта датской фирмы «Брюль и Кьер», аттенюатора от прибора ЗГ-10 и вибратора ГМК-1, генерирующего механические колебания. Всего было проведено три серии экспериментов, в которых пороги виброчувствительности и определяли для октавных

и $1/3$ -октавных полос стабильной стохастической вибрации со среднегеометрическими частотами 16, 32, 63, 125, 250 и 500 Гц, а также для дискретных частот 16, 32, 63, 125, 250 и 500 Гц синусоидальных колебаний.

Под полосой стохастической вибрации следует понимать полосу случайных беспорядочных вибраций, характеризующуюся наличием в пределах данной полосы почти всех частотных составляющих с непрерывно изменяющимися во времени амплитудами на каждой частоте, но стабильным среднеквадратичным уровнем в полосе частот. При этом статистическое распределение амплитуд по частотным составляющим подчиняется закону нормального гауссова распределения случайных величин.

Пороги виброчувствительности определяли на концевой фаланге III пальца правой руки, который соприкасался с наконечником вибратора, расположенным перпендикулярно к поверхности пальца. Вибратор крепили к столу таким образом, чтобы его наконечник находился почти на одном уровне с поверхностью стола. В центре эбонитового наконечника диаметром 8 мм имелось отверстие с резьбой М 3 для крепления пьезодатчика для абсолютной градуировки установки, которая заключалась в измерении амплитуд вибрации наконечника на всех дискретных частотах и полосах стохастической вибрации.

Измерения производили указанной выше прецизионной виброакустической аппаратурой, устанавливая среднеквадратичные значения уровня виброскорости в децибелах относительно $5 \cdot 10^{-6}$ см/с.

В начале каждого опыта исследуемому давали сигнал надпороговой величины, чтобы ознакомить его с ощущением вибрации, затем сигнал уменьшали до исчезновения этого ощущения и снова увеличивали до его появления. Эту процедуру повторяли дважды и пороговую величину определяли как среднее из четырех величин по показаниям калиброванного аттенюатора. Исследуемый сообщал о моменте появления или исчезновения ощущения вибрации. Правильность ответа проверяли контрольным прерыванием сигнала.

Исследование порогов виброчувствительности проводили у 10 молодых здоровых мужчин в возрасте от 19 до 24 лет, прошедших поликлинический осмотр и предварительно инструктированных о цели и особенностях опыта и тренированных в течение 1—2 дней. Для каждого исследуемого пороги определяли в течение 5 дней.

Средние величины порогов виброчувствительности для полос стохастической вибрации и дискретных частот, полученных путем арифметического усреднения результатов для всех 10 исследованных, у каждого из которых проводилось 20 измерений на каждой частоте, представлены в табл. 8, из которой можно видеть, что наименьшие пороговые величины соответствуют частоте 125 Гц, но и эти величины характеризуются значительным разбросом, более выраженным для дискретных частот и увеличивающимся с возрастанием частоты. Последнее может быть объяснено изменением ощущения вибрации более высоких частот, переходящего в ощущение покалывания или жжения.

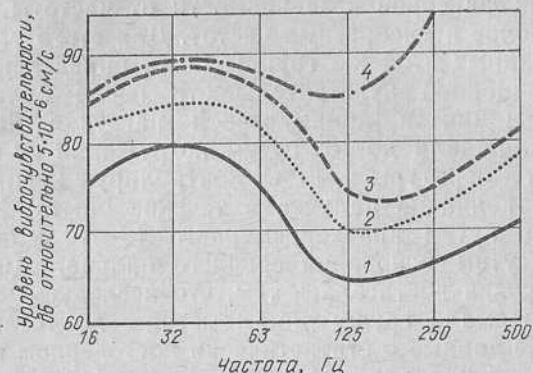
Кроме того, из табл. 8 следует, что пороги виброчувствительности для октавных и $1/3$ -октавных полос стохастической вибрации практически не отличаются друг от друга. Пороги же для дискретных частот синусоидальной вибрации характеризуются более высоким уровнем, чем для октавных полос. В табл. 9 указано различие в порогах виброчувствительности для дискретных частот и октавных полос шириной в $1/3$ октавы и октаву с оценкой достоверности их различия по критерию ρ Стьюдента. Можно видеть, что различие порогов для синусоидальной и октавных полос стохастической вибрации достоверно ($p < 0,01$) для всех исследованных частот с вероятностью более 99%, а разница между порогами в полосах частот шириной в $1/3$ октавы и октаву недостоверна ($p \geq 0,30$) во всем частотном диапазоне.

Таблица 8. Пороги вибрационной чувствительности (в децибелах) по колебательной скорости для полос стохастической вибрации и синусоидальных колебаний

Ширина полосы частот	Частоты (Гц)					
	16	32	63	125	250	500
$1/3$ -октавные полосы	$76 \pm 2,8$	$80 \pm 2,6$	$77 \pm 4,2$	$63 \pm 5,6$	$67 \pm 6,6$	$70 \pm 5,5$
Октавные полосы	$75 \pm 4,3$	$80 \pm 3,2$	$76 \pm 6,2$	$64 \pm 5,4$	$66 \pm 5,5$	$71 \pm 4,6$
Синусоидальные колебания	$82 \pm 3,8$	$84 \pm 3,6$	$83 \pm 3,9$	$70 \pm 5,1$	$73 \pm 6,9$	$79 \pm 8,1$

Таблица 9. Разность порогов вибрационной чувствительности (в децибелах)

Сравниваемые пары	Частоты (Гц)					
	16	32	63	125	250	500
Синусоидальные колебания	7	6	7	6	7	8
Октавные полосы частот	$p < 0,01$	$p < 0,01$	$p < 0,01$	$p < 0,01$	$p < 0,01$	$p < 0,01$
Полосы частот шириной в 1 и $1/3$ октавы	$p > 0,1$	$p > 0,9$	$p > 0,3$	$p > 0,3$	$p > 0,3$	$p > 0,9$



29. Пороги виброчувствительности по колебательной скорости.
 1 — стохастическая вибрация; 2 — синусоидальная вибрация; 3 — синусоидальная вибрация и динамическая нагрузка; 4 — синусоидальная вибрация и охлаждение кисти.

Из табл. 9 можно также заключить, что пороги восприятия стохастических вибраций можно принимать в среднем на 6 дБ, т. е. приблизительно вдвое ниже порогов ощущения синусоидальных вибраций, практически во всем исследуемом диапазоне частот. Это означает, что при равенстве среднеквадратичных уровней синусоидальной и стохастической вибраций следует ожидать более широкой области воздействия на организм беспорядочных вибраций.

Обратим внимание, что отсутствие различия в порогах восприятия стохастических вибраций с шириной полосы в $1/3$ октавы и в одну октаву при одинаковых их полосовых уровнях свидетельствует о том, что для достижения порогов восприятия необходимы одинаковые мощности воздействующего колебательного процесса, а это уже является прямым подтверждением энергетической концепции действия вибраций на человека.

На рис. 29 показан характер изменения по частотам порогов восприятия синусоидальной и стохастической вибраций в наших исследованиях.

Поскольку из литературы (Е. Ц. Андреева-Галанина, 1956) известно, что неблагоприятное воздействие вибрации в производственных условиях усугубляется влиянием сопутствующих факторов, таких, как охлаждение рук, мышечные нагрузки и т. д., представляло интерес исследовать изменение восприятия вибрации под влия-

нием этих факторов в зависимости от частоты для октавных полос и дискретных частот. Для этого у четырех исследованных этой же группы были определены пороги вибрационной чувствительности после охлаждения кисти, ишемии и динамической нагрузки на кисть. Кисть охлаждали до 15° путем погружения ее в ванну с водой температуры $6-8^{\circ}\text{C}$, контролируя кожную температуру кончиков пальцев в течение опыта. Ишемию создавали путем кратковременного (8—10 мин) пережатия жгутом основания среднего пальца. Динамическая нагрузка достигалась тем, что исследуемые многократно сжимали грушу динамометра — до усталости.

Средние данные о статистически достоверном повышении порогов под влиянием этих факторов показаны на рис. 29. Различие в повышении порогов для октавных полос и дискретных частот было недостоверным.

На основании рис. 29 можно заключить, что пороги вибросенситивности изменяются не только под действием вибрации, но и под влиянием охлаждения, ишемии и динамической нагрузки. В производственных условиях, где эти факторы часто воздействуют одновременно, степень изменения порогов под влиянием того или иного фактора трудно дифференцировать. Отсюда следует, что возникающие в производственных условиях, при наличии сопутствующих факторов, временные изменения порогов вибросенситивности не могут быть полностью отнесены только за счет воздействия вибрации.

РЕАКЦИИ СЕНСОРНОЙ СИСТЕМЫ НА ДЕЙСТВИЕ ВИБРАЦИИ

Действие на организм человека того или иного внешнего раздражителя прежде всего проявляется в реакции адекватной сенсорной системы.

Для «локальных» вибраций, воздействующих на ладонные поверхности рук, такой адекватной системой является сенсорная система кожной чувствительности, а ее реакцией, наиболее показательной, легко воспроизводимой и широко используемой в гигиенических исследованиях (А. И. Вожжова, Е. Ц. Андреева-Галанина, З. М. Бутковская и др.), — временное или постоянное, т. е. стойкое, изменение порогов вибрационной чувствительности, относительно которых известно, что они изменяются при изменении интенсивности раздражителя и длительности его воздействия.

Таким образом, по этой реакции мы можем, во-первых, установить, пропорционально какому физическому параметру изменяются физиологические функции сенсорной системы, т. е. проверить развиваемую нами концепцию энергетического действия вибраций, а во-вторых, обосновать выбор физического параметра вибрации, наиболее показательного для ее гигиенической оценки.

Заметим, что выбор физического критерия для гигиенической оценки вибрации представляет не только познавательный интерес, но имеет большое практическое значение для установления единого унифицированного показателя как для сопоставления результатов отдельных научных исследований, так и главным образом для разработки аппаратуры для измерения вибрации в гигиенических целях и ее гигиенического нормирования.

Как мы уже отмечали, вопрос об адекватном физическом критерии для физиолого-гигиенической оценки вибраций не получил освещения ни в литературе по гигиене труда, ни в публикациях по физиологии механорецепторов и, следовательно, мог быть решен только постановкой соответствующего экспериментального исследования с учетом высказанных соображений об энергетическом действии вибраций на человека. Энергия непрерывно воздействующего колебательного процесса, как мы уже знаем, определяется его мощностью и продолжительностью действия, т. е. в общем случае она является функцией четырех независимых переменных: амплитуды смещения, частоты колебаний, сопротивления колебательному движению и длительности воздействия.

Ожидаемый характер зависимости изменения порогов восприятия от указанных выше параметров непрерывно воздействующего колебательного процесса мы можем с достаточной степенью приближенности выявить, исходя из усредненного баланса энергии в процессе виброрецепции.

Действительно, из закона сохранения энергии следует, что количество колебательной энергии, получаемой рецептором извне, т. е. на «входе», за вычетом количества энергии, отдаваемой им при его ответной реакции на раздражитель, т. е. на «выходе» должно равняться изменению в нем плотности энергии, расходуемой при формировании «ответа» на внутренние биофизико-хими-

ческие процессы, обуславливающие повышение порогов восприятия.

Для бесконечно малого промежутка времени баланс энергии с учетом зависимости между интенсивностью колебаний I и плотностью энергии $\xi = \frac{I}{c}$ может быть записан в виде равенства:

$$\left(\frac{I}{c} \beta - \gamma \xi \right) dt = - \frac{1}{\gamma} d \left(\frac{I}{c} \beta - \gamma \xi \right), \quad (4.2.1)$$

где c — скорость распространения волн в среде. В этом равенстве левая часть отражает разность энергии на «входе» и «выходе» за время dt , выраженную через ее плотность ξ в единице объема и интенсивность I воздействующего колебательного процесса, а правая часть — повышение плотности энергии в единице объема за это же время. Из этого равенства найдем, что:

$$dt = - \frac{1}{\gamma} \frac{d \left(\frac{I}{c} \beta - \gamma \xi \right)}{\frac{I}{c} \beta - \gamma \xi}.$$

Интегрируя левую часть последнего уравнения в пределах от 0 до t , а правую — в пределах от ξ_0 до ξ_t , потенцируя результат интегрирования и преобразовывая, получим так называемое уравнение концентрации. Оно указывает на характер зависимости измененного порога восприятия, оцениваемого величиной плотности энергии ξ_t в любой момент времени (считая от начала действия вибрации), от интенсивности I воздействующей вибрации и исходного порога восприятия, соответствующего начальной плотности энергии ξ_0 до воздействия:

$$\xi_t = \frac{I}{c} \frac{\beta}{\gamma} (1 - e^{-\gamma t}) + \xi_0 e^{-\gamma t}. \quad (4.2.2a)$$

Соответственно этому доля плотности энергии, отдаваемая рецептором в афферентную сеть, в том числе затрачиваемая на возбуждение биопотенциалов в нервных центрах, выразится равенством:

$$\xi_t^1 = \left(\frac{I}{c} \frac{\beta}{\gamma} - \xi_0 \right) e^{-\gamma t}, \quad (4.2.2b)$$

где β и γ — экспериментально определяемые коэффициенты, имеющие размерность (c^{-1}), величины которых за-

висят от типа рецепторов, характера колебательного процесса и происходящих в рецепторах биофизических и биохимических процессов, в частности от условий его питания, связанных с общей длительностью систематического повторного воздействия.

Обратим внимание на то, что увеличение плотности энергии в рецепторе, обуславливающее повышение его порога восприятия, следует рассматривать как затраты сообщенной ему механической энергии на изменение происходящих в нем биофизических и биохимических процессов. Следствием этого является понижение его чувствительности и повышение способности к защите нервных центров, выражающееся в уменьшении доли плотности энергии, поступающей в афферентную сеть.

Сопоставляя равенство (4-2-2 а), относящееся к повышению порога, с равенством (4-2-2 б), относящимся к доле плотности энергии, передаваемой в афферентную сеть, можно видеть, что они взаимосвязаны. Когда длительность t воздействия возрастает, плотность энергии в рецепторе и порог восприятия повышаются, а доля энергии, передаваемой в афферентную сеть, уменьшается. Наоборот, если длительность воздействия мала (импульс), плотность энергии в рецепторе и повышение порога восприятия изменяются ничтожно мало, а доля энергии, передаваемой в нервные центры, возрастает.

Для периода воздействия вибраций с уровнем интенсивности I , значительно превышающим исходный порог восприятия ξ_0 , равенство (4-2-2 а) можно упростить, пренебрегая последним членом из-за его малого влияния. Тогда получим:

$$\xi_t = \frac{I}{c} \frac{\beta}{\gamma} (1 - e^{-\gamma t}) \quad \text{или} \quad \frac{\xi_t}{\xi_0} = \frac{I\beta}{c\gamma\xi_0} (1 - e^{-\gamma t}). \quad (4-2-3)$$

Равенство показывает, что под вибрационным воздействием пороги восприятия, характеризуемые плотностью энергии ξ_t , быстро возрастают, стремясь с увеличением длительности воздействия t к некоторой постоянной величине, определяемой сомножителем $\frac{I\beta}{c\gamma\xi_0}$. Этот сомножитель тем больше, чем больше интенсивность вибраций I и чем меньше плотность энергии ξ_0 , соответствующая исходному порогу восприятия, т. е. чем чувствительнее рецептор. Это означает, что при прочих равных условиях *наибольшего изменения порога виброчувстви-*

тельности всегда следует ожидать на частотах наибольшей виброчувствительности. Кроме того, поскольку интенсивность связана с частотой, то при возбуждении колебаний на любой из частот диапазона эффективной виброрецепции следует ожидать повышения порогов на всех других частотах этого диапазона, но с большей выраженностью на тех частотах, для которых отношение интенсивности колебательного процесса к исходной величине восприятия ($\frac{I}{\xi_0}$) максимально.

Факт изменения порогов восприятия на частотах, отличающихся от частоты воздействующего колебательного процесса, был отмечен еще в наблюдениях Е. Ц. Андреевой-Галаниной, но не получил энергетического объяснения.

Заменяя в равенстве 4-2-3 интенсивность ее выражением через колебательную скорость и входной механический импеданс и разлагая член $e^{-\gamma t}$ в степенной ряд, ограниченный двумя его первыми членами, мы получим для не слишком большой разницы в длительностях t' и t'' непрерывного действия вибраций, следующее соотношение измененных порогов восприятия:

$$\frac{\xi_t''}{\xi_t'} = \frac{I''}{I'} \frac{(1 - e^{-\gamma t''})}{(1 - e^{-\gamma t'})} = \frac{v_a^2}{v_i^2} \cdot \frac{Z_a}{Z_i} \cdot \frac{t''}{t'},$$

где

$$\frac{1 - e^{-\gamma t''}}{1 - e^{-\gamma t'}} \approx \frac{t''}{t'} \cdot \frac{1 + \gamma t'}{1 + \gamma t''} \quad \text{и} \quad \frac{1 + \gamma t'}{1 + \gamma t''} \approx 1$$

Равенство показывает, что отношение измененных порогов восприятия пропорционально отношению воздействующих энергий. Заметим, что при не слишком длительном воздействии вибраций, когда рефлекторные реакции организма еще не изменяют обратимости биофизических и биохимических процессов в рецепторе, равенство (4-2-2а) может быть использовано также для оценки характера изменения во времени порогов восприятия после прекращения ее действия, т. е. в течение восстановительного периода. В последнем случае мы должны положить в уравнении (4-2-2а) интенсивность равной нулю, а в качестве начальной плотности энергии ξ_0 принять величину плотности N , соответствующую измененному порогу восприятия в момент прекращения предшествующего действия вибраций.

Соответственно этому уравнение (4-2-2а) может быть переписано в виде

$$\xi_t = Ne^{-\gamma t} \quad \text{или} \quad \frac{\xi_t}{\xi_0} = \frac{N}{\xi_0} e^{-\gamma t}. \quad (4-2-5)$$

Это показывает, что в восстановительном периоде абсолютная ξ_t и относительная величина ξ_t/ξ_0 измененного порога восприятия уменьшается во времени по закону отрицательной экспоненты, достигая исходной величины ξ_0 за время, равное

$$t = \frac{0,23}{\gamma} 10 \lg \frac{N}{\xi_0}, \quad (4-2-6)$$

где $10 \lg \frac{N}{\xi_0}$ — величина смещения порога восприятия в момент прекращения действия вибрации (N) в децибелах относительно его исходной величины (ξ_0).

Следует указать, что рассмотренный усредненный баланс энергии позволяет найти правильные энергетические соотношения для одиночного рецептора и то в условиях постановки достаточно полного и точного эксперимента с выявлением составных частей баланса. В гигиенических исследованиях пороги вибросенситивности характеризуют ответную реакцию не одиночного рецептора, а группы рецепторов, а величины измененных порогов, определяемые по словесному ответу или по двигательной реакции нажима на сигнальную кнопку, отражают при прочих равных условиях влияние энергетических процессов, происходящих не только в рецепторе, но и во всей афферентно-эфферентной цепи, т. е. в периферическом анализаторе и его корковом представительстве, включая процессы иррадиации возбуждения на двигательные центры и осуществление реакции, поэтому баланс энергии в этом случае следует рассматривать как весьма приближенный, характеризующий усредненные соотношения и не позволяющий учесть особенности происходящих рефлекторных реакций и состояние нервных процессов в организме. Однако он все же создает представление о характере качественных и некоторых количественных зависимостей между реакциями сенсорной системы кожной чувствительности и воздействующим колебательным процессом.

Поэтому полученные выше равенства были нами приняты в качестве рабочих формул для экспериментальной

проверки теории энергетического действия вибраций на адекватную сенсорную систему человека. Эту проверку мы проводили в серии лабораторных и производственных исследований.

Влияние частоты и амплитуды колебаний. Задачей нашего исследования в этой области являлась проверка пропорциональности временного изменения порогов вибрационной чувствительности воздействующей колебательной энергии при разном амплитудно-частотном составе колебательного процесса. Для исключения влияния других факторов и получения надежных результатов мы проводили этот эксперимент при одинаковой длительности воздействия, приблизительно равных входных механических импедансах руки и порогах чувствительности и в диапазоне частот эффективной виброрепцепции.

Этим условиям соответствует свободный, продолжающийся не менее 30 мин, контакт ненапряженной руки испытуемого с вибратором, создающим синусоидальные колебания в диапазоне частот не менее 50 Гц и не более 300 Гц.

В постановке этого эксперимента очень важно было последовательное проведение его на двух разных частотах, достаточно близких по характеру субъективного ощущения вибраций и достаточно различных, чтобы получить достоверную разность в ответных реакциях сенсорной системы.

Необходимость такого «двухчастотного» эксперимента обуславливается тем, что изменение величины любого параметра синусоидального колебательного процесса для любой одной частоты ω всегда пропорционально амплитуде смещения A , и, следовательно, экспериментируя с одной какой-либо частотой, мы не получили бы ничего нового, кроме того, что принципиально безразлично, чем характеризовать вибрацию — смещением, скоростью, ускорением или колебательной мощностью, поскольку все эти параметры пропорциональны смещению.

Действительно, в этом случае при одинаковом входном механическом импедансе Z и длительности t воздействия вибрации изменения порогов следуют зависимости:

$$\frac{\xi''}{\xi'} = \frac{A''^2}{A'^2} \quad (4-2-7a)$$

Поэтому для выявления адекватного параметра для измерения и гигиенической оценки вибраций, а одновременно и для проверки принципа энергетического ее воздействия на человека экспериментальные исследования были проведены с последовательным воздействием синусоидальной поступательной вибрации двух разных частот, с одинаковыми и разными амплитудами смещения, подобранными таким образом, чтобы при всех прочих равных условиях в одном случае воздействовала вибрация разной интенсивности, а в другом — одинаковой. В этом случае при одинаковой длительности t воздействия вибраций и приблизительно равных механических импедансах Z руки и порогах восприятия отношение воздействующих энергий равно отношению квадратов амплитуд колебательных скоростей, т. е.

$$\frac{\xi''}{\xi'} = \frac{v''}{v'} \approx \frac{A''\omega''}{A'\omega'} = \frac{E''}{E'}. \quad (4-2-76)$$

Если изменения порогов виброчувствительности действительно пропорциональны изменениям плотности энергии, или, что то же, интенсивности воздействующего колебательного процесса, а их величины измеряются в децибелах относительно исходного уровня, то разность порогов ($a'' - a'$) восприятия после действия вибраций разных частот и амплитуд должна быть равна 20-кратному десятичному логарифму отношения колебательных скоростей:

$$a'' - a' = 10 \lg \frac{\xi''}{\xi'} = 20 \lg \frac{v''}{v'}. \quad (4-2-8)$$

Исследования в количестве 92 были проведены у 10 практически здоровых мужчин в возрасте 20—25 лет. Вибрации подвергалась правая рука исследуемого, которой он свободно, без нажима держал вибрирующую рукоятку, жестко укрепленную на электродинамическом вибростенде СТ-3000 фирмы «Аскания» (ГДР). Пороги вибрационной чувствительности определялись на мякоти концевой фаланги III пальца правой руки с помощью установки, описанной в предыдущем параграфе. Чувствительность измеряли до воздействия вибрации, на 5-й и 30-й минуте ее воздействия, а также после прекращения воздействия, на 5-й, 10-й, 20-й и 30-й минуте восстановительного периода.

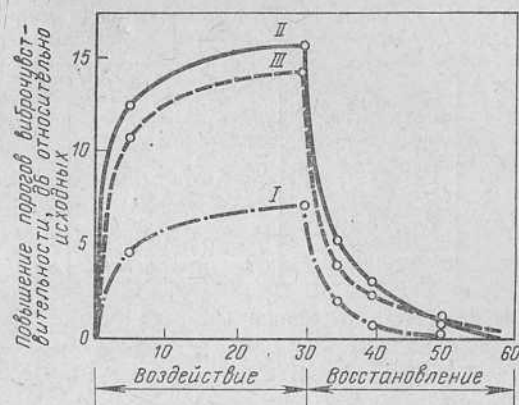
Измерение порогов проводилось на частотах возбуждения колебаний. Было проведено три серии опытов с двумя частотами, 63 и 125 Гц, и двумя амплитудами смещения, 75 и 150 мкм, в таких комбинациях частот и амплитуд, указанных (табл. 10), которые позволяли сравнивать величины порогов при разных частотах и одинаковых амплитудах (серии I и II), равных частотах, но разных амплитудах (серии I и III), т. е. при разных воздействующих энергиях, и при разных частотах и различных амплитудах, но с одинаковой энергией колебательного процесса (серии II и III).

Т а б л и ц а 10. Характеристика вибраций, использованных в экспериментах

Серия	Частота (Гц)	Амплитуды			Отношение энергий	Оценка энергий
		смещения (см)	скорости (см/с)	ускорения (см/с ²)		
I	33	$7,5 \cdot 10^{-3}$	3	12	1:4	Разная
II	125	$7,5 \cdot 10^{-3}$	6	48		
III	63	$15 \cdot 10^{-3}$	6	24	1:1	Равная

Динамика изменения порогов вибросенситивности по усредненным данным, являющимся разностью индивидуальных порогов восприятия до, во время и после воздействия вибраций, представлена на рис. 30.

Можно видеть, что за первые 5—10 мин действия вибрации разность порогов восприятия, как и следовало ожидать согласно равенству (4-2-7), сначала резко, а затем более плавно возрастает до некоторой максимальной величины, зависящей от интенсивности воздействующей вибрации. После прекращения вибрационной нагрузки разность порогов в соответствии с равенством (4-2-5) также сначала быстро, а затем медленнее снижается, стремясь к нулю по мере того, как смещенный порог восприятия приближается к его исходной величине. Разброс индивидуальных показаний в проведенных экспериментах колебался от 1,2 до 5,5 дБ, в среднем около 3 дБ. Достоверность замеренных изменений величин порогов по критерию Стьюдента соответствовала значению $p < 0,01$ до 10-й минуты восстановительного периода. В длительности периода восстановления порогов восприятия наблюдалась некоторая дифференци-



30. Средние изменения порогов виброчувствительности при действии вибрации разных частот и амплитуд (характеристика вибраций серий I—II—III указана в табл. 10).

ция исследуемых по их реактивности, сказывающаяся на продолжительности периода полного восстановления порогов до исходной величины. Так, у большинства исследованных измененные пороги восстанавливались за 30 мин, у некоторых же (около 20% из общего числа) восстановительный период удлинялся до 40 мин и более после прекращения действия вибрации.

Кроме того, на рис. 30 можно видеть, что для II и III серий проведенных нами экспериментов, отличающихся по амплитудам смещения и ускорения в 2 раза, но характеризующихся одинаковыми колебательными скоростями, а следовательно, и равной воздействующей энергией, разности порогов восприятия были практически одинаковыми.

Для I и II серий, в которых амплитуды смещения были одинаковы, квадраты амплитуд ускорения различались в 16 раз, а квадраты колебательных скоростей — в 4 раза. Во столько же раз, в пределах точности эксперимента (2 дБ), отличались и разности порогов восприятия. Достоверность различий изменения порогов виброчувствительности, вызванных воздействием экспериментальных вибраций разной интенсивности, указана в табл. 11. Можно видеть, что в пределах точности эксперимента измеренные разности порогов восприятия хорошо согласуются с теоретическими.

Таблица 11. Разность порогов восприятия (в децибелах)
при 30-минутном воздействии вибраций

Сравниваемые серии	Оценка энергий	Разность порогов	
		измеренная	теоретическая
I и III	Разная	7,4 $p < 0,01$	6
II и III	Равная	1,2 $p > 0,2$	0

Примечание. Характеристики вибраций разных серий указаны в табл. 10.

Таким образом, мы можем считать доказанным, что в условиях разных частот и амплитуд колебаний изменение порогов восприятия при действии вибраций следует закону пропорциональности воздействующей колебательной энергии. Это значит, что адекватным физическим критерием для гигиенической оценки вибрации при прочих равных условиях действительно является колебательная скорость, а не смещение или ускорение колебательного процесса.

Влияние интенсивности колебаний. Рассматривая повышение порогов кожной чувствительности при воздействии вибраций как следствие нарушения баланса энергии в рецепторах, мы не анализировали экстремальных случаев равенства (4-2-2а), когда интенсивность I колебательного процесса близка к пороговой величине ($I = \frac{\xi_{огр}}{\beta}$) или когда она очень велика ($I \rightarrow \infty$).

В первом из этих случаев мы, очевидно, не должны ожидать повышения порогов восприятия над исходными, которые для дискретных частот 16 и 63 Гц равны 83 дБ, а для частот 125—250 Гц — приблизительно 70 дБ. Во втором случае, вероятно, должен существовать какой-то предел повышения порогов, обусловливаемый свойствами рецептора. Представляло интерес проверить эти положения и выявить как характер изменения порогов виброчувствительности при изменении уровней колебательной энергии, так и предел их прямой пропорциональности количеству воздействующей энергии.

Это исследование было нами проведено на 12 здоровых мужчинах в возрасте 20—25 лет (по 9 опытов на

каждом) при 15-минутном воздействии синусоидальной вибрации с частотами 16, 63, 125, 250 Гц и различными уровнями колебательной скорости, изменяющимися от 90 до 129 дБ.

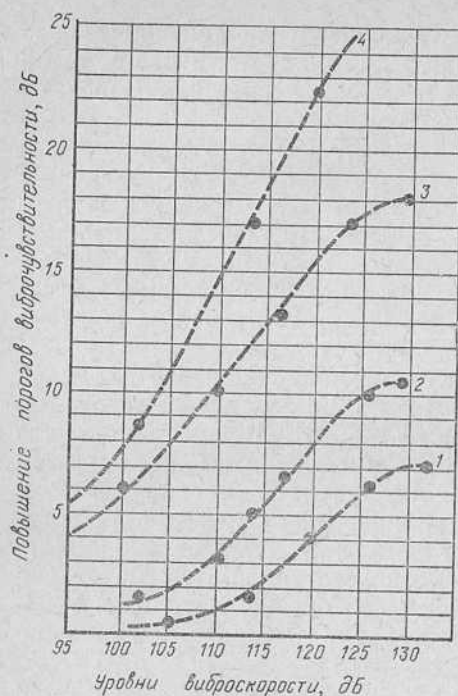
Вибрация создавалась на рукоятке, укрепленной к электродинамическому стенду типа EMV-100A фирмы «Электроникс» (Англия), за которую исследуемые держались ненапряженной рукой. Пороги вибрационной чувствительности определялись по-прежнему на концевой фаланге III пальца правой руки с помощью установки, описанной выше. Замеренные величины повышения порогов относительно их исходных величин усреднялись с определением среднеквадратичных отклонений и критерия достоверности по Стьюденту. Результаты исследования приведены на рис. 31. Можно видеть, что характер изменения порогов восприятия описывается S-образной кривой с прямолинейной средней частью, указывающей на прямую пропорциональность (в логарифмическом масштабе) изменения порогов вибрационной чувствительности воздействующей колебательной энергии. В пределах этой части обычно находятся уровни колебательных скоростей современного механизированного инструмента.

Левее прямолинейной части S-образной кривой пороги восприятия изменяются нелинейно, стремясь к исходной величине при уменьшении колебательной скорости до пороговой величины.

Правее прямолинейной части кривой пороги восприятия повышаются также нелинейно до некоторой предельной величины, зависящей от частотной характеристики и свойств рецептора.

Таким образом, в практических случаях воздействия вибраций механизированного инструмента мы можем считать, что изменения порогов восприятия в децибелах следуют закону прямой пропорциональности колебательной энергии.

Влияние длительности воздействия. Это исследование ставило целью проверить пропорциональность временных и стойких изменений порогов вибросенситивности воздействующей колебательной энергии в условиях разной длительности вибрации, но при постоянном уровне интенсивности, т. е. одинаковых амплитудах смещения и частотах колебаний и величинах входного механического импеданса.



31. Характер повышения порогов восприятия при постоянной длительности воздействия вибраций с различными уровнями колебательных скоростей.

1 — частота 16 Гц; 2 — частота 63 Гц; 3 — частота 125 Гц; 4 — частота 250 Гц.

Временные изменения порогов виброчувствительности исследовались в экспериментальных условиях на 8 практически здоровых мужчинах в возрасте 20—25 лет, предварительно инструктированных о поведении и тренированных к ощущению вибрации.

Вибрация с частотой 63 Гц, уровнем колебательной скорости 120 дБ и переменной длительностью воздействия 30—15—7½ мин создавалась на рукоятке электродинамического стенда типа EMV-100A фирмы «Электроникс» (Англия) через задающий генератор звуковых частот (ЗГ-12) и электронный усилитель. Контроль среднеквадратичного уровня осуществлялся указанным в первом параграфе комплектом прецизионной виброакустической аппаратуры. Пороги виброчувствительности определялись с помощью устройства, описанного выше, на концевой фаланге III пальца правой руки через 10 с после прекращения действия вибраций. Измерение порогов проводилось как на частоте воздействующей

щего колебательного процесса (63 Гц), так и на частоте 250 Гц, т. е. в диапазоне большей виброчувствительности.

Результаты исследования, проведенного нами по замерам порогов восприятия ΔL , оцениваемых в децибелах относительно их исходных величин, и определению их среднеквадратичных отклонений σ и критерия p достоверности изменений по Стьюденту, приведены в табл. 12.

Таблица 12. Величины смещений порогов ΔL виброчувствительности при разной длительности воздействия вибраций одинаковой интенсивности

Длительность воздействия (мин)	Частота (Гц)		Разность порогов	
	63	250	теоретическая	измеренная
7,5	$6,3 \pm 0,9$ $p < 0,01$	$8,3 \pm 1,04$ $p < 0,01$	3	$2,4 \div 2,5$
15	$8,7 \pm 1,09$ $p < 0,01$	$10,8 \pm 1,4$ $p < 0,01$	3	$2,1 \div 3,5$
30	$10,8 \pm 0,76$ $p < 0,01$	$14,3 \pm 1,07$ $p < 0,01$		

Можно видеть, что при уменьшении длительности воздействия с 30 до 15 мин, т. е. в 2 раза (на 3 дБ), разность замеренных порогов составляла 2,1—3,5 дБ, а при уменьшении длительности с 30 до 7 мин, т. е. в 4 раза (на 6 дБ), разность измеренных порогов составляла 4,5—6 дБ. Иначе говоря, при одинаковой интенсивности колебательного процесса в соответствии с равенством (4-2-4) пороги виброчувствительности в пределах точности эксперимента изменялись пропорционально длительности воздействия вибраций.

Таким образом, мы можем считать доказанным, что в условиях одинаковой интенсивности колебательного процесса, но разной длительности воздействия изменения порогов восприятия следуют закону пропорциональности воздействующей колебательной энергии. Результаты этого исследования, помимо познавательной, представляют практическую ценность, так как указывают метод определения режима труда, т. е. допустимой длительности контакта с вибрирующими поверхностями в тех случаях, когда вибрации, воздействующие на ладон-

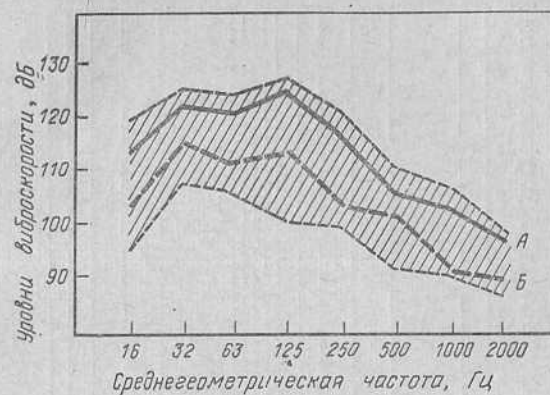
ные поверхности рук, превышают предельно допустимые уровни колебательной скорости и не могут быть уменьшены доступными техническими средствами. Кроме того, из сопоставления величин изменения порогов виброчувствительности на частотах 63 и 250 Гц можно видеть, что проведенное исследование подтвердило высказанные выше, на основе анализа баланса энергии, теоретические соображения о том, что при воздействии колебательного процесса с любой частотой в диапазоне эффективной виброрецепции более выраженные изменения порогов восприятия при прочих равных условиях наблюдаются на частотах с большей чувствительностью к вибрации.

Практически это означает, что для получения более надежных данных при гигиенической оценке неблагоприятного действия вибраций измерения измененных порогов восприятия при действии вибрации всегда следует проводить на частотах максимальной виброчувствительности, т. е. 125—250 Гц.

Длительное систематическое действие интенсивных раздражителей, как известно, приводит к стойким нарушениям физиологических функций, выражающимся для адекватных сенсорных систем в устойчивом повышении их порогов восприятия, оцениваемом профпатологами как развитие патологического состояния, обусловленного действием раздражителя.

Коль скоро изменения порогов при кратковременном действии вибрации показали их пропорциональность длительности воздействия, естественным было предположить, что стойкие или, как их называют, постоянные изменения порогов вибрационной чувствительности, возникающие у стажированных рабочих, подвергающихся систематическому повторному длительному действию прерывистых стохастических производственных вибраций, должны быть пропорциональны при прочих приблизительно равных условиях стажу работы в данной профессии.

Кроме того, как следствие из равенства (4-2-3), указывающего на обратную пропорциональность изменения порогов их исходным величинам, можно было ожидать тем меньшего временного изменения порогов восприятия в динамике рабочего дня, чем больше был исходный стойко измененный порог у стажированного рабочего.

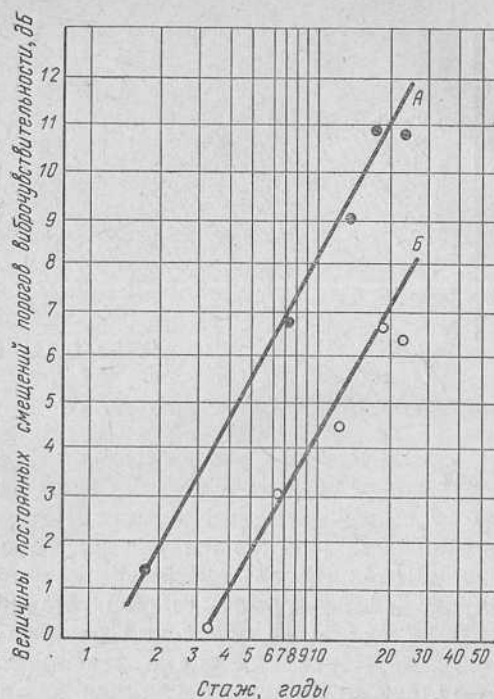


32. Средние спектры вибрации.
А — воздействующие на точильщиков; Б — на полировщиков.

Для проверки этих гипотез были проведены исследования постоянных порогов вибросенситивности на большей группе (247 человек) рабочих шлифовально-заточных и полировальных отделений двух заводов медикоинструментального производства, где в течение последних 15 лет отмечалась стабильность кадров и не менялся технологический процесс.

Спектры воздействующих вибраций при работе на заточных и полировальных станках в зоне контакта рук с вибрирующим обрабатываемым изделием измерялись в уровнях колебательной скорости указанным выше комплектом прецизионной виброакустической аппаратуры. Спектрограммы уровня колебательной скорости, усредненные по 20—30 замерам, проведенным в разное время для разных изделий, приведены на рис. 32 с отмеченными величинами среднеквадратичных отклонений. Можно видеть, что усредненные спектры вибраций, воздействующих на точильщиков и полировальщиков, близки по форме, но несколько отличаются по уровням. Их максимумы находятся в диапазоне частот от 32 до 125 Гц, а среднеквадратичные отклонения колеблются в пределах от 3 до 12 дБ.

Для определения порогов восприятия и их изменений в динамике рабочего дня рабочие обеих профессий — точильщики и полировальщики — в соответствии со сроком их работы были разделены на четыре стажевые



33. Средние изменения стойких порогов виброчувствительности в зависимости от стажа работы в условиях воздействия производственных вибраций.
 А — у точильщиков; Б — у полировщиков (средние спектры виброскорости воздействующих вибраций приведены на рис. 33).

группы: от 1 до 4 лет при среднем стаже по группе 1¹/₂ года, от 4 до 9 лет при среднем стаже 6 лет, от 10 до 14 лет при среднем стаже 12 лет и высокостажированная группа со стажем более 15 лет, а в среднем 17 лет.

Чтобы исключить влияние возраста, стойкие изменения порогов виброчувствительности точильщиков и полировальщиков определяли по отношению к порогам у рабочих приблизительно таких же возрастных групп, не подвергавшихся воздействию вибрации в процессе их трудовой деятельности. Временные изменения порогов виброчувствительности измерялись в одно и то же время после конца рабочего дня и оценивались по отношению к их величинам, измеряемым до начала работы.



34. Взаимосвязь средних временных в динамике дня и средних постоянных в динамике лет изменения порогов виброчувствительности при воздействии производственных вибраций.
А — у точильщиков; Б — у полировщиков.

Определение порогов восприятия проводилось одним и тем же электронным паллестезиометром с фиксированными частотами. Все пороги измерялись на концевой фаланге III пальца правой руки на частоте 100 Гц, т. е. в диапазоне наибольшей чувствительности. Замеренные величины усреднялись по каждой стажевой группе с определением среднеквадратичных отклонений и критерия достоверности по Стьюденту.

Результаты исследования порогов восприятия и их изменений представлены на рис. 33 и 34. Из рис. 33 следует, что величины стойких изменений порогов вибрационной чувствительности в децибелах относительно порогов контрольных групп пропорциональны логарифму стажа рабочих в данной профессии, т. е. пропорциональны воздействию энергии колебательного процесса и длительности воздействия, что подтверждает концепцию энергетического действия вибрации по наблюдениям в отдаленные периоды.

На рис. 34 можно видеть, что чем больше по абсолютной величине стойкие пороги виброчувствительности, тем меньше их временные изменения в динамике рабочего дня, что подтверждает высказанные выше теоретические соображения о взаимозависимости между изменениями стойких и временных порогов восприятия.

Проведенное исследование представляет не только познавательную, но и практическую ценность, позволяя прогнозировать с достаточной степенью вероятности ожидаемые показатели отдаленных последствий нару-

шения физиологических функций адекватной сенсорной системы, исходя из наблюдаемых временных изменений порогов виброчувствительности для аналогичных условий вибрационного воздействия. В этом аспекте полученные нами выводы согласуются с выводами по изменению показателей остроты слуха у стажированных рабочих, подвергающихся длительному систематическому воздействию интенсивных шумов.

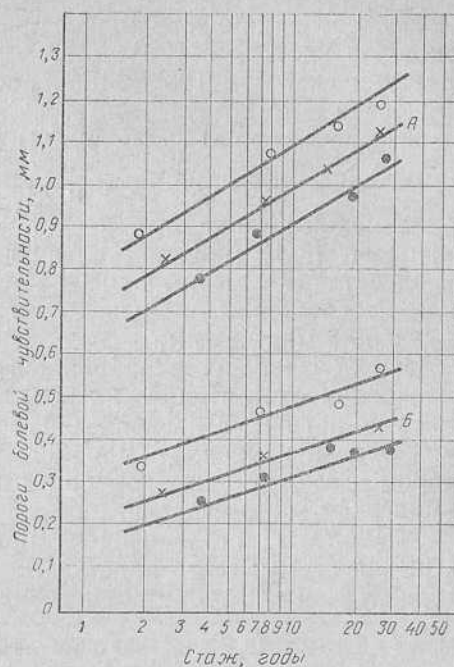
Кроме того, из взаимосвязи временных и стойких изменений порогов виброчувствительности следует, что у рабочих с большим стажем временные изменения порогов виброчувствительности в динамике дня не могут служить показателем неблагоприятного действия вибраций в силу их сниженной величины за счет повышенных исходных порогов.

Параллельно с исследованием изменений порогов вибрационной чувствительности было проведено исследование изменения постоянных порогов болевой чувствительности у тех же стажерских групп точильщиков и полировщиков. Пороги болевой чувствительности определялись также на концевой фаланге III пальца правой руки, измерялись альгезиметром Мочутковского и оценивались в миллиметрах погружения иглы альгезиметра в кожный покров до вызова болевого ощущения. Усредненные результаты исследования приведены на рис. 35. Можно видеть, что стойкие изменения постоянных порогов болевой чувствительности, возникающие в результате систематического длительного воздействия производственных вибраций, также следуют, но в замедленном темпе, логарифму стажа, т. е. пропорциональности воздействующей колебательной энергии, что еще раз подтверждает энергетическую концепцию действия вибраций на организм человека.

Влияние входного механического импеданса. В этом исследовании мы имели в виду выявить зависимость изменения порогов вибрационной чувствительности от мышечного напряжения, изменяющегося с силой нажима, и соответствующего ему входного механического импеданса в зоне контакта с вибрирующей поверхностью. Для исключения влияния других факторов мы проводили этот эксперимент в условиях одинаковой длительности воздействия и колебательной скорости, но при разных силах нажима и соответствующих им механических импедансах.

35. Средние изменения порогов болевой чувствительности со стажем работы в условиях воздействия производственных вибраций.

А—у точильщиков; Б—у полировщиков.



Исследование было проведено на четырех практически здоровых мужчинах в возрасте 20—25 лет. Всего было сделано 64 эксперимента. Исследуемые предварительно инструктировались о цели эксперимента и поведении и тренировались на ощущение вибрации. Вибрации подвергалась правая рука исследуемого, которой он в выпрямленном положении нажимал вертикально вниз на рукоятку электродинамического вибростенда типа EMV-100A фирмы «Электроникс» (Англия). Рукоятка, неподвижно укрепленная к платформе стенда, была выполнена по нашему заданию и предусматривала возможность измерения как силы ее обхвата (сжима), так и силы нажима на нее с помощью калиброванных тензодатчиков, вмонтированных внутри соответственно на боковых и верхней подвижных планках. Показания силы нажима и силы сжима регистрировались потенциометрами, позволявшими исследуемому осуществлять в течение опыта визуальный контроль за соблюдением задаваемых ему величин сил.

Исследования проводились при воздействии синусоидальной вибрации с частотой 20 Гц, уровнем колебательной скорости 126 дБ при постоянной силе обхвата рукоятки 3 кг и двух разных силах нажима — 5 и 20 кг и соответствующих величинах входного механического импеданса — 22,5 и $48 \frac{\text{кг} \cdot \text{с}}{\text{м}}$. Вследствие постоянства силы нажима 20 кг длительность исследования была сокращена до 7 мин при следующем режиме силового воздействия — 3 мин нажима, 1 мин перерыва в нажиме без прекращения вибрационного воздействия и последующие 3 мин нажима.

Изменения порогов вибрационной чувствительности в децибелах относительно их исходного уровня определялись по-прежнему на концевой фаланге III пальца правой руки и измерялись с помощью установки с генератором механических колебаний, описанной в первом параграфе этого раздела.

Результаты исследования приведены в табл. 13. Прежде всего можно видеть, что входной импеданс изменяется не линейно при изменении силы нажима,

Таблица 13. Изменение порогов вибросенситивности (в децибелах) при разных величинах входных механических импедансов и одинаковой длительности воздействия и уровня виброскорости

Сила нажима (кг)	Входной механический импеданс (кг·с/м)	Изменение порогов	Разность порогов	
			теоретическая	измеренная
5	22,5	$3,8 \pm 1,03$ $p < 0,02$	3	1,8
20	48	$5,6 \pm 1,21$ $p < 0,01$		

а приблизительно по закону корня квадратного из соотношения этих сил. Кроме того, из таблицы следует, что временные изменения порогов вибрационной чувствительности при одном и том же уровне колебательной скорости и длительности воздействия следуют в пределах точности эксперимента закону пропорциональности изменения входного механического импеданса, т. е.

пропорционально воздействующей колебательной энергии, подтверждая и в этом случае энергетическое воздействие вибрации на сенсорную систему. Поскольку при работе механизированным инструментом рука человека подвергается действию вибрации в условиях одновременного мышечного напряжения, т. е. статического усилия, представляло интерес оценить влияние на изменение порогов восприятия каждого из этих факторов в отдельности и при их совместном действии.

Это исследование было проведено на тех же четырех лицах в условиях 10-минутного опыта при силе охвата 3 кг, силе нажима на рукоятку 1 кг и воздействии вибрации с частотой 125 Гц и уровнем колебательной скорости 117 дБ.

Исследование осуществлялось в последовательности, предусматривающей раздельное определение порогов восприятия при действии только силы нажима, только вибрации и их совместном действии. При этом каждый последующий опыт проводился только после полного восстановления до исходной величины порогов восприятия, обусловленных предыдущим опытом.

Проведенное исследование показало следующее. Усредненное по четырем исследуемым временное изменение порогов восприятия при действии только силы нажима в 1 кг составило 2,5 дБ с критерием достоверности $p < 0,01$. При воздействии только вибраций с уровнем 117 дБ оно определилось в 10 дБ с той же оценкой достоверности.

Совместное же действие силы нажима в 1 кг, синусоидальной вибрации с частотой 125 Гц и уровнем виброскорости 117 дБ обусловило повышение порога восприятия до 13 дБ с критерием достоверности по Стьюденту $p < 0,01$.

Таким образом, временное изменение порогов виброчувствительности при одновременном действии силы нажима и вибрации практически выражалось суммой повышения порогов восприятия, вызванных раздельным действием двух этих факторов. Это еще раз подтвердило, что наблюдаемое в отдаленных последствиях действия вибраций повышение порогов виброчувствительности не может быть отнесено только за счет вибрации.

Влияние формы амплитудно-временной характеристики колебательного процесса. В проведенных выше иссле-

дованиях была показана пропорциональность между нарушениями физиологических функций сенсорной системы и воздействующей колебательной энергией при постоянной синусоидальной форме амплитудно-временной характеристики колебательного процесса.

При воздействии производственных вибраций амплитудно-временная характеристика мощности колебательного процесса может иметь различные формы. Поскольку механорецепторы кожных покровов реагируют на скорость нарастания воздействующего раздражителя, постольку представляло интерес выявить влияние формы на изменение порогов вибросенситивности.

Этот эксперимент целесообразно было провести в условиях одинаковой длительности воздействия, приблизительно равных входных механических импеданцев и возбуждении периодического колебательного процесса с равной энергией за период повторения формы колебания, но с зеркально отраженными формами амплитудно-временной характеристики колебательной скорости.

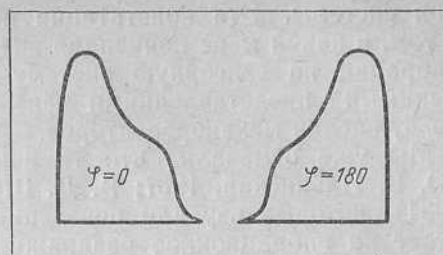
В качестве такой вибрации был принят сложный колебательный процесс, образуемый наложением двух синусоидальных колебаний с соотношением частот 1:2, соотношением амплитуд смещений 2:1 и разными начальными фазами — 0° и 180° . Соответствующие формы амплитудно-временной характеристики колебательной скорости показаны на рис. 36.

Вибрация создавалась электродинамическим стендом типа 8/600 А «Гудманс» от задающего генератора сложных напряжений ГСН-1 отдельно регулируемые амплитудами и фазами составляющих колебаний.

Амплитудные и среднеквадратичные уровни колебательной скорости для колебательных процессов с разными начальными фазами 0° и 180° были одинаковы и составляли соответственно 127 и 123 дБ, а частоты составляющих синусоидальных колебаний были приняты равными 31,5 и 63 Гц. Соотношение средних мощностей до первого их максимума составляло 3,8 или 5,8 дБ.

Исследования проводились у 10 здоровых мужчин в возрасте 20—25 лет, удерживающих рукоятку вибростенда ненапряженной правой рукой. Пороги вибросенситивности определялись на концевой фаланге III пальца этой руки и измерялись с помощью описанной выше установки.

36. Формы амплитудно-временной характеристики колебательной скорости.



Результаты этого исследования, касающиеся восьми исследуемых из десяти, приведены в виде усредненных порогов восприятия их среднеквадратичных уклонов σ и критерия достоверности p в табл. 14. Заметим, что у двух исследуемых не было реакции изменения порогов восприятия при воздействии колебательных процессов с разными начальными фазами. Из таблицы следует, что смещения порогов виброчувствительности в случае колебательного процесса с нулевой начальной фазой слагаемых колебаний на 5,6—5,7 дБ больше, чем для процесса с разностью начальных фаз 180° , что может быть объяснено различием характера изменения во времени мгновенных мощностей колебательных процессов, показанной для аналогичного случая ранее, во II главе.

Резюмируя изложенное в этом параграфе, мы можем считать доказанным энергетическое действие вибраций на адекватную сенсорную систему, а следовательно, и на организм человека в целом, коль скоро рефлекторно возникающие нарушения физиологических функций других органов и систем в конечном счете определяются реакцией на воздействие раздражителя различных рецепторных групп как сенсорной, так и интерорецептив-

Таблица 14. Изменения порогов виброчувствительности (в децибелах) при разных фазах слагаемых колебаний

Начальная фаза (град)	Частота (Гц)	
	31,5	63
0	$11 \pm 2,1$ $p < 0,01$	$10,9 \pm 2,2$ $p < 0,01$
180	$5,4 \pm 2,8$ $p < 0,01$	$5,2 \pm 1,9$ $p < 0,01$

ной системы. Эта констатация не исключает вопроса о том, в какой мере концепция энергетического действия вибрации на сенсорную систему согласуется с современными представлениями физиологов о механизме возбуждения механорецепторов.

Мы уже отмечали, что те немногие исследователи (О. Б. Ильинский, 1967; В. Д. Шубчинский, 1967; Sato 1961), которые изучали поведение механорецепторов в ответ на вибрационное раздражение, всегда связывали эти ответные реакции с величинами амплитуд смещения воздействующего колебательного процесса, не приводя, однако, никаких обоснований выбора в качестве физического критерия именно этого параметра колебательного движения. И только в 1970 г. (после наших публикаций) в весьма интересной статье В. Н. Черниговского с соавторами (1970) мы встречаемся с иной точкой зрения: «...можно полагать, что критерием¹ раздражения телец Пачини является действующая на них сила, а не амплитуда смещения. В таком случае механорецепторы целесообразно рассматривать как динамический преобразователь энергии». Но коль скоро авторы указывают на силу «действующую», т. е. совершающую работу и, следовательно, связанную с затратой энергии, а изменение состояния любой материи не может быть вызвано без воздействующей извне энергии, то можно думать, что указание на «силу» как причину возбуждения рецепторов, а не на «работу силы», т. е. энергию, является скорее неточностью формулировки авторов, чем принципиальной позицией. Это подтверждается смыслом второго цитируемого абзаца о рецепторе как о «динамическом преобразователе энергии».

Таким образом, мы приходим к заключению, что развиваемая нами теория энергетического действия вибраций на организм человека в принципе отвечает современным представлениям физиологии о возбуждении механорецепторов.

ДЕЙСТВИЕ ВИБРАЦИИ НА ДРУГИЕ ОРГАНЫ И СИСТЕМЫ

Выше мы рассмотрели реакцию сенсорной системы кожной чувствительности на действие вибрации и показали, что существует пропорциональность между энер-

¹ Здесь и далее курсив наш (И. Р.).

гией воздействующего колебательного процесса и наблюдаемыми временными и стойкими нарушениями физиологических функций этой системы.

В этом параграфе мы рассмотрим качественную корреляцию между энергетической характеристикой воздействующих вибраций и преимущественно наблюдаемыми в отдаленный период характерными нарушениями функций других органов и систем. Напомним, что в соответствии с проведенным анализом возбуждения и распространения колебаний по телу человека, рассматриваемому как механическая колебательная система, мы при прочих равных условиях ожидали получить: во-первых, преимущественно мышечные расстройства и большую область распространения расстройств болевой чувствительности при длительном систематическом воздействии вибраций с преобладающей интенсивностью в диапазоне низких частот, от 10 до 22 Гц; во-вторых, больший процент расстройств периферической сосудистой системы и ограниченную зону расстройств болевой чувствительности при воздействии вибраций с преобладающей надпороговой интенсивностью в высокочастотном диапазоне, свыше 90 Гц.

В области средних частот, 22—90 Гц, мы считали возможным проявления тех и других из указанных выше функциональных изменений в зависимости от величины преобладающей надпороговой интенсивности воздействующих вибраций. Выявление такой корреляции представлялось возможным на основе сопоставления, с одной стороны, данных обработки замеренных спектров вибрации механизированного инструмента, используемого рабочими разных профессий, и продолжительности непосредственного контакта с их вибрирующими поверхностями за рабочую смену, с другой стороны, результатов обработки данных клинического обследования стажированных рабочих этих же профессий с выраженными формами вибрационной патологии.

В качестве характерных профессиональных групп нами были выбраны формовщики, бурильщики, обрубщики, клепальщики, шлифовщики, рихтовщики-станочники и лесопильщики. Рабочие этих профессий использовали в своей работе наиболее распространенные виды пневматического и электрического механизированного инструмента ударного и вращательного действия, как-то: трамбовки, перфораторы, рубильно-чеканные и клепаль-

ные молотки, ручные шлифовальные машины, бензиномоторные пилы, а также станочное оборудование — станки динамического наклепа.

Усредненные спектрограммы вибраций этих инструментов и оборудования были нами получены на основе обработки замеренных в зоне контакта с телом человека октавных уровней колебательных скоростей в количестве от 10 до 20 спектров по каждому виду инструмента. Замеры проводились одним и тем же комплектом портативной прецизионной виброакустической аппаратуры.

Средняя продолжительность контакта рабочего с вибрирующими поверхностями механизированного инструмента — рукоятками корпусов, вставными рабочими органами или обрабатываемыми изделиями — определялась хронометрированием за рабочую смену режима труда и отдыха на ряде предприятий горнорудной, лесной и машиностроительной промышленности.

Материалами по симптоматике вибрационной болезни, диагностируемой у отдельных профессиональных групп, послужили данные обследования более 1100 человек, проведенного профпатологами клиники Института гигиены труда и профзаболеваний АМН СССР Э. А. Дрогичиной, Н. Б. Метлиной, А. Б. Чемным и др.

Анализ спектрограмм усредненных уровней колебательных скоростей для различных видов механизированного инструмента в сопоставлении с их числом оборотов или ударов и с порогом восприятия вибраций ладонными поверхностями рук показал следующее.

Спектральный состав воздействующих вибраций характеризуется широким диапазоном частот от 10 до 1100 Гц, различаясь для отдельных видов инструментов величинами превышения октавных уровней колебательной скорости над уровнями порогов восприятия. Кроме того, спектры вибраций разных инструментов, характеризующихся одинаковым числом оборотов или ударов, могут более или менее существенно различаться. Обработка хронометражных данных по режиму труда и отдыха показала, что суммарная длительность контакта рабочего с вибрирующими поверхностями колеблется в зависимости от профессии и организации производственного процесса в пределах от 45 до 80%, в среднем составляя около $\frac{2}{3}$ продолжительности рабочего дня.

Результаты проведенной обработки карт медицинских осмотров стажированных рабочих позволили устано-

вить, что при прочих приблизительно равных условиях симптоматика вибрационной болезни и длительность ее развития определяются в основном спектральным составом вибрации и, в частности, величинами надпороговых октавных уровней колебательной скорости, т. е. качественно-количественной характеристикой колебательной энергии.

В табл. 15 приведены результаты сопоставления энергетических показателей воздействующего колебательно-го процесса с преимущественно наблюдаемыми симптомами вибрационной патологии у рабочих отдельных профессий. Можно видеть, что по мере того как в спектрах воздействующих вибраций наибольшее превышение уровней колебательной скорости над порогом восприятия перемещается в область более высоких частот, изменяется как симптоматика вибрационной патологии, так и длительность формирования заболевания. Симптоматика меняется в направлении уменьшения степени выраженности и числа случаев поражения мышц и уменьшения зоны расстройств болевой чувствительности с одновременным увеличением процента расстройств периферической сосудистой системы; длительность развития заболевания изменяется в сторону четко выраженного сокращения сроков.

Представляло также интерес выявить количественную степень корреляции симптоматики вибрационной болезни с энергетической характеристикой вибрации. Для этого мы воспользовались методом ранговой корреляции как наиболее адекватным для тех случаев, когда варьирующие качественные признаки не могут быть выражены числовыми показателями, как это имеет место в оценке степени выраженности заболевания.

Приведенные в табл. 16 коэффициенты ранговой корреляции вычислялись нами для попарно сравниваемых энергетических показателей вибрации и характерных признаков заболевания по формуле:

$$r = 1 - \frac{6 \sum d^2}{n(n^2 - 1)}, \quad (4.3-1)$$

где r — искомый коэффициент ранговой корреляции; n — число вариантов, т. е. профессиональных групп; $\sum d^2$ — сумма квадратов разностей номеров рангов попарно сравниваемых показателей.

Таблица 15. Зависимость основных симптомов вибрационной патологии и сроков ее формирования от энергетических характеристик вибраций в отдельных профессиях

Профессия	Число осматриваемых рабочих	Инструмент			Превышение порога восприятия колебательной скорости (дБ)			Основные симптомы		
		наименование инструмента	секундное число ударов или оборотов	длительность работы в течение смены (%)	низкие частоты (11—22 Гц)	средние частоты (22—90 Гц)	высокие частоты (90 Гц и более)	зона расстройств болевой чувствительности	поражение мышц (% к числу обследованных)	соединительные расстройства (% к числу обследованных)
Формовщик	100	Трамбовки	10—12	40—60	55	40	20	Полукуртка	90	0
Бурильщик	350	Перфораторы	26—40	50—65	55	40	45	Длинные перчатки	58	24
Обрубщик	500	Рубильно-чеканочные молотки	30—40	50—60	50	55	60	Длинные и короткие перчатки	45	40—60
Клепальщик	250	Клепальные молотки	25—35	45—60	25	45	60	То же	47	40—50
Лесопилщик	160	Бензопилы	30—40	65—70	20	45	60	Пальцы	42	70
Шлифовщик	300	Ручные шлифовальные машины	70—80	60—70	20	45	60	Кончики пальцев	5	80
Рихтовщик	40	Станки динамического наклепа	100—160	80	20	45	60	То же	—	90

Таблица 16. Коэффициент ранговой корреляции между энергетической характеристикой вибраций и основными симптомами заболеваний

Сравниваемые показатели	Расстройства болевой чувствительности	Поражения мышц	Сосудистые расстройства
Увеличение числа оборотов или ударов	-0,87	-0,96	+0,98
Превышение порогов восприятия:			
на низких частотах	+0,95	-0,94	-0,83
» высоких »	-0,83	-0,90	+0,74

Нумерация была принята такой, что положительному значению r соответствовало увеличение обоих сравниваемых показателей, например увеличение превышения уровней в спектре или числа оборотов и увеличение процента расстройств, а отрицательному значению соответствовало уменьшение одного из показателей при увеличении другого.

Можно видеть, что существует достаточно высокая степень корреляции или «теснота связи» между увеличением числа оборотов или ударов, определяющим энергетическую характеристику воздействующей вибрации, в частности величины надпороговых октавных уровней колебательной скорости, и уменьшением зоны расстройств болевой чувствительности (-87%) и числа случаев поражений мышц (-96%), а с другой стороны, увеличением процента сосудистых расстройств ($+98\%$). Столь же высокая степень корреляции наблюдается и между надпороговыми уровнями вибраций в диапазоне низких и высоких частот и числом случаев мышечных и сосудистых расстройств.

Можно также указать на корреляцию спектрального состава вибраций, связанного с увеличением секундного числа оборотов или ударов инструмента, со скоростью развития заболеваний. Коэффициент корреляции r в этом случае равен -92% .

Таким образом, из приведенного сопоставления мы можем заключить, что особенности клиники и длительность развития патологических процессов в организме, вызванных продолжительным систематическим воздействием вибраций, определяются качественно-количественной характеристикой воздействующей колебательной

энергии. Это подтверждает энергетическую теорию действия вибраций не только на сенсорную систему, но и на организм человека в целом. При этом частоты колебаний определяют специфику наблюдаемых нарушений, физиологических функций, а амплитуды — степень их выраженности. Заметим, что на развитие вибрационной болезни могут оказывать влияние и другие сопутствующие факторы производственной среды, как-то: статическое напряжение, охлаждение, рабочая поза.

Однако основным, определяющим фактором все же является воздействующая энергия или, что то же, мощность колебательного процесса и длительность его воздействия.

Особенности вибрации и процессов ее механического воздействия позволяют не только объяснить специфику проявления и сроки развития вибрационной патологии для различных профессиональных групп, но могут способствовать более правильной трактовке некоторых вопросов патогенеза вибрационной болезни. Так, например, трактуемое иногда как генерализация патологического процесса увеличение со временем зоны расстройств болевой чувствительности (от кисти на предплечье и далее) при действии низкочастотных вибраций является по существу более поздним проявлением этой реакции в местах, более удаленных от зоны контакта, за счет затухания колебаний при распространении их по телу. Это убедительно подтверждается тем фактом, что при действии более неблагоприятных высокочастотных вибраций, затухающих обычно в пределах кисти рук, увеличения зоны расстройств болевой чувствительности, а следовательно, и генерализации патологического процесса никогда не наблюдается.

ПОДТВЕРЖДЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ДЕЙСТВИЯ ВИБРАЦИИ В РАБОТАХ ДРУГИХ ИССЛЕДОВАТЕЛЕЙ

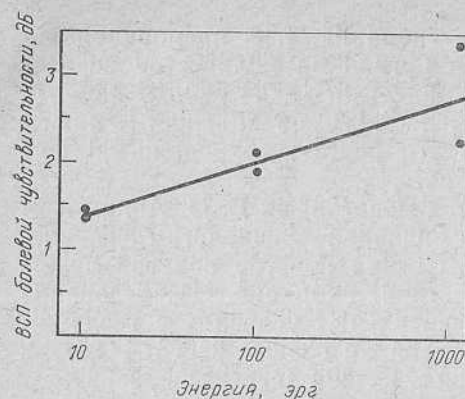
Выше мы уже отмечали, что в публикациях по физиолого-гигиеническим исследованиям действия вибрации на человека и по физиологии механорецепторов отсутствуют данные об интересующей нас зависимости между воздействующей энергией колебательного процесса и величинами ответных реакций тех или иных систем организма. Лишь единичные работы содержат материалы, анализ которых прямо или косвенно подтверждает

энергетическое действие вибраций, т. е. пропорциональность ответных реакций организма количеству воздействующей колебательной энергии. Такие работы явились дополнительным свидетельством правильности нашей концепции. Рассмотрим эти работы в хронологическом порядке их опубликования.

Первой из них является монография Е. Ц. Андреевой-Галаниной (1956), посвященная физиолого-гигиеническому исследованию изменения порогов болевой чувствительности после действия вибраций. Исследование проводилось в экспериментальных условиях с воздействием синусоидальных колебаний разных частот — 25, 43, 50 и 100 Гц с одинаковой и разной энергией колебательного процесса для каждой частоты, оцениваемой в 10, 100 и 1100 эрг.

Пороги болевой чувствительности определялись до и после действия вибрации методом альгезиметрии и измерялись в делениях шкалы альгезиметра, соответствующих глубине погружения иглы прибора в кожный покров для вызова болевого ощущения. В монографии отсутствуют более полные сведения об условиях проведения эксперимента: области определения порога; длительности действия вибраций; числе и возрасте испытуемых, а приводятся лишь результаты изучения, представленные в виде обобщенного графика зависимости абсолютных величин порогов болевой чувствительности от частоты колебаний при одинаковых и разных величинах воздействующей колебательной энергии. В тексте к графику отмечается, что «изменения состояния болевой чувствительности связаны скорее с энергией, чем с частотой». Из этого графика можно видеть, что в пределах точности замеров пороги болевой чувствительности после действия вибраций разных частот, но с одинаковой энергией колебаний практически можно считать одинаковыми, а при изменении колебательной энергии — возрастающими на каждой частоте приблизительно на одинаковую величину.

Если перейти от абсолютных величин порогов к их изменению относительно исходного уровня, выразив эти изменения в относительных логарифмических единицах — децибелах, то можно найти, что временные изменения порогов колеблются в незначительных пределах: для энергии 10 эрг — от 1,45 до 1,35 дБ, 100 эрг — от 2,1 до 1,90 дБ, 1100 эрг — от 3,4 до 2,50 дБ.



37. Зависимость изменения порога болевой чувствительности от воздействующей колебательной энергии (по данным Е. Ц. Андреевой-Галаниной).

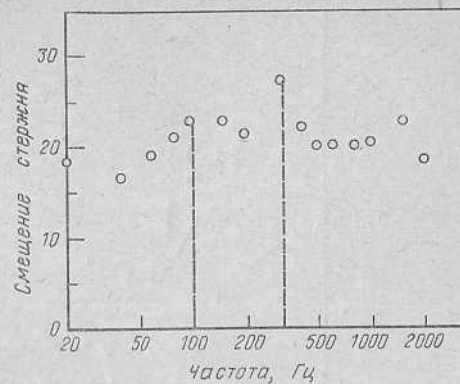
Откладывая на оси абсцисс в логарифмическом масштабе величины энергии воздействующей вибрации, а на оси ординат — найденные временные изменения порогов в децибелах, получим интересующую нас графическую зависимость между этими величинами (рис. 37). На графике временные изменения порогов болевой чувствительности пропорциональны воздействующей колебательной энергии и изменяются по линейному закону в логарифмическом масштабе или, что то же, по экспоненциальному закону в линейном масштабе, как это можно было ожидать, исходя из энергетической концепции действия вибрации.

Таким образом, материалы исследований Е. Ц. Андреевой-Галаниной подтверждают пропорциональность ответной реакции сенсорной системы организма, воздействующей колебательной энергии и коррелируют с результатами проведенных нами аналогичными исследованиями по вибрационной и болевой чувствительности.

Следующие две работы относятся к области электрофизиологии и посвящены изучению поведения механорецепторов в условиях их вибростимуляции. Их целью являлось определение амплитудно-частотных порогов биоэлектрической активности рецепторов и частотных границ виброрецепции.

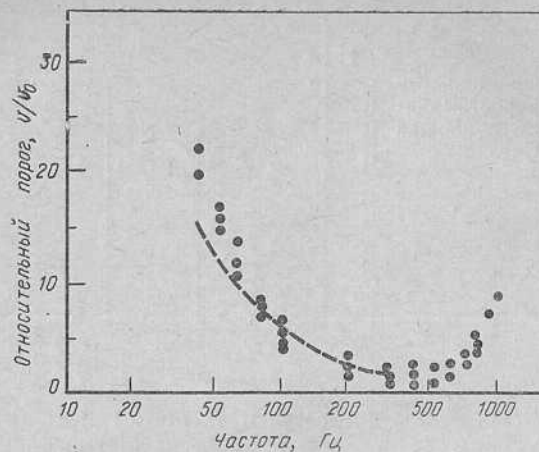
Так, японским физиологом Sato (1961) исследование проводилось на тельцах Пачини кишечной брыжейки кошек, как на изолированных капсулах, так и *in vivo*, т. е. без нарушения кровоснабжения препарата. Рецепторные потенциалы снимались с аксона капсулы при блокировке нодального компонента потенциала прокаи-

38. Частотная характеристика вибростимулятора в исследованиях М. Сато.



новым рингеровским раствором и регистрировались на катодно-лучевом осциллооскопе или записывались. Вибростимуляция капсулы тельца Пачини осуществлялась тонким стеклянным стержнем, укрепленным на керамическом пьезоэлементе, питаемом переменным током через задающий звуковой генератор. Согласно принятой схеме возбуждения колебаний, смещения стеклянного стержня должны были быть пропорциональны напряжению, подаваемому на пьезоэлемент. Однако калибровочная проверка, проведенная исследователем, показала, что при постоянстве подаваемого напряжения вблизи частоты 300 Гц (рис. 38) возникали резонансные колебания стержня, обуславливающие увеличение амплитуды смещения приблизительно на 30%, а в диапазоне частоты 40 Гц амплитуды колебания соответственно уменьшались примерно во столько же раз. Частотные пороги биоэлектрической активности рецептора определялись в диапазоне частот от 20 до 1000 Гц по наименьшей величине напряжения (V), подаваемого на стимулятор для получения устойчивых разрядов и измерялись в относительных единицах V/V_0 , где $V_0=4,86$ — калибровочное напряжение, соответствующее реобазе для прямоугольных импульсов длительностью в 10 мс.

Таким образом, вибрация, соответствующая порогам виброрецепции, оценивалась, как обычно, амплитудой смещения. Интересующие нас результаты экспериментов, проведенных *in vivo*, представлены М. Сато графической зависимостью порогов от частоты в виде отдельных точек, воспроизводимых нами в зеркальном отображении на рис. 39.



39. Зависимость порогов виброрецепции от воздействующей энергии. Точками — эксперименты по М. Сато, штрихами — по энергетической теории И. К. Разумова.

Можно видеть, что виброрецепция тельцами Пачини осуществляется в диапазоне частот от 20—30 до 800—1000 Гц. Наименьшая пороговая величина амплитуд смещения соответствует частоте вблизи 300 Гц. При уменьшении или увеличении частоты возбуждения относительно частоты 300 Гц пороговые амплитуды смещения возрастают. При этом исследователь отмечает разницу в ответных реакциях рецептора для этих двух частотных диапазонов. Так, если на частотах возбуждения, меньших оптимальной частоты, рецептор отвечает на раздражение синхронно частоте колебаний, то на частотах, больших оптимума, ответная реакция рецептора десинхронизирована и генераторный потенциал возникает в ответ на два или более цикла колебаний. Кроме того, эксперименты, поставленные на изолированных тельцах Пачини, показали, что с изменением температуры среды, окружающей тельце, вся частотная характеристика виброрецепции перемещается, почти не изменяя своей формы, в сторону больших частот при возрастании температуры и в направлении меньших частот при ее убывании. Покажем, что увеличение пороговых амплитуд смещения на частотах менее оптимума, т. е. при синхронных ответных реакциях рецептора на вибростимуляцию, может быть объяснено исходя из концеп-

ции энергетического действия вибраций и проверено по экспериментальным данным Sato (1961).

Действительно, рецептор при его вибростимуляции «не знает», с какой частотой и амплитудой смещения мы на него воздействуем, сообщая ему переменную во времени энергию, изменяющую его состояние и обуславливающую возникновение ответных реакций, синхронных изменению энергии. Если предположить, что для получения синхронизированных ответов необходима приблизительно одинаковая энергия на каждой частоте, а следовательно, и одинаковая колебательная скорость, то пороговые амплитуды смещения при возникновении устойчивой биоэлектрической активности рецептора должны возрастать с уменьшением частоты вибростимуляции по закону:

$$Af = (v/v_0)f = \text{const}, \quad (4-4-1)$$

где Af — амплитуда и частота возбуждаемых колебаний; v/v_0 — относительные пороги виброрецепции, соответствующие амплитуде (A) смещения.

Приняв (с учетом замечания о влиянии резонанса) за наиболее достоверный частотный порог по Sato среднюю его величину $v/v_0=6$ для частоты $f=100$ Гц, вычислим по формуле (4-4-1) частотные пороги виброремещения для частот меньших 300 Гц и по найденным величинам построим кривую расчетных порогов (на рис. 39 она нанесена пунктиром).

Сопоставим эту кривую с порогами, экспериментально полученными Sato, и учитывая, что последние в диапазоне 200—400 Гц несколько занижены, а в диапазоне 100—40 Гц — завышены, убедимся, что расчетная кривая практически совпадает с экспериментальными данными, подтверждая тем самым, что в пределах эффективной виброрецепции частотные пороги биоэлектрической активности механорецепторов определяются при прочих равных условиях только воздействующей на рецепторы колебательной энергией.

Вероятно, энергетической концепцией может быть объяснен рост пороговых амплитуд смещения и в области частот выше оптимума, однако проверка этого положения не может быть нами сделана ни по данным Sato, ни по данным других исследователей из-за отсутствия достаточной информации об особенностях десинхрониза-

ции ответной реакции рецептора. Этот вопрос требует дополнительной экспериментальной проверки.

Таким образом, материалы исследований Sato по виброрецепции тельцами Пачини подтверждают нашу точку зрения об энергетическом воздействии вибраций на сенсорную систему и о правильности гигиенической оценки вибраций по колебательной скорости.

Целью второй работы (В. Ф. Шубчинский, 1967) являлось изучение восприятия вибраций рецепторным аппаратом скелетных мышц в зависимости от физических характеристик вибрации — частоты, амплитуды смещения, колебательной скорости и физиологических показателей функционального состояния рецепторов.

Исследования проводились в острых опытах на наркотизированных кошках. Для изучения мышечной виброрецепции были сепарированы обе головки икроножной мышцы и соответствующие икроножные нервы. Потенциалы действия отводились с икроножного нерва и регистрировались на фото пленке шлейфного осциллографа МПО-2. Вибростимуляция мышцы осуществлялась штифтом с контактной поверхностью 47 мм^2 , укрепленным на подвижной части электродинамического вибратора, питаемого переменным током через задающий звуковой генератор ЗГ-10. Пороги суммарной биоэлектрической активности «веретен» скелетных мышц определялись измерением амплитуд смещения штифта вибростимулирующей системы при возникновении стабильных ответов рецепторного аппарата и измерялись в микрометрах. Исследование проводилось на фиксированных частотах в диапазоне от 20 до 200 Гц. В работе отмечается, что меньшая величина порога виброрецепции соответствовала частоте 150—200 Гц. При воздействии на мышцу синусоидальных колебаний с частотами менее 200 Гц в икроножном нерве возникали афферентные залпы, синхронизированные с частотой колебаний, при действии же колебаний с частотой более 200 Гц ответные реакции были десинхронизированы.

В. Ф. Шубчинский, знакомый с нашими публикациями об энергетическом воздействии вибраций, первым дает в литературе по физиологии механорецепторов объяснение увеличения пороговых амплитуд смещения в области частот меньших оптимальной частоты. Причину этого явления он видит в постоянстве колебательной энергии, необходимой для синхронизированных ответов

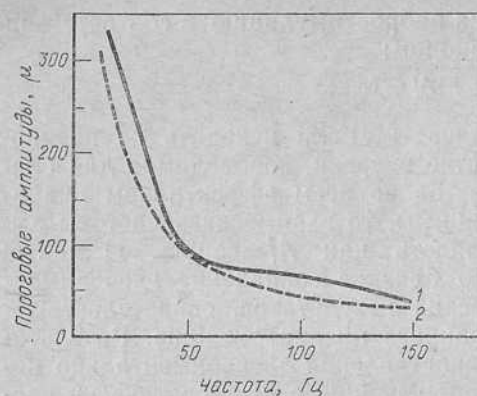
мышечных веретен на вибростимуляцию в соответствии с указанным выше законом:

$$Af = \text{const.}$$

Исследователь отмечает: «Если исходить из предположения, что количество энергии, необходимое для синхронизированных ответов во всем эффективном диапазоне, является постоянным, то взаимосвязь частоты амплитуды будет выглядеть как $Af = \text{const}$ ». И далее: «...имеется достаточно близкое совпадение экспериментальных и теоретических результатов, свидетельствующее в пользу высказанного предположения». Результаты исследования и сопоставления экспериментально полученных порогов виброрецепции с их теоретически рассчитанными величинами представлены в автореферате диссертации В. Ф. Шубчинского в виде графика. Он воспроизведен нами на рис. 40. Можно видеть, что пунктирная кривая расчетных порогов виброрецепции мышечными веретенами практически совпадает с их экспериментально определенной частотной характеристикой, изображенной на рисунке сплошной кривой.

Таким образом, электрофизиологические исследования В. Ф. Шубчинского, так же как и аннотированная выше работа Sato, подтверждают энергетическую теорию действия вибраций на механорецепторы, а следовательно, и правильность выбора колебательной скорости как параметра для гигиенической оценки вибрации.

Третья из рассмотренных нами работ относится к физиолого-гигиеническим исследованиям по определению предельно допустимых величин вибраций для работников локомотивных и поездных бригад железнодорожного транспорта. Содержание этой работы освещено в докладе А. М. Волкова с соавторами (1966). Целью этой работы являлось определение предельно допустимой величины прерывисто воздействующих ускорений при различном проценте их повторяемости во времени вибрационного воздействия. Исследования проводились в экспериментальных условиях при часовом действии на человека прерывистых вертикальных синусоидальных колебаний с ускорениями от 38 до 350 см/с² и их повторяемостью в пределах от 5 до 20% времени воздействия. Колебания создавались виброплатформой. Под наблюдением находились 20 практически здоровых молодых людей. Оценка воздействия вибраций на организм про-



40. Пороги виброрецепции мышечных вейерен по данным В. Ф. Шубчинского.
1 — эксперимент; 2 — теоретически при $Af = \text{const}$.

изводилась по показателям нарушения комплекса физиологических функций, определяемых методами энцефалографии, артериальной барометрии, частоты световых мельканий и др., регистрируемых до, во время и после (до 2 ч) действия вибраций. Экспериментальные исследования были в дальнейшем подтверждены исследованиями изменения функционального состояния организма работников локомотивных и поездных бригад в эксплуатационных условиях. Результаты экспериментальных исследований позволили высказать предположение о предельно допустимых величинах ускорений и процентах их повторяемости за время воздействия (табл. 17).

К сожалению, в публикации не поясняется, на каких частотах проводились экспериментальные исследования, какие величины нарушений физиологических функций принимались за допустимые, почему в качестве критерия для оценки вибраций принято ускорение колебательного движения и каков был характер спектра натуральных вибраций, воздействующих на работников поездных бригад.

Однако в этом обзоре приведенная работа интересовала нас в ином аспекте, а именно, соответствуют ли энергетическому воздействию вибраций допустимые ускорения синусоидальных колебаний и проценты их повторяемости, установленные исследователем не по реакции адекватной сенсорной системы, а по комплексу показателей нарушения физиологических функций, проявляющихся при действии общих вибраций, как правило, в опосредствованных неспецифических реакциях

Таблица 17. Допустимый процент повторяемости ускорений в зависимости от их величины

Допустимые ускорения (см/с²)	32	60—80	80—100	100—120	120—150	150—200	250 и более
Допустимая повторяемость длительности воздействия	100	20—15	15	10	5	2,5	1

организма. Если принцип энергетического воздействия вибрации соблюдается и для «общих» вибраций, то между допустимыми ускорениями и процентом их повторяемости должно иметь место соотношение, вытекающее из закона постоянства энергии для моночастотных синусоидальных колебаний, а именно:

$$v_0^3 p_0 = \left(\frac{a_n}{\omega_n} \right)^2 p_n, \text{ откуда } p_n = p_0 \left(\frac{a_0}{a_n} \right)^2, \quad (4-4-2)$$

где v_0 — колебательная скорость, соответствующая ускорению; $a_n p_n$ — ускорения и проценты их повторяемости для любой частоты.

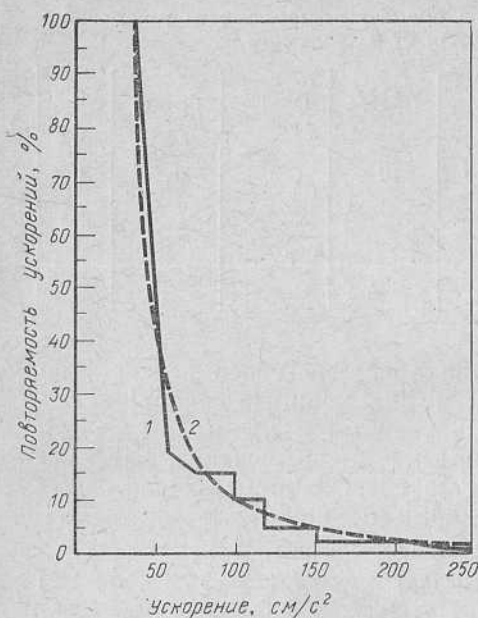
И тогда справедлив обратный вывод о том, что при условии пропорциональности между нормируемыми величинами ускорений и допустимым процентом их повторяемости имеет место пропорциональность реакций организма в ответ на воздействующую колебательную энергию.

Приняв по данным А. М. Волкова с соавторами (1966), что

$$a_0 = 32 \text{ см/с}^2 \quad \text{и} \quad p_0 = 100\%,$$

вычислим допустимые проценты повторяемости p_n по формуле (4-4-2) для других величин ускорений a_n , указанных в табл. 17, и сопоставим их с указанными в той же таблице процентами повторяемости p_n по данным А. М. Волкова с соавт.

Результаты сопоставления представлены графически на рис. 41, где расчетные проценты повторяемости изображены пунктирной кривой, а экспериментально установленные — ломаной линией.



41. Допустимые проценты повторяемости ускорений. Экспериментально по А. М. Волкову. Теоретически по И. К. Разумову.

Можно видеть, что расчетные допустимые проценты повторяемости ускорений за время действия вибраций практически совпадают с их средними экспериментально определенными величинами, или иначе говоря, материалы исследования А. М. Волкова с соавт. подтверждают правильность концепции энергетического действия на организм «общей» вибрации в оценке этого действия по комплексу показателей нарушения опосредствованных неспецифических реакций организма на воздействие этого фактора.

Последняя работа, на которую мы хотели бы указать, — это статья Е. Бернса «Спектры в гигиене труда», опубликованная в 1970 г. в журнале Американской ассоциации промышленной гигиены, т. е. уже после наших публикаций об энергетическом действии вибраций. Автор статьи — лауреат ежегодной премии Д. Камингса — пишет, что процесс развития техники расширяет сферу деятельности гигиениста и усложняет ее и что за последние годы в гигиене труда резко возрос удельный вес физических факторов, таких, как вибрация, шум, электромагнитные колебания и близкие к ним корпускуляр-

ные излучения, имеющие единую волновую природу, но воздействующие по-разному в зависимости от частот. Отмечая, что для гигиенистов в этом есть нечто принципиально общее, а именно передача энергии от источника к человеку, и что количество передаваемой энергии может явиться основой для оценки их биологического действия, автор констатирует, что вибрация также может вызывать биологические эффекты, однако пока неизвестно количество передаваемой ею энергии и, количество ее безопасное для здоровья. Резюмируя, автор приходит к выводу о необходимости проведения исследований по установлению корреляции между уровнями воздействующей энергии и ее биологическими эффектами. Наша работа частично восполняет этот пробел.

Таким образом, рассмотренные выше работы других исследователей подтверждают не только концепцию энергетического действия вибраций на человека, но и целесообразность ее использования для оценки биологического действия аналогичных по своей природе физических факторов внешней среды.

Заканчивая эту главу, мы хотели бы обратить внимание исследователей на то, что при одновременном воздействии на человека различных физических факторов внешней среды воздействующая энергия этих факторов может служить универсальной мерой для оценки как степени влияния того или иного фактора в их совместном неблагоприятном воздействии на организм, так и тяжести и напряженности условий труда.

ПРИМЕНЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ В ГИГИЕНИЧЕСКОМ НОРМИРОВАНИИ ВИБРАЦИЙ

В этом разделе мы рассмотрим основные принципы гигиенического нормирования как основы системы безопасности труда и сохранения здоровья работающих в условиях неблагоприятного воздействия факторов внешней среды и, в частности, вибраций механизированного инструмента.

В общем случае гигиеническое нормирование факторов внешней среды требует решения по крайней мере трех основных вопросов: цели нормирования, физического критерия нормирования, т. е. нормируемого параметра (его диапазона и единиц измерения), и принципа установления нормируемых величин.

Ограничение параметров тех или иных факторов внешней среды, воздействующих на человека в процессе его трудовой деятельности или в быту, может преследовать различные цели:

1. Безопасность труда и быта, т. е. исключение возможности воздействий, опасных для жизни или приводящих к увечьям. Такие нормы обычно устанавливаются на основе острых опытов с животными и с учетом случаев, имевших место в трудовой деятельности.

2. Гигиена труда, т. е. предупреждение возникновения профессиональных заболеваний в отдаленные периоды в результате действия фактора. В этих случаях основой для нормирования могут служить хронические опыты с животными, а также клинические показатели в отношении условий возникновения и особенностей проявления заболеваний профессиональной этиологии.

3. Эргономика, т. е. создание оптимальных условий для наиболее продуктивного труда при наименьшем напряжении функциональной деятельности организма. В основе этих норм должны лежать исследования по влиянию параметров фактора на изменение производительности труда и качество продукции.

4. Гигиена жилья и быта, т. е. условия, обеспечивающие наилучшее самочувствие по данным субъективной оценки величин нормируемого фактора (статистический опрос).

При современном состоянии производства и эксплуатации механизированного инструмента и технологического оборудования и современных задачах здравоохранения в СССР представляется возможным нормировать вибрации, исходя главным образом из предупреждения распространения вибрационной болезни среди рабочих различных отраслей народного хозяйства, эргономическое же нормирование отнести на последующий период — период совершенствования технологических процессов, выполняемых в настоящее время с использованием виброопасного оборудования и механизированного инструмента.

Физическим критерием для гигиенического нормирования вибраций, как было показано проведенными нами исследованиями, должна служить мощность колебательного процесса в зоне контакта вибрирующих поверхностей с телом человека. В современных условиях из-за отсутствия аппаратуры для непосредственного измере-

ния воздействующей на человека колебательной мощности и сложности разработки такой аппаратуры, а также в связи с безотлагательной необходимостью ограничения параметров вибраций в связи с распространенностью вибрационной болезни возможно компромиссное решение — замена указанного параметра определяющими его компонентами: нормирование октавных уровней колебательной скорости в зоне контакта вибрирующей поверхности с телом человека и силовых нагрузок, т. е. силы нажима при работе инструментом, и его веса, удерживаемого руками в процессе работы, как факторов, непосредственно влияющих на мышечную напряженность, а следовательно, и на входной механический импеданс, определяющий при прочих равных условиях воздействующую мощность колебательного процесса.

В этом случае форма частотной характеристики допустимых уровней колебательной скорости должна соответствовать форме частотной характеристики величин, обратных входному механическому импедансу в зоне контакта вибрирующей поверхности с телом человека, скорректированной в соответствии со значимостью нарушений физиологических функций, вызываемых вибрационным воздействием низко- и высокочастотных компонентов спектров вибрации. Эта корректировка должна проводиться на основе показаний выбранного физиолого-гигиенического критерия нормирования. В общем случае за допустимые уровни вибраций следует принимать такие, которые вызывают нарушения наиболее ранних и важных для жизнедеятельности и работоспособности организма функций, при условии, что до начала следующей рабочей смены происходит их восстановление и что при повторном систематическом воздействии они не приводят к развитию профессиональных заболеваний.

Так как факторы внешней среды в большинстве случаев воздействуют одновременно, то задача выбора физиологического критерия для их нормирования в общем случае должна сводиться к выбору критерия оценки границы адаптации — утомление, т. е. границы допустимой степени функционального утомления, не приводящего впоследствии к патологии при действии дозированных раздражителей. Поиск такого критерия нам представляется целесообразным вести в направлении изучения влияния этих раздражителей на энергетиче-

ский обмен в системах, регулирующих жизнедеятельность и работоспособность организма в целом, и осуществлять его комплексными методами психофизиологии, физиологии, биохимии, гистохимии и морфологии, позволяющими достаточно полно характеризовать нарушение и восстановление функций заинтересованных систем.

В качестве компромиссного решения для нормирования могут быть использованы опытные данные по уровням вибрации, как не приводящим в отдаленных последствиях к профессиональным заболеваниям, так и явно влекущим за собой развитие патологического процесса.

В частном случае нормирования вибраций механизированного инструмента нам представилась возможность на основе выводов из энергетической теории действия вибрации на человека и установления корреляции между физическими характеристиками вибраций, первичным механизмом их воздействия и наблюдаемыми нарушениями физиологических функций, выявить, что наиболее ранимыми системами организма являются нервно-мышечный аппарат (при действии низкочастотных вибраций, от 10 до 22,5 Гц) и сосудистая система (при действии вибраций высоких частот, 90 Гц и более). Кроме того, удалось установить величины колебательных скоростей, как не вызывающих профессионального заболевания, так и явно влекущих за собой развитие патологического процесса в отдаленный период.

В границах, очерчиваемых огибающими уровней этих скоростей и с учетом материалов дополнительно проведенных исследований, нами были разработаны новые, уточненные нормы — «Санитарные нормы и правила при работе с инструментами, механизмами и оборудованием, создающим вибрации, передаваемые на руки работающих», утвержденные Министерством здравоохранения СССР (№ 626-66).

Заметим попутно, что в общем случае гигиенические нормативы не могут полностью гарантировать от возникновения неблагоприятных последствий систематических длительно воздействующих вредных факторов внешней среды, в частности вибраций. Это обусловлено не столько недостатком норм, всегда разрабатываемых для некоторых средних условий, сколько индивидуальными особенностями организма и изменяющимися условиями труда, а также сопутствующими факторами. По-

этому критерием доброкачественности гигиенических нормативов должна служить проверка их и выявление процента вероятности избежания профессиональных заболеваний (не менее чем в 95% случаев).

Именно поэтому для 100% эффективности нормирования работающие с вибрирующим оборудованием или инструментом должны обязательно подвергаться предварительным и периодическим медицинским осмотрам, позволяющим осуществлять как профессиональный отбор по противопоказаниям при поступлении на работу, так и своевременный перевод на работы, не связанные с воздействием вибраций. Отсюда следует, что санитарные нормы по ограничению вибраций целесообразно дополнять правилами, регламентирующими работы с вибрирующим оборудованием и необходимые мероприятия медицинской профилактики неблагоприятного действия вибраций.

Кроме того, в связи с развитием техники, меняющей условия труда, с ростом благосостояния и культурного уровня населения санитарные нормативы следует рассматривать как временные, подлежащие периодическому пересмотру в направлении их уточнения и снижения нормируемых величин с постепенным переходом от норм, не вызывающих патологии, к нормам эргономическим. Разработанные нами нормы включали правила при работе с вибрирующим оборудованием, ограничивающие общую длительность контакта с вибрирующими поверхностями не более $\frac{2}{3}$ продолжительности рабочей смены; наименьший возраст работающих (18 лет) и условия допуска к работе с вибрирующим оборудованием, а также меры медицинской профилактики по предупреждению развития вибрационной болезни.

Как мы уже отмечали, в СССР санитарные нормы и правила являются основой создания государственной системы обеспечения безопасности труда и сохранения здоровья работающих в условиях неблагоприятных факторов внешней среды, в частности вибраций. Улучшение в деле профилактики вибрационной патологии требует пересмотра действующих и разработки новых государственных стандартов на вибробезопасное технологическое оборудование и механизированный инструмент, включающих требования санитарных норм и обязывающих заводы-исполнители к неуклонному выполнению этих стандартов. Кроме того, планы внедрения в прак-

Т а б л и ц а 18. Допустимые величины колебательной скорости ручных машин, воздействующей на руки операторов

Среднегеометрические частоты октавных полос	Граничные частоты октавных полос (Гц)	Допустимые величины колебательной скорости, не более	
		действующие значения (м/с)	уровни действующих значений (дБ)
8	5,6—11,2	$7,10 \cdot 10^{-2}$	123
16	11,2—22,4	$5,00 \cdot 10^{-2}$	120
32	22,4—45	$3,50 \cdot 10^{-2}$	117
63	45—90	$1,80 \cdot 10^{-2}$	111
125	90—180	$1,80 \cdot 10^{-2}$	111
250	180—355	$1,20 \cdot 10^{-2}$	108
500	355—710	$0,90 \cdot 10^{-2}$	105
1000	710—1400	$0,63 \cdot 10^{-2}$	102
2000	1400—2800	$0,45 \cdot 10^{-2}$	99

Примечание. Для ручных машин с числом оборотов или ударов более 670 в минуту контроль вибрации в диапазоне частот ниже 11,2 Гц не обязателен.

тику этих стандартов с указанием конкретных сроков введения для отдельных видов машин должны обеспечивать возможность измерения вибраций и контроля их соответствия санитарным нормам. Этот контроль должен осуществляться силами заводов-изготовителей при типовых испытаниях готовых изделий и органами санитарного надзора при контрольных замерах у потребителей.

В соответствии с этим, кроме указанных выше санитарных норм (№ 626-66), нами был разработан Государственный стандарт Союза ССР № 17770-72 «Машины ручные. Допустимые нормы вибраций». Оба указанных документа в соответствии с выводами наших исследований по энергетическому действию вибраций на человека ограничивали:

- октавные уровни колебательных скоростей;
- вес инструмента, удерживаемый руками в процессе работы (до 10 кг);
- паспортную, т. е. обеспечивающую нормальную работу, силу нажима при работе с инструментом (до 20 кг).

Кроме того, в упомянутых документах были сформулированы дополнительные гигиенические требования:

— к условиям направления выхлопа обработанного воздуха пневмоинструмента;

— к форме рукояток и теплопроводности их материала в зоне контакта со структурами тела человека.

В таблице 18 представлены данные по допустимым величинам колебательной скорости ручных машин.

В заключение следует указать, что разработка основ теории энергетического действия вибраций и установление физического критерия для гигиенической оценки и нормирования вибраций, разработка санитарных норм и Государственного стандарта на допустимые уровни вибраций ручных машин, основанных на новых принципах ограничения не только вибрационных, но и силовых характеристик ручных машин, создание аппаратуры для измерения и контроля вибраций на соответствие нормам — все это необходимые, но только начальные звенья в решении гигиенической проблемы вибраций.

Главными направлениями этих работ, как нам представляется, должны быть: 1) совершенствование существующих и разработка новых конструкций ручных машин со снижением вибраций, воздействующих на человека, и изыскание новых технологических процессов, исключающих применение виброопасных ручных машин; 2) изыскание биологических критериев для нормирования вибраций при совместном их действии с другими неблагоприятными факторами внешней среды, т. е. границ допустимого функционального утомления, не приводящего впоследствии к патологии. Это изыскание должно проводиться на основе комплексного изучения влияния дозированных раздражителей на процессы нарушения и восстановления функций и энергетического обмена в системах, регулирующих жизнедеятельность и работоспособность организма.

ЛИТЕРАТУРА

- Абрамович-Поляков Д. К. Материалы о нейро-сосудистых нарушениях вибрационной болезни от воздействия локальной среднечастотной вибрации. Автореф. дис. канд. М., 1965, 14 с.
- Александров Е. В., Студниц Е. Я. Основы расчета виброзащитных устройств с упругой связью. Отчет Ин-та горного дела им. А. А. Скочинского. М., 1966, 25 с.
- Андреева-Галанина Е. Ц. Вибрация и ее значение в гигиене труда. М., Медгиз, 1965, 190 с.
- Андреева-Галанина Е. Ц., Дрогичина Э. А., Артамонова В. Г. Вибрационная болезнь. М., Медгиз, 1961, 173 с.
- Бабуров В. И. Исследование пневматических рубильно-клепальных молотков. Автореф. дис. канд. Томск, 1964, 24 с.
- Баженов Д. В., Баженова Л. А., Римский-Корсаков А. В. Измерение статистических характеристик колебаний сложных механических систем. Докл. секции М II 7 VI Всесоюзн. акустич. конф. АН СССР, 1968, с. 4.
- Березанский Л. С. Исследование динамики ручных горных сверл с целью снижения уровня вибраций. Автореф. дисс. канд. М., 1969, 16 с.
- Бойко Е. И. Время реакции человека. М., «Медицина», 1964, 440 с.
- Борисов Л. П., Васильев Ю. М., Коненков Ю. К. К вопросу о взаимодействии человека с вибрирующим ручным инструментом. Докл. секции ПIV 6 VI Всесоюзн. акустич. конф. АН СССР, 1968, 4 с.
- Бреховских Л. М. Волны в сплошных средах. М., Изд-во АН СССР, 1957, 502 с.
- Быховский И. И. Основы теории вибрационной техники. М., «Машиностроение», 1969, 364 с.
- Васильев Ю. М. К вопросу вибрации ручных машин ударного действия. Автореф. дис. канд. Каунас, 1969, 19 с.
- Гигиена труда при работе ручным механизированным инструментом. Под. ред. Е. Ц. Андреевой-Галаниной. М., «Медицина», 1967, 244 с.
- Гигиеническое нормирование вибраций затухающего характера на железнодорожном транспорте. — В кн.: Вибрационная техника. М., 1966, с. 475—478. Авт.: А. М. Волков, Н. С. Скабалланович, Т. Л. Соснова, В. Я. Чирков.
- Горбунов В. Ф. Исследование рабочих процессов и вибрации пневматических молотков. Автореф. дис. докт. Томск, 1964, 31 с.
- Горелик Г. С. Колебания и волны. М., «Физматгиздат», 1959, 572 с.
- Дмитриева Т. М. Электрофизиологическая характеристика функциональной организации тактильных рецепторов кожи. Автореф. дис. канд. М., 1967, 20 с.

- Дрогичина Э. А., Метлина Н. Б. К классификации вибрационной болезни. — «Гиг. труда», 1967, № 11, с. 27—31.
- Елгазин В. И. Исследование некоторых вопросов безопасности, промышленной гигиены и технической эстетики горных ручных электросверл. Автореф. дис. канд. Томск, 1963, 17 с.
- Исследование вибрационной чувствительности и влияющих на нее факторов. — «Биофизика», 1961, т. VI, вып. 1, с. 61—65. Авт.: В. П. Бабкин, О. М. Розен, Л. Н. Тумаркина, Р. И. Черняк.
- Ильинский О. Б. Вопросы физиологии сенсорных систем. Механорецепторы (обзор). М., «Наука», 1967, 82 с.
- Комарова А. А. Клинико-физиологические исследования двигательной системы при вибрационной болезни. Автореф. дис. канд. М., 1967, 19 с.
- Кухта Ю. С. Физиолого-гигиенические исследования фактора вибрации при работе ручными пневматическими машинами ударного действия с различными способами виброзащиты. Автореф. дис. канд. Новосибирск, 1967, 19 с.
- Павлов И. П. Избранные произведения. Под ред. Х. С. Коштоянца. Госполитиздат., 1949, 568 с.
- Первичные процессы в рецепторных элементах органов чувств. М., «Наука», 1966, 196 с.
- Полякова М. М. Исследование регионарной и общей гемодинамики при вибрационной болезни, обусловленной воздействием «локальной» и «общей» вибрации. Автореф. дис. канд. М., 1969, 20 с.
- Попков В. И. Измерение механических сопротивлений в полосе частот. Докл. секции MIV I Всесоюз. акустич. конф. АН СССР, 1968, 4 с.
- Пугачев И. В. К физиологическому обоснованию вибрационного восстановительного спортивного массажа. Автореф. дис. канд. Пермь, 1965, 20 с.
- Разумов И. К. Основные теоретические вопросы изучения воздействия вибрации на организм человека. — «Гиг. труда», 1967, № 3, с. 3—8.
- Разумов И. К. Вибрация и ее механическое действие на человека. — В кн.: Вибрация на производстве. Под ред. Летавета А. А. и Дрогичиной Э. А. М., «Медицина», 1971, с. 4—57.
- Разумов И. К., Денисов Э. И. О методике измерения вибрации для их гигиенической оценки. — В кн.: Вибрационная техника. М., 1966, с. 478—482.
- Разумов И. К., Малинская Н. Н., Денисов Э. И. Значение спектрального анализа для оценки особенностей воздействия на организм человека локальных вибраций. — «Вестн. АМН СССР», 1966, № 8, с. 13—17.
- Ржевкин С. Н. Курс лекций по теории звука. М., 1960, с. 37—55.
- Смирнов Н. В., Дунин-Барковский И. В. Курс теории вероятностей и математической статистики для технических приложений. М., «Наука», 1965, 512 с.
- Тхоревский В. И. Кровоснабжение скелетных мышц при статической и динамической работе. Автореф. дис. канд. М., 1967, 18 с.
- Харкевич А. А. Спектры и анализ. М., 1962, 236 с.
- Черниговский В. Н., Миркин А. С., Мошанский В. Ф. Возможный механизм возбуждения телец Пачини. — «Изв. АН СССР», Биология, 1970, № 2, 214—222.
- Чернин В. Н., Напалков А. В. Математический аппарат биологической кибернетики. М., «Медицина», 1966, 374 с.

Шубчинский В. Д. Мышечная виброрецепция и влияние виброрецепторных импульсов на функциональное состояние спинного мозга. Автореф. дис. канд. Донецк, 1967, 20 с.

- Agate J. N., Druett H. A. A study of portable vibrating tools in relation to the clinical effects which they produce. — "Brit. J. Industr. Med.", 1947, 4, 141—163.
- Békésy G. Über die Empfindlichkeit des Stehenden und Sitzenden Menschen gegen sinusförmige Erschütterungen. — "Akust. Z.", 1939, 5, 311—319.
- (Beranek L.) Беранек Л. (пер. с англ.) Акустические измерения. М., Изд-во иностр. лит., 1952, 626 с.
- Broch J. T. Application of B & K equipment to measurement of mechanical vibration and shock. Brüel & Kjær, v. 192.
- Broch J. T. Non-linear Random, Vibration. Brüel & Kjær Techn. Rev., 3, 1964, 40 с.
- Broch J. T. Vibration testing of components. Brüel & Kjær Techn. Rev. 2, 1958, 28 с.
- Bugard P. J. Mesures des seuils de sensation vibratoires chez l'homme. J. de Physiol., 1952, 44, 230—233.
- Coermann R. R. The mechanical impedance of the human body in sitting and standing position at low frequency. In: S. Lippert (ed.). "Human Vibration Response", New York, 1963, p. 1—27.
- (Den Hartog J. P.) Ден-Гартог Дж. П. (пер. с англ.) "Mechanical vibrations". Механические колебания, 1960, 580 с.
- Dieckmann D. Einfluss vertikaler mechanischer Schwingungen auf den Menschen. — "Int. Z. Angew. Physiol.", 1957, Bd 16, S. 519—564.
- Dieckmann D. Ein mechanisches Modell für das Schwingungserregte Hand-Arm-System des Menschen. — "Int. Z. Angew. Physiol.", 1958, Bd 17, 125—132.
- Dieckmann D. Mechanische Modelle für den Vertikal schwingenden menschlichen Körper. — "Int. Z. Angew. Physiol.", 1958, Bd 17, 1167—1180.
- Dieckmann D., Scheffler H. Die Vibrationsbelastung des Menschen beim Arbeit mit Motorsägen. VDI Zschr., 98, 377—380, 1956.
- Gierke H. E., Coermann R. R. The Biodynamics of Human Responses to Vibration and impact. — "Indust. Med. Surg.", 1963, 32, 30—32.
- Gierke H. E. On noise and vibration exposure criteria. — "Arch. Environm. Health", 1965, 11, 327—339.
- (Grodins T.) Гродинз Ф. Теория регулирования и биологические системы. Пер. с англ. М., «Мир», 1966, 254 с.
- Cosh J. A. Studies on the nature of vibratory sense. — "Clin. Sci.", 1953, 12, 131—151.
- Guignard I. Physiological effects of mechanical vibration. — "Proc. Roy. Soc. Med.", 1960, 53, 92—96.
- Guignard I. Human frequency-Response to Vibration. — "Astronautik", 1961, 2, 227—238.
- Harris G. M., Crede C. E. (ed.). Shock and Vibration handbook. McGraw-Hill Book Co., Vol. 1—3. New York, 1961.
- Janeway R. N. Passenger vibration limits. — "J. Soc. Autom. Eng.", 1949, 56, 48—49.
- (Kolsky H.) Кольский Г. Волны напряжения в твердых телах. Пер. с англ. Изд-во иностр. лит. М., 1955, 192 с.

- Kuhn E. Über die Mechanische Impedanz der Menschen bei der Arbeit mit dem Drucklufthammer. — *Int. Z. Angew. Physiol.*, 1953, Bd. 15, S. 79—84.
- Kühn F., Scheffler H. Über die beim Gebrauch von Druck luftschlagwerkzeugen auf die Hand einwirkenden Kräfte. — *Int. Z. Angew. Physiol.*, 1954, Bd 15, S. 277—294.
- (Mors P.) Морз Ф. «Колебания и звук». Пер. с англ. М., 1949, 496 с.
- (Olson H.) Олсон Ф. Динамические аналогии. Пер. с англ., 1947, 223 с.
- Plumb C. S., Meigs J. W. Human vibration perception — *"Arch. Gen. Psychiat."*, 1961, 4, 611—614.
- Reicher H., Meister F. Die Empfindlichkeit des Menschen gegen Erschütterungen. — *Forsh. Geb. Ingenieurwesens*, 1931, 2, 381—386.
- Sato M. Response of Pacinian corpuscles to sinusoidal vibration. — *"J. Physiol."*, 1961, 159, 391—409.
- (Skudrzyk E.) Скучик Е. Основы акустики. Пер. с немец. Т. I и II. М., Изд-во иностр. лит., 1954, 565.
- Теория связи в сенсорных системах. Пер. с англ. Под ред. Г. Д. Смирнова. М., «Мир», 1964, 511 с.
- (Timoshenko S.) Тимошенко С. П. Колебания в инженерном деле. Пер. с англ. М., 1959, 440 с.
- Weis E. B., Clarke N. P., Brinkley J. W. Mechanical impedance as a Tool in Research on Human Response to Acceleration. — *"Aerospace Med."*, 1964, 35, 945—950.
- (Woodson W. E., Conover D. W.). Вудсон У. Канавер Д. Справочник по инженерной психологии для инженеров и художников-конструкторов. *Human Engineering Guide for Equipment Designers*, 1964, «Мир», 1968, т. 18, с. 966

ОГЛАВЛЕНИЕ

Глава I. ВИБРАЦИЯ И ЕЕ ГИГИЕНИЧЕСКОЕ, СОЦИАЛЬНОЕ И ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ЗНАЧЕНИЕ

Клинические проявления отдаленных последствий действия вибраций
Состояние гигиенического нормирования вибрации в СССР и за рубежом

Глава II. КОЛЕБАТЕЛЬНЫЕ ПРОЦЕССЫ, ИХ ХАРАКТЕРИСТИКИ И УСЛОВИЯ ИЗМЕРЕНИЙ В ГИГИЕНИЧЕСКИХ ЦЕЛЯХ

Гармоническое колебание и его кинематические и энергетические характеристики
Сложный колебательный процесс и его амплитудно-временные и амплитудно-частотные характеристики
Основы измерения вибраций для их гигиенической оценки и амплитудно-частотные и вероятностные характеристики вибраций механизированного инструмента

Глава III. БИОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ТЕОРИИ КОЛЕБАНИЙ МЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Распространение продольных колебаний в сплошных ограниченных средах
Колебательные процессы в системах с распределенными и сосредоточенными параметрами при характерных способах их возбуждения
Механические характеристики тела человека

Глава IV. ОСНОВЫ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ ДЕЙСТВИЯ ВИБРАЦИЙ НА ОРГАНИЗМ ЧЕЛОВЕКА И ЕЕ ПРИМЕНЕНИЯ ДЛЯ ГИГИЕНИЧЕСКОГО НОРМИРОВАНИЯ

Пороги восприятия гармонической и стохастической вибраций
Реакции сенсорной системы на действие вибрации
Действие вибрации на другие органы и системы
Подтверждение энергетического действия вибрации в работах других исследователей
Применение энергетической теории в гигиеническом нормировании вибраций

Литература

БИБЛИОТЕКА
Государственного
медицинского института
гор. Ашгабад

138223

РАЗУМОВ ИГОРЬ КОНСТАНТИНОВИЧ

**Основы теории энергетического действия
вибрации на человека**

Редактор *В. Ф. Кириллов*

Технический редактор *З. А. Романова*

Корректор *Т. Л. Алексеева*

Художественный редактор *С. М. Большакова*

Переплет художника *В. Г. Германа*

Сдано в набор 25/VII 1975 г. Подписано к печати
10/XII 1975 г. Формат бумаги 84×180/32. 6,5 печ. л.
(условных 10,92 л.). 10,86 уч.-изд. л. Бум. тип. № 2.
Тираж 3000 экз. Т-15679. МН-73. Цена 1 р. 23 к.

Издательство «Медицина». Москва, Петровериг-
ский пер., 6/8.

Заказ 2416. Московская типография № 11 Союз-
полиграфпрома при Государственном комитете
Совета Министров СССР по делам издательств,
полиграфии и книжной торговли. Москва, 113105,
Нагатинская ул., д. 1.



К сведению читателей!

Из плана выпуска литературы
издательства «Медицина»
на 1976 год:

СЕРДЕЧНО-СОСУДИСТАЯ СИСТЕМА ПРИ ДЕЙСТВИИ ПРОФЕССИОНАЛЬНЫХ ФАКТОРОВ.

Под ред. Н. М. Кончаловской. М., «Медицина», 1976
(IV кв.), 15 л., с ил., 6000 экз., 1 р. 65 к.

В монографии, написанной под руководством заведующей терапевтическим отделением Института труда и профзаболеваний АМН СССР профессора Н. М. Кончаловской, подводятся итоги многолетним исследованиям по изучению механизма неспецифических реакций и некоторых клинических синдромов, возникающих у человека при действии различных профессиональных факторов. В книге большое место занимают методы клинико-физиологических исследований и оценки состояния сердечно-сосудистой системы при действии шума, вибрации, радиоволн, ионизирующего излучения, химических факторов и др. Даются рекомендации по экспертизе трудоспособности, рациональному трудоустройству таких больных и лечению возникших состояний.

Книга рассчитана на врачей-профпатологов. План 1976 г.

Книги издательства «Медицина» поступают во все книжные магазины, где имеются отделы медицинской литературы, или в специализированные магазины.